تخمین پارامترهای تولید و انتقال رسوب در حوضه‌های آبریز کر و سیوند در استان فارس به کمک الگوریتم ژنتیک

مهدی زارعی[۱و*] و نوذر سامانی[۲]

۱. استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز

۲. استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز

تاریخ دریافت: ۹۰/۶/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۱/۷/۲۶

چکیده

توابع متعددی جهت تخمین نرخ فرسایش حوضه‌های آبریز توسط محققین مختلف ارائه شده است. با توجه به اینکه نرخ تولید و انتقال رسوب توسط فاکتورهای متعدد از جمله توپوگرافی، فرسایش‌پذیری خاک و کاربری اراضی کنترل می‌شود، برآورد مستقیم پارامترهای این توابع، کاری بسیار دشوار و بلکه غیرممکن است. لذا بهترین روش جهت برآورد این پارامترها استفاده از مدل‌های فرسایش پارامتریک می‌باشد. در این مدل‌ها با مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده دبی رواناب و بده رسوب که در یک دوره معین اندازه‌گیری شده‌اند، پارامترهای حوضه با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی، تخمین زده می‌شود. پس از برآورد پارامترهای رسوبی به راحتی می‌توان با استفاده از همین مدل حجم رسوب را به منظور طراحی سازه‌های هیدرولیکی از جمله مخازن سدها پیش‌بینی نمود.

در این تحقیق، مدل رسوب پیشنهادی سامانی بر روی حوضه‌های آبریز رودخانه کر (ایستگاه تنگ براق) و رودخانه سیوند (ایستگاه دشتبال) اعمال شده و به کمک الگوریتم ژنتیک، پارامترهای تولید و انتقال رسوب این دو حوضه برآورد شده است. مدل در حالت‌های ۱ تا ۳ مخزنه اجرا شده است که حداکثر انطباق را برای حوضه کر در حالت ۲ مخزنه و برای حوضه سیوند در حالت ۳ مخزنه نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، انتقال رسوب، تولید رسوب، رودخانه سیوند، رودخانه کر

مقدمه

شناخت سیستم‌های رسوبی و مخصوصا برآورد صحیح بار رسوبی در طرح‌های آبی از اهمیت بسیاری برخوردار است. رسوب‌گذاری در مخازن سدها و کاهش حجم مفید آن‌ها، تغییر مسیر رودها به دلیل رسوب‌گذاری در بستر آن‌ها و دگرگونی کیفیت آب به لحاظ مصارف شرب و کشاورزی از جمله مشکلات ناشی از رسوب‌گذاری است (شفاعی بجستان، ۱۳۷۸).

نرخ تولید و انتقال رسوب به فاکتورهای متعددی از جمله توپوگرافی، فرسایش پذیری خاک و کاربری اراضی، اندازه دانه‌های رسوب، دانسیته آب و ذرات رسوب، سرعت جریان آب و شیب کف کانال بستگی دارد. از آنجاکه برآورد همگی این پارامترها در یک حوضه رسوبی، کاری بسیار مشکل و نه چندان دقیق است، همواره محققین تلاش کرده‌اند که رابطه‌ای بین بده رسوب و بده جریان آب پیدا کنند به طوریکه بتوان با اندازه‌گیری بده جریان، نرخ فرسایش خاک توسط رواناب سطحی را برآورد نمود. لذا برای این منظور مدل‌های زیادی ارائه شده که عمدتاً از معادله پیوستگی مشتق شده‌اند. حل این معادلات نیاز به داده‌های هیدرولوژیکی دارد. با توجه به اینکه نرخ فرسایش یک حوضه علاوه بر نرخ تولید رسوب در حوضه، به ظرفیت انتقال رسوب نیز بستگی دارد، این مدلها با در نظر گرفتن توأم فرایندهای تولید

* نویسنده مرتبط zareim@shirazu.ac.ir

Archive of SID

www.SID.ir

و انتقال رسوب تخمینی از بده رسوب یک حوضه را فراهم می‌کنند. اغلب محققین معادلات جداگانه‌ای برای برآورد نرخ تولید و انتقال رسوب ارائه داده‌اند.

تئوری مدل‌های فرسایش

در مدل‌های فرسایش حوضه های آبریز، اغلب فرآیند فرسایش به دو زیر فرآیند تولید و انتقال رسوب تفکیک و برای هر زیر فرآیند معادلات فیزیکی جداگانه‌ای در نظر گرفته می‌شود.

