

## شبیه‌سازی منحنی‌های پسماند رسوب رودخانه صوفی چای در مواقع سیلابی

نسیم علیزاده<sup>۱</sup>، محمدعلی قربانی<sup>۲</sup> و صابره دربندی<sup>۲\*</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۲/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۸/۱۷)

### چکیده

اطلاع از تغییرات میزان رسوب معلق در مواقع سیلابی از مسائل مهم در پروژه‌های آبی، به‌ویژه مدیریت حوضه‌های آبخیز و بررسی علل فرسایش می‌باشد. رابطه بین دبی و غلظت رسوبات معلق طی سیلاب‌های مختلف به عللی از قبیل تنوع بارش، دبی و منابع تولید رسوب مشابه و همگن نبوده و تولید حلقه‌هایی شبیه به هیسترتیک می‌نماید. بدین منظور استفاده از حلقه‌های پسماند رسوب که بر مبنای تئوری هیسترتیک است در چند سال اخیر گسترش یافته است. در این تحقیق ابتدا مقادیر بار معلق لحظه‌ای با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک و رگرسیونی شبیه‌سازی گردید. در مقایسه نتایج دو مدل حاصل، مدل برنامه‌ریزی ژنتیک به ترتیب با ضریب تبیین و میانگین مربعات خطا ۰/۵ و ۰/۸ به‌عنوان بهترین مدل در این تحقیق انتخاب گردید سپس براساس این مدل منحنی‌های هیسترتیک بار معلق برای ۶ رویداد ثبت شده در طول دوره آماری ۱۳۸۷-۱۳۸۳ ترسیم شد و ۴ مورد حلقه هیسترتیک خطی و ۲ مورد ساعتگرد برای رسوب معلق رودخانه مشاهده گردید. شناسایی انواع حلقه‌های هیسترتیک در تعیین سهم نسبی فرآیندهای مؤثر در تولید و انتقال رسوب از قبیل مقدار و شدت بارش، میزان دبی و شرایط رطوبتی پیشین حوضه مؤثر است و نیز با بررسی آنها می‌توان از منابع تولید و انتقال رسوب آگاهی یافت. نتایج نشان داد که حلقه‌های هیسترتیک ساعتگرد معمولاً در شرایط بارش و دبی زیاد و حلقه‌های هیسترتیک خطی در فصل بهار و ناشی از بارش‌ها با شدت کم اتفاق افتاده است و در این نوع حلقه‌های پسماند تفاوت قابل توجهی در غلظت رسوبات معلق متناظر با شاخه‌های صعودی و نزولی هیدروگراف وجود ندارد.

واژه‌های کلیدی: حلقه هیسترتیک، رسوب معلق، صوفی چای، سیلاب

۱. گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [sdarbandi.tabrizu@yahoo.com](mailto:sdarbandi.tabrizu@yahoo.com)

## مقدمه

فرسایش خاک و تولید رسوب آبخیزها از محدودیت‌های اساسی در دستیابی به کاربری پایدار اراضی و حفظ کیفیت آب در آبراهه‌ها، دریاچه‌ها و دیگر منابع آب به شمار می‌روند. از اینرو بررسی فرآیند فرسایش خاک و تولید رسوب و ارزیابی عوامل حاکم بر آنها از ضروریات مدیریت صحیح منابع موجود در یک حوضه آبخیز می‌باشد (۶).

رفتار بار معلق غالباً تابعی از شرایط انرژی جنبشی جریان است یعنی رسوبات در جریان‌های با انرژی جنبشی کم ذخیره شده و تحت جریان‌های با انرژی جنبشی زیاد، انتقال داده می‌شوند؛ با این وجود میزان انتقال رسوب تابعی از رسوب در دسترس نیز می‌باشد که در فرموله نمودن میزان رسوب انتقال یافته با دبی جریان، میزان رسوب در دسترس در نظر گرفته نمی‌شود ولی با این وجود روابط تجربی بین بار معلق و دبی جریان در یک مقطع از رودخانه به کار گرفته می‌شوند. معمولاً تخمین بار معلق با این روش‌ها بیش از حد کم و یا زیاد بوده و در بعضی موارد به ۵۰٪ مقدار واقعی نیز می‌تواند برسد (۷). یکی از علل این اختلاف مربوط به تفاوت در میزان رسوب ورودی و رسوب خارج شده از رودخانه می‌باشد و این تغییرات در میزان رسوب موجود را اصطلاحاً اثرات هیستریزس (Hysteresis) می‌نامند. هیستریزس در علوم به معنی پدیده‌ای که در آن رابطه میان علت و معلول نه فقط به بزرگی علت بلکه به جهتی که علت در راستای آن تغییر می‌کند بستگی دارد.

محققان زیادی هم‌چون ویلیامز (۲۱)؛ لورنز و همکاران (۱۳)؛ سیچینگبلا (۱۹)؛ لنزی و مارچی (۱۲)؛ پیکوئوت و همکاران (۱۶)؛ الکساندرو و همکاران (۴)؛ سیجر و همکاران (۱۸) تغییرات غلظت رسوبات معلق را نسبت به تغییرات سیلاب تحلیل نمودند. غالب اوقات این روابط طی وقایع مشابه، همگن نبوده و تولید حلقه‌های هیستریک می‌نماید. ویلیامز (۲۱) پنج کلاس معمولی از حلقه‌های هیستریکی را متمایز می‌نماید: ساعتگرد (Clockwise)، پادساعتگرد (Counter-Clockwise)، شکل ۸ مانند، خطی (Single Valued) و خطی

به اضافه یک حلقه (Single Valued Plus a Loop). با بررسی و تحلیل این منحنی‌ها می‌توان از منابع رسوبات معلق و نحوه انتقال رسوبات آگاهی یافت.

لنزی و مارچی (۱۲) منحنی‌های هیستریزس ۷ سیلاب ثبت شده در تابستان و پائیز را بر روی رودخانه‌ای در ارتفاعات شرق ایتالیا مورد بررسی قرار دادند. باکا (۵) تغییرات منحنی هیستریزس رسوبات معلق را در یک حوضه زراعی کوچک بررسی و نتیجه گرفت که بیشترین نوع حلقه‌های هیستریکی رسوب ایجاد شده، ساعتگرد بوده است. علاوه بر آن حلقه‌های هیستریکی پادساعتگرد نیز مشاهده شده و دلیل آن را ریزش دیواره‌های کانال یا رسوب ناشی شده از یک منبع دور گزارش نموده است. زابالتا و همکاران (۲۲) نتایج مطالعات صحرایی را در خصوص نحوه انتقال رسوبات در سه حوضه با خصوصیات فیزیکی بسیار متفاوت در منطقه باسک (Basque) اسپانیا ارائه نمودند. هدف تحقیق، تعیین فاکتورهای مؤثر بر تولید رسوبات معلق هر حوضه و شناسایی انواع حلقه‌های هیستریک از سیل بوده است. برای دو حوضه در بیشتر وقایع ثبت شده حلقه‌های هیستریکی ساعتگرد ظاهر شدند و تعداد کمی از آنها یک رابطه خطی بین دبی و غلظت رسوبات معلق نشان دادند. درحالی‌که در حوضه سوم از ۷۶ واقعه ثبت شده، ۲۲ واقعه رابطه خطی، ۱۸ حلقه هیستریکی ساعتگرد، ۲۶ واقعه حلقه هیستریکی پادساعتگرد و ۱۰ واقعه هیستریکی شکل هشت داشتند. نادال و همکاران (۱۴) منحنی‌های هیستریزس حوضه آراگوآس (Araguás) را بررسی نمودند که ۲۸٪ وقایع حلقه‌های ساعتگرد، ۳۴٪ وقایع حلقه‌های پادساعتگرد، ۱۵٪ شکل هشت مانند و ۲۳٪ از وقایع نیز به صورت حلقه‌های هیستریک پیچیده مشاهده گردید.

رودریگوز بلانکو و همکاران (۱۷) اثرات هیستریسیس دبی-رسوب را در طول مدت زمان بارش در حوضه انوی اسپانیا مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که روابط بین دبی و غلظت رسوبات معلق در طول مدت زمان وقوع رویدادهای بارش به صورت ساعتگرد می‌باشد. استیجن و

شدت بارش، میزان دبی و شرایط رطوبتی پیشین حوضه مؤثر است و نیز با بررسی آنها می‌توان از منابع تولید و انتقال رسوب آگاهی یافت که با استفاده از تنها رابطه غلظت رسوب و دبی این امر امکان‌پذیر نیست لذا هدف از این تحقیق، استخراج و بررسی منحنی‌های هیستریزس بار معلق برای اولین بار در رودخانه صوفی چای با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه و داده‌های مورد استفاده

رودخانه صوفی چای از رودخانه‌های بزرگ حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد و با وسعتی معادل ۷۵۴ کیلومترمربع در مختصات جغرافیایی  $37^{\circ}15'2''$  تا  $37^{\circ}45'3''$  عرض شمالی و  $45^{\circ}56'30''$  تا  $46^{\circ}25'55''$  طول شرقی و در ارتفاع ۱۴۵۰ متری از سطح دریا قرار گرفته است. این رودخانه از دامنه‌های جنوبی کوه‌های سهند سرچشمه گرفته و پس از عبور از قسمت غربی شهر مراغه و جنوب شهر بناب به دریاچه ارومیه می‌ریزد طول رودخانه صوفی چای حدود ۵۵ کیلومتر است. متوسط دبی سالانه رودخانه صوفی چای در ایستگاه هیدرومتری تازه کند ۱۱۰ مترمکعب بر ثانیه است. در جدول ۱ مشخصات داده‌ای مورد استفاده ارائه گردیده و در شکل ۱ موقعیت قرارگیری حوضه مورد مطالعه نشان داده شده است.

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق مقادیر بار معلق ماهانه و دبی همزمان آنها در طول دوره آماری ۱۳۷۶-۱۳۸۶ می‌باشد. داده‌های لازم پس از اخذ از ارگان‌های مربوطه، جهت بررسی صحت، کمیت و کیفیت داده‌ها، با مقادیر برداشت شده تطبیق داده شد. سپس بعد از انجام تست همگنی و انجام اصلاحات مورد نیاز، جهت تحلیل به کار گرفته شد. علاوه از مقادیر دبی و غلظت رسوبات معلق ۶ هیدروگراف سیل لحظه‌ای همراه با اندازه‌گیری اشل به‌طور همزمان انتخاب گردید. این هیدروگراف‌های لحظه‌ای به‌صورت ساعتی از سال ۱۳۸۳ الی ۱۳۸۷ در ماه‌های مختلف سال ثبت شده‌اند.

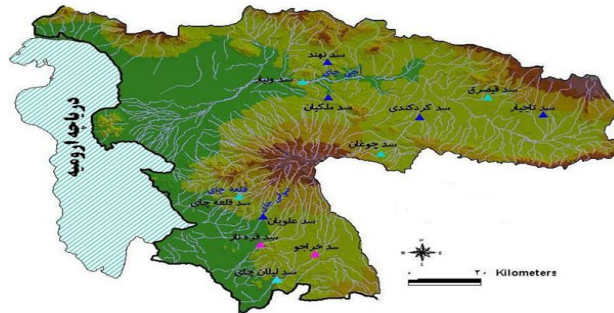
همکاران (۲۰) با تحقیقاتی که انجام دادند به این نتیجه رسیدند که پدیده هیستریسیس در جهت عقربه‌ای ساعت توسط فرسایش تولید نمی‌شود بلکه منبع تولید رسوبات ارتفاعات می‌باشد که معمولاً با منحنی‌های هیستریسیس پادساعتگرد در ارتباط هستند (۹ و ۱۰). نیک مهر و عزیزان (۳) منحنی‌های هیستریسیس و رابطه بین دبی و پارامترهای کیفیت آب رودخانه، شامل ۱۰ پارامتر کیفی مربوط به ۲۴ سال را جهت تعیین و ارزیابی مهم ترین فرآیند تاثیرگذار بر کیفیت آب رودخانه کارون در سه ایستگاه پل شالو، عباس پور و اهواز به ترتیب در قسمت بالا، میانی و پایین دست رودخانه کارون مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که رفتار منحنی‌های هیستریسیس بین دبی و پارامترهای کیفیت آب به‌صورت ساعتگرد، خطی و هشت شکل بوده، درحالی‌که در هر سه ایستگاه عمده‌ترین رفتار مربوط به الگوی ساعتگرد بوده است.

قربانی و همکاران (۲) تغییرات منحنی پسماند رسوبات معلق ۱۳ رویداد سیل در مدت ۴ سال در حوضه آبخیز معرف لیقوان برای نخستین بار مورد بررسی قرار دادند. لذا پس از شبیه‌سازی مقادیر بار معلق لحظه‌ای با استفاده از روش‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی و رگرسیونی، منحنی‌های پسماند بار معلق براساس بهترین روش برای هر رویداد ترسیم شد که ۶ مورد پسماند خطی، ۴ مورد پسماند هشت مانند، ۲ مورد پسماند ساعتگرد و یک مورد پسماند پادساعتگرد برای رسوب معلق رودخانه مشاهده گردید. نتایج نشان داد که حلقه‌های خطی در فصل بهار و ناشی از بارش‌ها با شدت کم رخ داده و حلقه‌های هشت مانند عمده‌تاً در شرایط کم آب سال که دبی کم بوده ولی شدت بارش زیاد می‌باشد، اتفاق افتاده است.