فرآیند انتقال رسوب

توابع متعددی جهت برآورد انتقال رسوب توسط محققین مختلف از جمله (Meyer- Peter and Muller (1948), Bagnold (1956), Ackers and White (1973) و Yalin (1977) ارائه شده‌اند. علی‌رغم تئوری و روش‌های مختلفی که در توسعه این فرمول‌ها به کار رفته است، می‌توان یک تابع کلی نمایی برای نرخ انتقال رسوب (Φ) به صورت زیر ارائه داد:

$$\Phi = \alpha (Y - Y_{er})^{\gamma}$$ فرمول ۱

در این معادله، Y پارامتر تحرک‌پذیری[1] رسوب و Y_{er} آستانه تحرک‌پذیری می‌باشد. تنها پارامترهای α, Y_{er} و γ در فرمول‌های ارائه شده توسط محققین مختلف تفاوت دارد. به عنوان مثال در فرمول Ackers and White (1973) این پارامترها تابعی از اندازه دانه‌های رسوب است که از جداول ارائه شده توسط آن‌ها بدست می‌آید. همچنین در فرمول ارائه شده Meyer- Peter and Muller (1948)، $\alpha=8$, $\gamma=1.5$ و $Y_{er}=0.047$ می‌باشند بنابراین فرمول به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\Phi = 8(Y - 0.047)^{1.5}$$ فرمول ۲

یکی از ویژگی‌های فرمول ۱، محدوده وسیع کاربرد آن است. در حالی که سایر معادلات انتقال رسوب از جمله فرمول ۲ تنها در محدوده مشخصی از بده و شرایط رسوبی قابل استفاده می‌باشند. اما فرمول ۱ را می‌توان پس از بهینه کردن مقادیر پارامترهای آن، به وسیله یکی از تکنیک‌های بهینه‌سازی، برای کلیه رژیم‌های جریان و رسوب در یک حوضه آبریز به کار برد. محققین مختلف از جمله Williams (1972), Li et al. (1973), Komura (1976), Bhowmik et al. (1988) و Sharma et al. (1976) اهمیت رواناب سطحی، در تولید و انتقال رسوب در حوضه‌های آبریز را مورد توجه قرار دادند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که رواناب سطحی فاکتور اصلی تحرک‌پذیری در تولید و انتقال رسوب می‌باشد. با فرض این‌که فاکتور Y در فرمول ۱ رابطه مستقیم با فاکتور اصلی انتقال رسوب یعنی دبی رواناب سطحی دارد، می توان این فرمول را به شکل فرمول ۳ تغییر داد:

$$q_s = \alpha_t (q_w - \beta_t)^{\gamma_t} \quad if \quad q_w \succ \beta_t$$ فرمول ۳

$$q_s = 0 \quad if \quad q_w \le \beta_t$$

در این معادله q_s و q_w به ترتیب بده رسوب و رواناب سطحی می‌باشند. β_t بده آستانه حرکت و α_t و γ_t نیز پارامترهای سیستم هستند که بایستی برای هر حوضه آبریز برآورد شوند. مقادیر پارامترهای α_t, β_t و γ_t را که به نوبه خود به خصوصیات حوضه آبریز و شرایط بده جریان و رسوب وابسته‌اند، می‌توان با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی تخمین زد.

فرآیند تولید رسوب

تلاش‌های زیادی جهت ارائه روشی برای تخمین نرخ تولید رسوب یک حوضه آبریز صورت گرفته است (Campbell and Bouder, 1940; Miller, 1951). نتایج این تحقیقات را می توان به چهار دسته تقسیم کرد:

- رگرسیون آماری[2]
- روش‌های تحلیلی[3]
- نمودار رسوب واحد[4]
- روش‌های مفهومی[5]

اغلب مدل‌های تولید رسوب موجود، مدل‌های جعبه سیاه[6] و یا یکپارچه[7] هستند و مدل انتقال را نیز شامل می‌شوند. همچنین این مدل‌ها برای کل حوضه آبریز به کار می‌روند. از آنجاکه عامل اصلی تولید رسوب در حوضه‌های آبریز نیز رواناب می‌باشد، بنابراین یک مدل مشابه با مدل انتقال برای تولید رسوب نیز ارائه شده است (Samani, 1982):

$$P_s = \alpha_p (q_w - \beta_p)^{\gamma_p} \quad if \quad q_w \succ \beta_p$$ فرمول ۴

$$P_s = 0 \quad if \quad q_w \le \beta_p$$

در این معادله q_w، دبی رواناب، P_s، نرخ تولید رسوب و $p_\alpha, p\beta$ و p_γ پارامترهای مربوط به خصوصیات حوضه آبریز و شرایط دبی جریان و رسوب هستند که می‌توان آن‌ها را توسط تکنیک‌های بهینه‌سازی تخمین زد.