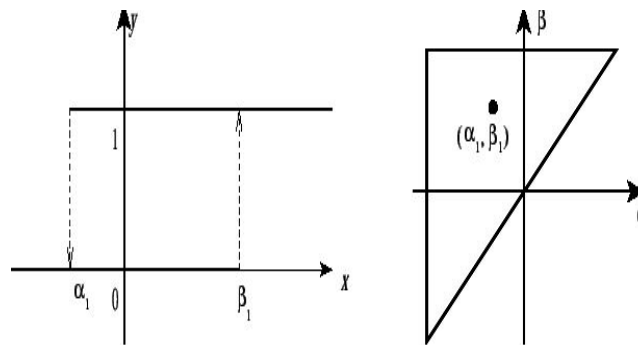
رابطه بین دبی و غلظت رسوبات معلق طی سیلاب‌های مختلف به عللی از قبیل تنوع بارش، دبی و منابع تولید رسوب مشابه و همگن نبوده و تولید حلقه‌هایی شبیه به هیستریسیس می‌نماید. شناسایی انواع منحنی‌های هیستریسیس در تعیین سهم نسبی فرآیندهای مؤثر در تولید و انتقال رسوب از قبیل مقدار و

جدول ۱. مشخصات آماری داده‌های مورد استفاده در طول دوره آماری ۸۶-۷۶

تیپ داده‌ها	حداقل	حداکثر	متوسط	انحراف معیار
رسوب (gr/lit)	۰/۰۰۲	۱۲/۵۳۰	۰/۴۸	۱/۳۷۷
دبی (m <sup>۳</sup> /s)	۰/۳۸۲	۷۳/۲۰۰	۵/۹۹	۱۱/۳۰۹



شکل ۱. موقعیت حوزه آبخیز صوفی چای



شکل ۲. طرح هیسترون

دریچه عمودی،  $\delta$ ، مکانیک (هیستریزیس پلاستیک)، فیزیک (هیستریزیس فرومغناطیس)، شیمی (انتقال فازی)، هیدرولوژی و فیزیک خاک (هیستریزیس رطوبت خاک)، اقتصاد (تحلیل شوک) و ... به کار برده شده است (۱۵). در شکل ۱ اگر  $x$  ورودی و  $y$  خروجی باشد، تعریف ساده هیستریزیس بدین صورت است که: وقتی ورودی  $x$  افزایش می‌یابد خروجی  $y$  یک مسیر معین را طی می‌کند، اما با تغییرات جهت ورودی و کاهش  $x$ ، خروجی روی همان مسیر اولیه بر نمی‌گردد و بدین ترتیب شاخه‌ها و حلقه‌هایی در صفحه ایجاد خواهد شد، در واقع پدیده غیرخطی هیستریزیس همراه با ایجاد حلقه‌هایی در

### پدیده هیستریزیس

لغت هیستریزیس از کلمه یونانی هسترس (Husteros) به معنای "با تأخیر آمدن" گرفته شده و برای نخستین بار ۱۲۰ سال پیش توسط فیزیکدان اسکاتلندی آلفرد اوینگ بدین صورت مطرح شد: برای ۲ کمیت  $x$  و  $y$  اگر تغییرات دوره‌ای  $x$  سبب تغییرات دوره‌ای  $y$  شده و سپس تغییرات دوره‌ای  $y$  با تأخیر در پی تغییرات  $x$  رخ دهد ممکن است در رابطه  $x$  و  $y$  هیستریزیس وجود داشته باشد (۱۵).

پدیده هیستریزیس که در پدیده‌های غیر خطی رخ می‌دهد، تا به حال در علوم مختلف هم چون هیدرولیک (جریان زیر یک

معلق کم و ضرایب رواناب سطحی بالا است. منابع رسوب محدود بوده و طی مراحل اولیه رویداد بارش - رواناب قبل از رسیدن دبی به پیک، سرعت تخلیه رسوبات زیاد است. تولید و انتقال رسوب محدود به نواحی نزدیک کانال بوده و تحت شرایط رطوبتی بالا رخ می‌دهند ولی سطوح شرکت کننده در انتقال رسوب محدود می‌باشند (۱۸).

#### حلقه‌های هیسترتیک پادساعتگرد

حلقه‌های هیسترتیک رسوب پادساعتگرد در طول سال و در شرایط متعدد رخ می‌دهند و معمولاً منابع رسوب در فاصله زیاد از منطقه سیلاب قرار دارند. در این حلقه‌ها پیک غلظت رسوبات معلق به علت دوری مسیر نواحی تولید رسوب و رواناب، بعد از پیک جریان به آبراهه می‌رسد. در سراسر حوضه خاک‌هایی نزدیک به حالت اشباع وجود داشته و در نتیجه سطوح شرکت کننده در انتقال رسوب به تمام حوضه گسترش می‌یابد (۱۸).

#### حلقه‌های هیسترتیک ۸ مانند

حلقه‌های هیسترتیک رسوب ۸ مانند معمولاً در طول تابستان رخ می‌دهند؛ زمانی که رطوبت خاک حوضه کم بوده و بارش‌هایی با شدت زیاد روی می‌دهد. به دلیل این که رسوبات معلق از یک سطح منبع دور می‌رسند و یا سطوح شرکت کننده در سراسر حوضه گسترده شده است، حلقه دومی در بازوی پایین رونده هیدروگراف بعد از یک حلقه ساعتگرد یا پادساعتگرد اول ایجاد می‌شود (۲۲).

#### حلقه‌های خطی

روابط خطی معمولاً در شرایط بارش و دبی کم و نیز شدت‌های بارش کم ایجاد می‌شوند. در این نوع حلقه‌های هیسترتیکی تفاوت قابل توجهی در غلظت‌های رسوبات معلق متناظر با شاخه‌های صعودی و نزولی هیدروگراف وجود ندارد (۲۲).

صفحه است که آنها را حلقه‌های هیسترتیکی می‌نامند.

شکل ۲ ساده‌ترین سیستم هیسترتیکی یا هیسترون را نشان می‌دهد و روابط آن به صورت زیر قابل بیان می‌باشد:

$$y(t) = R_{r,s}[t_0, y_0]x(t) = \begin{cases} y_0, & r < x < s \\ 1, & x \geq s \\ 0, & x \leq r \end{cases} \quad [1]$$

در این رابطه  $R_{r,s}$  به عنوان عملگر روی ورودی  $x(t)$  عمل می‌کند. تا زمانی که  $x$  داخل مقادیر آستانه‌ای و باقی می‌ماند؛ خروجی  $y$  از هیسترون در حالت اولیه خودش یعنی  $y_0$  باقی خواهد ماند که با توجه به وضعیت خروجی زمان قبل از خود ( $t_0$ )، می‌تواند مقادیر صفر یا ۱ باشد. به عبارت دیگر خروجی بین آستانه‌ها، دو مقداره و در طرفین تک مقداره است. در نتیجه چهار شاخه وجود دارد که دو شاخه افقی نیمه‌خط‌هایی با  $y=1$  و  $y=0$  بوده و شاخه‌های عمودی تکه‌خط‌هایی با طول واحد هستند که در آستانه‌ها روی محور  $x$  بوده و شاخه‌های افقی را به هم وصل می‌کنند. را آستانه خاموش (Switch-off) و را آستانه روشن (Switch-on) می‌نامند. با افزایش ورودی  $x$  تا زمانی که به آستانه برسد مقدار  $y$  در صفر ثابت می‌ماند، عبور از باعث پرش مقدار  $y$  از صفر به ۱ می‌شود. حال چنانچه ورودی کاهش یابد تا زمانی که به آستانه برسد مقدار خروجی در ۱ ثابت می‌ماند، عبور از باعث پرش مقدار خروجی از ۱ به صفر می‌شود و بدین ترتیب در فاصله بین و یک حلقه پادساعتگرد ایجاد می‌شود (۱۵).

همان‌طور که در بخش مقدمه نیز ذکر گردید، حلقه‌های هیسترتیک رسوب پنج نوع ساعتگرد، پادساعتگرد، ۸ مانند، خطی و خطی به اضافه یک حلقه هستند که شرح هر یک در ذیل آورده شده است

#### حلقه‌های هیسترتیک ساعتگرد

حلقه‌های هیسترتیک رسوب ساعتگرد معمولی‌ترین نوع حلقه‌های هیسترتیکی هستند (۱۸) که معمولاً در شرایط بارش و دبی زیاد رخ می‌دهد (۲۲). در این نوع حلقه‌ها غلظت رسوبات

## برنامه‌ریزی ژنتیک

زمینه اصلی برنامه‌ریزی ژنتیک (۱۱) روش الگوریتم ژنتیک (۸) می‌باشد. برنامه‌ریزی ژنتیک می‌تواند به‌طور موفقیت آمیزی در شرایط زیر به‌کار بسته شود: (۱) رابطه موجود بین متغیرهای مسأله، به‌خوبی شناخته نشده باشد (یا صحت و سقم شناخت فعلی از رابطه مذکور با تردید همراه باشد)، (۲) پیدا کردن اندازه و شکل روش حل نهایی، بسیار سخت بوده و بخش عمده مسأله را تشکیل دهد، (۳) روش‌های معمول تحلیل ریاضی قادر به ارائه روش‌های حل تحلیل نباشند، (۴) راه حل تقریبی، قابل قبول باشد، (۵) هرگونه بهبود جزئی در عملکرد، به‌صورت منظم اندازه‌گیری شده و این بهبود از ارزش زیادی برخوردار باشد و (۶) تعداد داده‌هایی که بایستی توسط رایانه مورد آزمون، دسته‌بندی و جمع‌بندی قرار گیرند زیاد باشد (نظیر داده‌های مربوط به ستاره‌شناسی، داده‌های مشاهداتی ماهواره‌ها، داده‌های مالی و یا هرگونه داده دیگر).

تفاوت اساسی موجود بین برنامه‌ریزی ژنتیک و الگوریتم ژنتیک به طبیعت هر یک از افراد بر می‌گردد، به‌نحوی که افراد در الگوریتم ژنتیک، ردیف‌های خطی با طول ثابت می‌باشند (کروموزوم‌ها) ولی در برنامه‌ریزی ژنتیک، همان شاخه‌های مجزا می‌باشند.

همچنین در برنامه‌ریزی ژنتیک بر ساختار درختی مجموعه‌ها تأکید می‌شود ولی الگوریتم ژنتیک، براساس سیستم ارقام دو دوتی عمل می‌نماید. فرآیند گام به گام حل یک مسأله با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک متشکل از ۵ مرحله به شرح زیر می‌باشد:

- (۱) انتخاب مجموعه ترمینال، که همان متغیرهای مستقل مسأله و متغیرهای حالت سامانه می‌باشد،
- (۲) انتخاب مجموعه توابع؛ که شامل عملگرهای حسابی، توابع آزمون و توابع بولی می‌باشد،
- (۳) شاخص اندازه‌گیری دقت مدل که بر مبنای آن می‌توان مشخص نمود که توانایی یک مدل در حل یک مسأله خاص تا چه اندازه می‌باشد،

(۴) مؤلفه‌های کنترل؛ مقادیر مؤلفه‌های عددی و متغیرهای کیفی که برای کنترل اجرای برنامه‌های به‌کار بسته می‌شوند.

(۵) شروط توقف اجرای برنامه؛ که معیاری برای حصول به نتایج و توقف اجرای برنامه می‌باشد. خوانندگان برای اطلاع بیشتر از مفاهیم و اصول این روش می‌توانند به سلطانی (۱) مراجعه فرمایند.

## استخراج مدل رسوب براساس برنامه‌ریزی ژنتیک

فرآیند مدل‌سازی میزان دمای خاک با استفاده از رهیافت برنامه‌ریزی ژنتیک به‌صورت زیر می‌باشد:

گام اول، شامل انتخاب تابع برازش مناسب می‌باشد. در مطالعه حاضر، تابع RMSE (جذر میانگین مربع خطاها) به‌عنوان تابع برازش انتخاب گردید. گام دوم، انتخاب مجموعه ترمینال (متغیرهای ورودی) و مجموعه توابع به‌منظور تولید کروموزوم‌ها می‌باشد. در مسأله حاضر، مجموعه ترمینال متشکل از مقادیر دمای خاک می‌باشد. انتخاب مجموعه توابع نیز گرچه یک امر صریح و ساده نمی‌باشد، لیکن یک حدس اولیه در این‌گونه موارد کافی خواهد بود. در این مطالعه از چهار عملگر اصلی که شامل  $\{+, -, /, \times\}$  و نیز توابع اصلی ریاضی  $\{\ln, \log(x), x\}$  استفاده به‌عمل آمد. مرحله سوم شامل انتخاب ساختار و معماری کروموزوم‌ها می‌باشد. اندازه طول هر رأس برابر با ۸ و تعداد ژن‌ها نیز برابر با ۳ در نظر گرفته شد. مرحله چهارم انتخاب تابع پیوندی می‌باشد که در این مطالعه تابع جمع‌کننده (مجموع) برای ایجاد پیوند بین زیرشاخه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت، در مرحله پنجم عملگرهای ژنتیک و نرخ هر یک از آنها انتخاب می‌گردد. در مورد مدل‌سازی دمای خاک در مطالعه حاضر، ترکیبی از کلیه عملگرها نظیر جهش، برگشت، سه نوع عملگر ترکیب مجدد مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر عددی این پارامترها به‌صورت خلاصه در جدول ۲ ارائه گردیده است:

## مدل رگرسیونی

مدل رگرسیونی قادر به شبیه‌سازی غیرخطی بار معلق سیلاب‌ها

جدول ۲. مقادیر عددی عملگرهای ژنتیک و نرخ آنها

توضیحات پارامتریک	تعداد کروموزوم	تعداد ژن	نرخ جهش	نرخ برگشت	نرخ ترکیب مجدد ژنی	نرخ ترکیب مجدد تک نقطه‌ای	نرخ ترکیب مجدد دو نقطه‌ای	نرخ ترانسپوز
تنظیمات عملگرها	۳۰	۳	۰/۰۴۴	۰/۱	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۱

شدند.

$$S(t) = f(Q_t) \quad [4]$$

که در آن  $Q_t$  و  $S(t)$  به ترتیب دبی و رسوب در زمان  $t$  می‌باشد. برای مدل‌سازی رسوب معلق لحظه‌ای از چهار عملگر ریاضی  $\{+, -, \times, /\}$  استفاده شده است. پارامترهای لازم جهت تجزیه و تحلیل در این تحقیق که جزء گام‌های اولیه برنامه‌ریزی ژنتیک می‌باشند که به صورت جدول ۳ انتخاب شده است.

**نتایج حاصل از مدل‌سازی رسوبات معلق با مجموعه عملگرها**  
پس از انجام مدل‌سازی روابط دبی- رسوب حاصل از GP به شرح زیر به دست آمد.

$$S(t) = \frac{Q_t^2}{3/48Q_t^2 + 3/48} + Q_t^2 + 0/035 \quad [5]$$

که رسوب در زمان  $t$  تابعی از دبی می‌باشد.

در جدول ۴ نتایج معیارهای ارزیابی مدل‌ها ارائه شده است.

استفاده از منحنی‌های سنج رسوب و رابطه توانی برازش داده شده بین داده‌های دبی و غلظت رسوب معلق یکی از متداول‌ترین روش‌های تعیین میزان غلظت رسوب معلق است. با توجه به خطای کمتر و ضریب تبیین بالای مدل برنامه‌ریزی ژنتیک نسبت به مدل رگرسیونی در این تحقیق از مدل برنامه‌ریزی ژنتیک استفاده گردید.

با توجه به جدول ۳، به این نتیجه می‌توان پی برد که برنامه‌ریزی ژنتیک در شبیه‌سازی بار معلق نسبت به مدل رگرسیونی دقت بیشتر و بهتری را دارا می‌باشد، در نتیجه از نتایج مدل برنامه‌ریزی ژنتیک جهت آنالیز منحنی‌های هیسترتیک رسوب در ادامه تحقیق استفاده شده است.

پس از شبیه‌سازی مقادیر بار معلق لحظه‌ای همزمان با

با دقت محدود هستند ولی به علت ساختار ساده آن، در اکثر مطالعات مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل رگرسیونی به صورت  $Q_s = aQ^b$  که در آن  $a$  و  $b$  ضرایب معادله می‌باشند، تعریف می‌شود.

### شاخص‌های تعیین دقت مدل

در این تحقیق برای ارزیابی توانایی و دقت مدل برنامه‌ریزی ژنتیک در شبیه‌سازی فرآیند بارش- رواناب براساس داده‌های دوره آماری از نمایه‌های ضریب همبستگی ( $R$ ) و جذر میانگین مربعات خطا، ( $RMSE$ ) استفاده شده است، که به ترتیب با استفاده از روابط ارائه شده در زیر قابل محاسبه است.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad [2]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N}} \quad [3]$$

در روابط اخیر،  $x_i$  و  $y_i$  به ترتیب مقادیر مشاهداتی و محاسباتی رسوب در گام زمانی  $i$  ام،  $N$  تعداد گام‌های زمانی،  $\bar{x}$  و  $\bar{y}$  نیز به ترتیب میانگین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی می‌باشد.

### نتایج و بحث

در این تحقیق جهت تخمین رسوب معلق لحظه‌ای با استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی ژنتیک و رگرسیونی، ۸۰ درصد داده‌ها به عنوان داده‌های آموزش و ۲۰ درصد بقیه جهت آزمون انتخاب

جدول ۳. مقادیر پارامترهای لازم جهت تجزیه و تحلیل

۳۰	کروموزوم‌ها (Chromosomes)
۳	تعداد ژن‌ها (Number of genes)
جمع	عملگر ریاضی بین ژن‌ها (Linking function)
۰/۰۴۴	سرعت جهش (Mutation rate)
۰/۱	سرعت وارونگی (Inversion rate)
۰/۳	سرعت تلاقی با یک نقطه (One-point recombination rate)
۰/۳	سرعت تلاقی با دو نقطه (Two-point recombination rate)
۰/۱	سرعت تلاقی ژن (Gene recombination)
۰/۱	سرعت جابه‌جایی (Gene transposition rate)

جدول ۴. ضریب تبیین و میانگین مربعات خطای مدل‌های برنامه‌ریزی ژنتیک و مدل رگرسیونی

مدل	آموزش		آزمون	
	R <sup>۲</sup>	RMSE	R <sup>۲</sup>	RMSE
GP	۰/۹	۰/۶	۰/۸	۰/۵
رگرسیونی*	۰/۶	۰/۷	۰/۷	۰/۶

\*:  $Q_s = 0.169 Q_t^{0.912}$

شدت‌های پائین است. منحنی‌های پسماند مربوط به ۲ رویداد به صورت ساعتگرد رفتار کرده‌اند که دلیل چنین رفتاری به‌خاطر وجود دبی‌ها و مقادیر بارش بالا، و همچنین شدت بارش‌های زیاد در زمین‌هایی با منابع رسوب فراوان است.

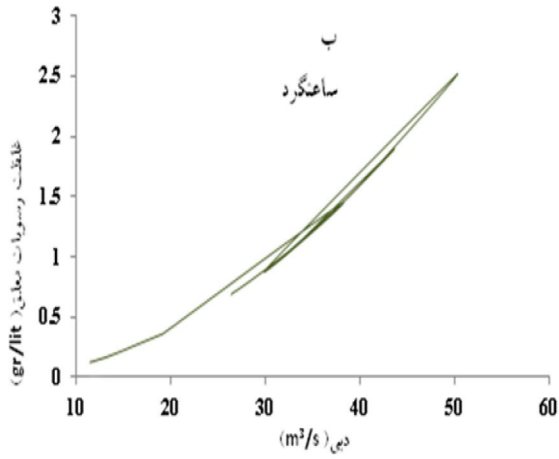
نتیجه‌گیری

الگوی رفتاری ساعتگرد و خطی عمده‌ترین الگوی رفتار رخ داده بین دبی و غلظت رسوبات معلق در حوضه آبریز صوفی چای می‌باشد. بررسی منحنی‌های هیسترتیک رسوبات معلق ۶ رویداد سیل در طی ۴ سال در حوضه آبخیز صوفی چای نشان داد که

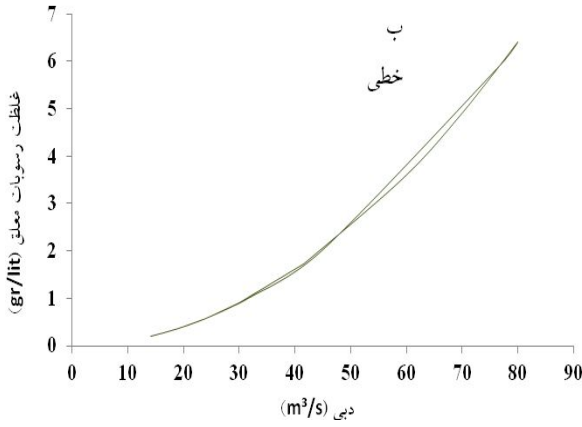
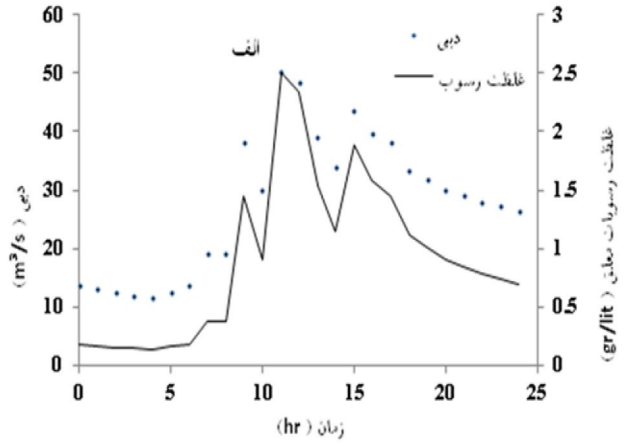
مقادیر سیلابی، جهت استخراج منحنی‌های هیسترتیک از ۶ هیدروگراف لحظه‌ای طی سال‌های ۱۳۸۳ الی ۱۳۸۷ استفاده گردید. اکنون با توجه به غلظت‌های بار معلق شبیه‌سازی شده همراه با دبی‌های لحظه‌ای متناظر با آنها می‌توان به رسم و بررسی منحنی‌های هیسترتیک پرداخت. در شکل ۳ هیدروگراف‌های لحظه‌ای دبی-رسوب و منحنی‌های هیسترتیز رسوب متناظر با هر یک در تاریخ‌های رویداده نشان داده شده است.

با توجه به نمودار منحنی‌های پسماند در سال‌ها و ماه‌های مختلف، منحنی پسماند مربوط به ۶ رویداد که در فصل بهار اتفاق افتاده‌اند به صورت خطی رفتار کرده‌اند. علت ایجاد چنین رفتاری معمولاً به دلیل وجود دبی‌ها و مقدار بارش کم و با

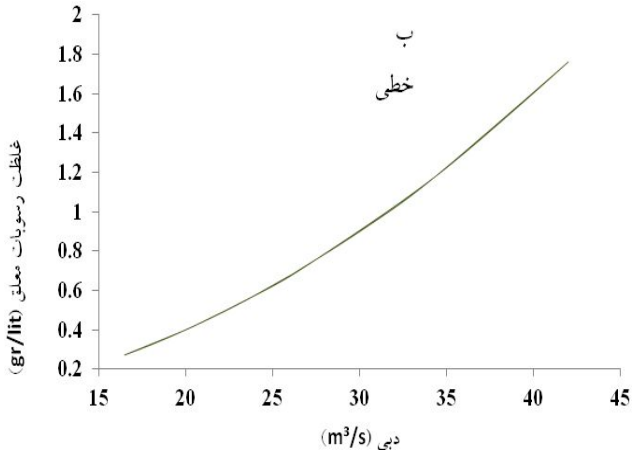
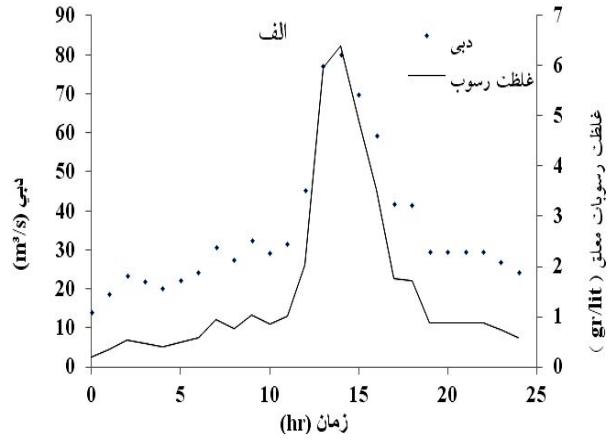




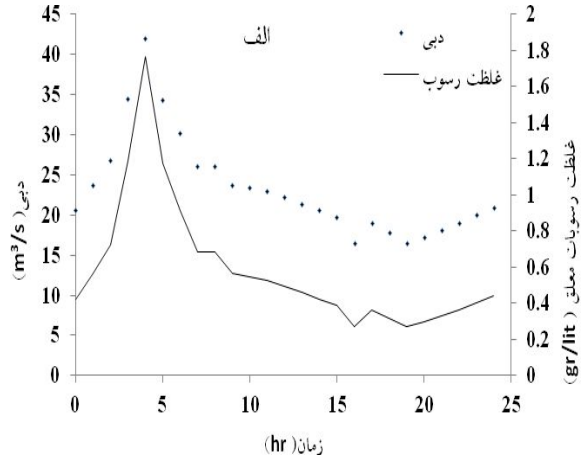
۸۳/۲/۴

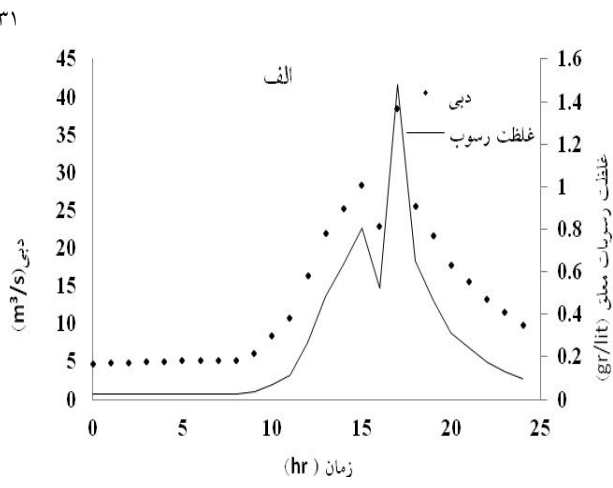
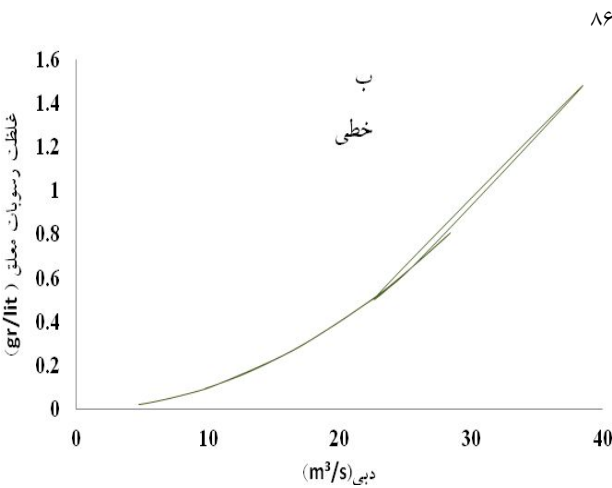
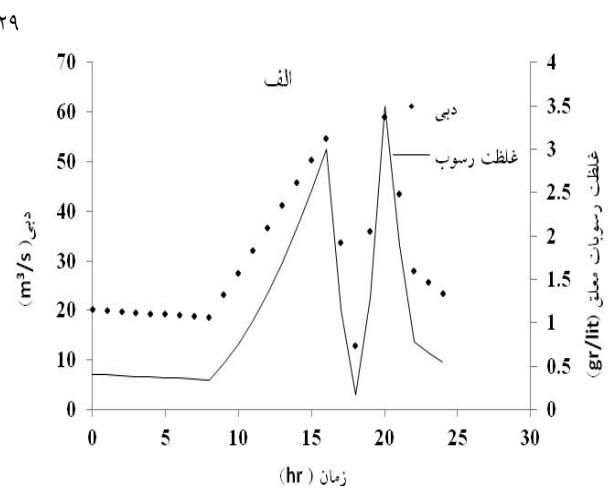
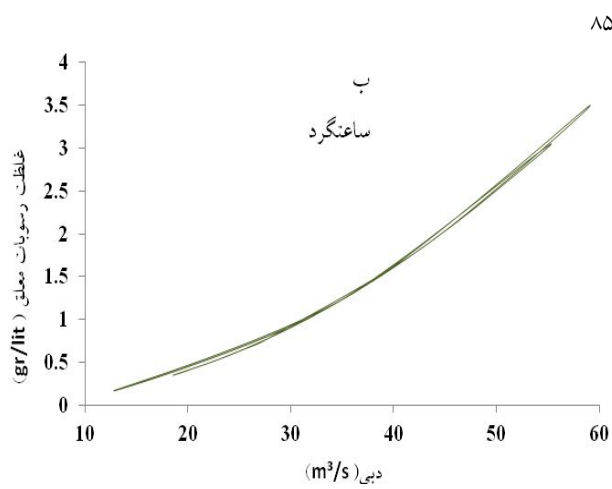
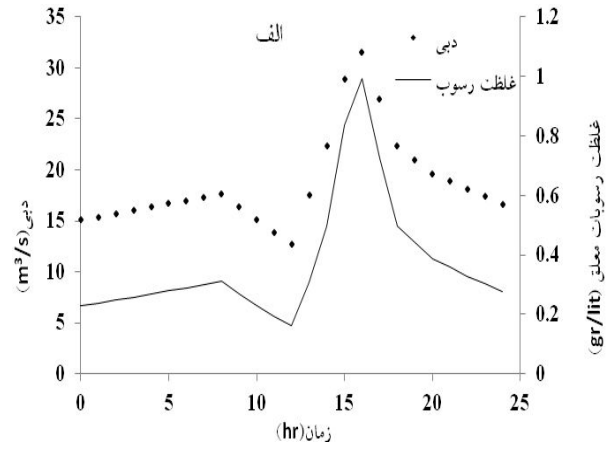
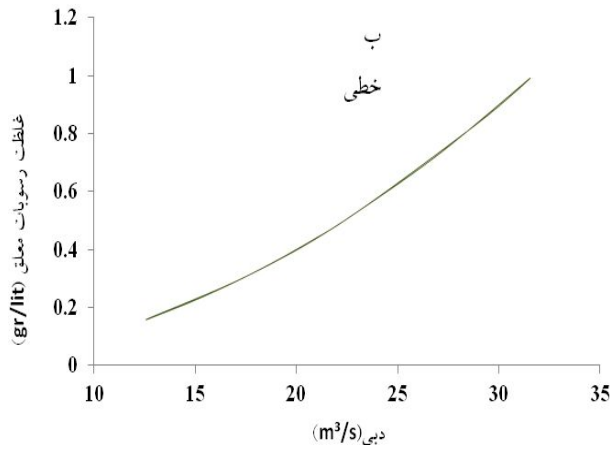


۸۳/۲/۱۲



۸۴/۱/۲۷





۸۵/۱/۲۹

۸۶/۲/۳۱

۸۷/۱۲/۲۴

شکل ۳. هیدروگراف لحظه‌ای دبی و رسوب، الف) و منحنی پسماند رسوب، ب) برای ۶ رویداد بارش. تاریخ هر رویداد و نوع حلقه پسماند روی شکل‌ها نشان داده شده است.

می‌باشد و در فصول مرطوب سال زمانی که شدت بارش بیشتر و دبی پایه قبل از وقوع رویداد بیشتر است اتفاق می‌افتد. در صورت عدم حفاظت سطح خاک با پوشش گیاهی میزان رسوبات بیشتر خواهد شد و در رویدادهای بلندمدت ظاهر می‌شوند و نتایج به‌دست آمده از این تحقیق با تحقیق باکا (۵) همخوانی دارد. در طول سیلاب‌های بعد از آن غلظت رسوبات معلق کمتر خواهد شد. همچنین در مرحله زمان صعود سیلاب‌های بعدی در سال‌های هیدرولوژیکی غلظت در طول زمان صعود سیلاب بیشتر خواهد شد و در دوره‌های بدون بارش غلظت رسوبات معلق بیشتر خواهد شد. در این تحقیق، از بررسی برخی عوامل که بر روابط بین دبی و غلظت رسوبات معلق مؤثر هستند، به‌علت محدود بودن داده‌ها صرف‌نظر شده است. در صورت در اختیار داشتن پارامترها و عوامل بیشتر، تحلیل آنها می‌توانست نتایج بهتر و دقیق‌تری را ارائه دهد.

رویدادها رفتار هیسترتیک خطی و ساعتگرد دارند. زابالتا و همکاران (۲۲) در سه حوضه به تعیین فاکتورهای مؤثر بر تولید رسوبات معلق هر حوضه و شناسایی انواع منحنی‌های هیسترتیک از سیل پرداختند. در یکی از حوضه‌ها بیشترین تعداد حلقه‌های هیسترتیکی به‌صورت خطی عمل نمودند. در این تحقیق منحنی‌های هیسترتیک رویدادهای سیل از نوع خطی و ساعتگرد می‌باشند که تحقیق زابالتا و همکاران (۲۲) این امر را تأیید می‌کند. قربانی و همکاران (۲) در تحقیقی بر روی رسوبات معلق رودخانه ليقوان چای با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی به این نتیجه رسیدند که بیشتر رویدادهای سیل رودخانه مورد مطالعه از نوع خطی و ساعتگرد می‌باشند. برای الگوی خطی به‌دلیل عوامل پیچیده نظیر منابع آلودگی تفسیر مشخص و درستی از علت وقوع این رخداد ارائه نشده است. هیسترتیک ساعتگرد یا مثبت نشان‌دهنده وجود منبع رسوبات معلق نزدیک رودخانه می‌باشد که در داخل حوضه قابل مشاهده

## منابع مورد استفاده

۱. سلطانی، ع.، م. قربانی، ا. فاخری‌فرد، ص. دربندی و د. فرسادی‌زاده. ۱۳۸۹. برنامه‌ریزی ژنتیک و کاربرد آن در مدل‌سازی فرآیند بارش - رواناب. مجله دانش آب و خاک ۲۰ (۴): ۶۱-۷۱.
۲. قربانی، م.، ح. مرادی‌زاده و س. نیک مهر. ۱۳۸۹. تحلیل منحنی‌های پسماند رسوب معلق در رودخانه ليقوان. مجله دانش آب و خاک ۲۰ (۳): ۱۸۳-۱۷۱.
۳. نیک‌مهر، س. عزیزیان، ا. ۱۳۸۸. اثر نوسانات دبی و آنالیز منحنی‌های هیسترتیس جهت ارزیابی پروسه تاثیرگذار بر کیفیت آب رودخانه. هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه. اهواز. دانشگاه شهید چمران اهواز. ۶ تا ۸ بهمن ۱۳۸۸.
4. Alexandrov Y., J. B. Laronne, I. Reid., 2003. Suspended sediment concentration and its variation with water discharge in a dryland ephemeral channel, northern Negev, Israel. *J. of Arid Environ.* 53: 73-84.
5. Ba a, P. 2002. Temporal variability of suspended sediment availability during rainfall-runoff events in a small agricultural basin. ERB and Northern European FRIEND Project 5 Conference. Demänovská dolina. Slovakia.
6. Defina A., F. M. Susin. 2003. Hysteretic behavior of the flow under a vertical sluice gate. *Physics of Fluids* 15 (9): 2541-2548.
7. Ferguson, R. I. 1986. River loads underestimated by rating curves. *Water Resour. Res.* 22 (1) : 74-76.
8. Goldberg, D. E. 1989. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison -Wesley, Reading, Mass.
9. Goodwin T. H., A. R. Young, G. R. Holmes, G. H. Old, N. Hewitt, J. C. Leeks and B. P. G. Smith. 2003. The temporal and spatial variability of sediment transport and yields within the Bradford Beck catchment, West Yorkshire. *Sci Total Environ.* PP: 314-316
10. Klein, M. 1984. Anti clockwise hysteresis in suspended sediment concentration during individual storms: Holberck catchment; Yorkire, England *Catena* 11: 251-257.
11. Koza, JR. 1992. Genetic programming: On the programming of computers by means of natural selection. Cambridge, MA: MIT Press.

12. Lenzi M. A., L. Marchi. 2000. Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (northeastern Italy). *Catena* 39: 267-282.
13. Llorens P., I. Queralt, F., Plana and F., Gallart. 1997. Studying solute and particulate sediment transfer in a small Mediterranean mountainous catchment subject to land abandonment. *Earth Surface Processes and Landforms* 22: 1027-1035.
14. Nadal-Romero E., D. Regüés and J. Latron. 2008. Relationships among rainfall, runoff and suspended sediment in a small catchment with badlands. *Catena* 74: 127-136.
15. O'Kane J. and D. Flynn, 2007. Thresholds, switches and hysteresis in hydrology from the pedon to the catchment scale: a non linear systems theory. *Hydrology & Earth System Sci.* 11 (1): 443-459.
16. Picouet C., B.Hingray and J. C.Olivry. 2001. Empirical and conceptual modelling of the suspended sediment dynamics in a large tropical African river: the Upper Niger river basin. *J. of Hydro.* 250:19-39.
17. Rodríguez-Blanco M. L., M. M. Taboada-Castro, M. T. Taboada-Castro and J. L. Oropeza Mota. 2003. Suspended sediments-discharge hysteresis during rainfall events in a small headwater catchment in the NW Spain Part of REN2003-08143 project and by the Spanish Ministry of Education and Science (MEC) and the Xunta of Galicia.
18. Seeger, M., M. P. Errea, S. Beguería, J. Arnáez, C. Martí and J. M. García-Ruiz. 2004. Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish Pyrenees. *J. of Hydrol.* 288:299-311.
19. Sickingabula, H. M. 1998. Factors controlling variations in suspended sediment concentration for single-valued sediment rating curves, Fraser River, Britis Columbia, Canada. *Hydrological Processes.* 12: 1869-1894.
20. Steegen A., G. Govers, J. Nachtergaele, I. Takken, L. Beuselinck and J. Poesen. 2000. Sediment export by water from an agricultural catchment in the Loam Belt of central Belgium. *Geomorphology.*33: 25-36.
21. Williams, G. P. 1989. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *J. of Hydrol.* 111:89-106.
22. Zabaleta A., M. Martínez, J. Uriarte and I. Antiguëdad. 2007. Factors controlling suspended sediment yield during runoff events in small headwater catchments of the Basque Country. *Catena* 71: 179-190.