1- Mobility
2- Statistical regression
3- Analytical methods
4- Unit sediment graph
5- Conceptual approach
6- Black box
7- Lumped

Archive of SID
www.SID.ir

چارچوب مدل

به منظور برآورد پارامترهای فرسایش در حوضه‌های آبریز، Samani (1989) یک مدل پارامتری، طراحی و تدوین نمود. در طراحی این مدل فرایند فرسایش به دو زیر فرایند تولید و انتقال رسوب تفکیک شده و برای هر کدام فرمول فیزیکی جداگانه‌ای پیشنهاد گردیده است. در مدل ارائه شده توسط Samani (1989) فرض بر این است که هر حوضه آبریز از چند مخزن متوالی (سری) تشکیل شده و هر مخزن به عنوان یک سیستم تولید، ذخیره و انتقال رسوب عمل می‌کند (شکل ۱). در این مدل، رواناب به عنوان فاکتور اصلی تولید و انتقال رسوب در نظر گرفته می‌شود. ضرایب و پارامترهای موجود در فرمول‌های تولید و انتقال رسوب معرف خصوصیات فیزیکی حوضه و شرایط هیدرولوژیکی جریان آب و رسوب می‌باشند. از آنجا که این خصوصیات در حوضه‌های مختلف بسیار متغیر است، لذا Samani (1989) پیشنهاد می کند به جای تعیین مقادیر این پارامترها به صورت معین مانند فرمول Meyer- Peter and Muller (1948) (فرمول ۲)، بهتر است این پارامترها برای هر حوضه آبریز به روش بهینه‌سازی برآورد شوند.

فرایند فرسایش در این مدل از دو زیر فرایند تولید و انتقال که هر یک توسط قوانین فیزیکی پیشنهاد شده (فرمول‌های ۳ و ۴)، نتیجه شده است. به طور خلاصه سه معادله زیر، اساس این مدل را تشکیل می‌دهند:

۱- معادله انتقال رسوب

فرمول ۵

$$q_s^{i,j} = \alpha_t^i \left(q_w^{i,j} - \beta_t^i\right)^{\gamma_t^i} \quad if \quad q_w^{i,j} \succ \beta_t^i$$

$$q_s^{i,j} = 0 \quad if \quad q_w^{i,j} \le \beta_t^i \sqrt{b^2 - 4ac}$$

این معادله ظرفیت انتقال مخزن i را در فاصله زمانی j نتیجه می‌دهد.

۲- معادله تولید رسوب

فرمول ۶

$$P_s^{i,j} = \alpha_p^i \left(q_w^{i,j} - \beta_p^i\right)^{\gamma_p^i} \quad if \quad q_w^{i,j} \succ \beta_p^i$$

$$P_s^{i,j} = 0 \quad if \quad q_w^{i,j} \le \beta_p^i$$

این معادله ظرفیت تولید رسوب مخزن i را در فاصله زمانی j نتیجه می‌دهد.

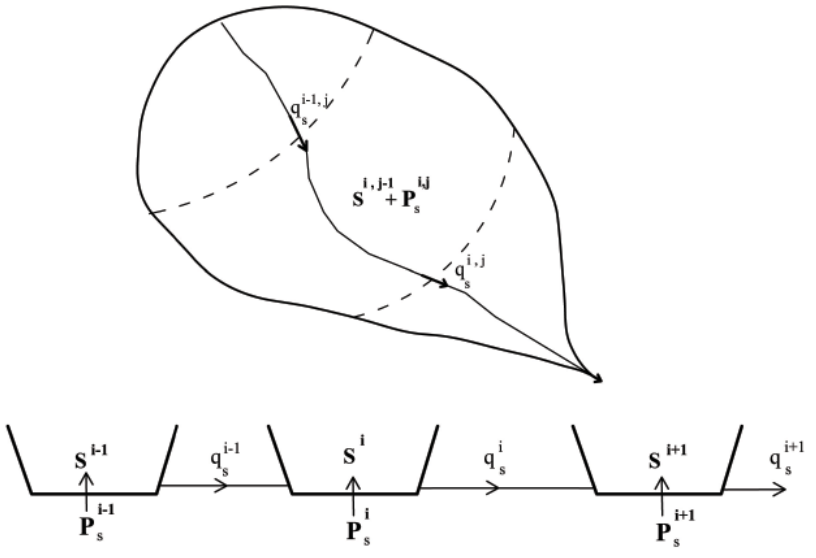
۳- معادله پیوستگی

فرمول ۷

$$S^{i,j} = S^{i,j-1} + P_s^{i,j} + q_s^{i-1,j} - q_s^{i,j}$$

این معادله بیلان ذخیره رسوب در مخزن i را ارائه می‌دهد. در این معادله ذخیره رسوب مخزن i در لحظه j ($S^{i,j}$) مجهول است که با معلوم بودن ذخیره رسوب مخزن i در لحظه قبل، $S^{i,j-1}$ ، رسوب منتقل شده از مخزن بالادست، $q_s^{i-1,j}$ ، رسوب تولید شده در مخزن i در لحظه j، $P_s^{i,j}$ و ظرفیت انتقال رسوب مخزن i در لحظه j، $q_s^{i,j}$ به‌دست می‌آید.

در این مدل کلیه خصوصیات حوضه شامل توپوگرافی، قابلیت فرسایش خاک، کاربری اراضی و غیره در یک دسته پارامتر (پارامترهای تولید و انتقال رسوب) منعکس می‌شود. از آنجا که عوامل متعددی بر روی هر یک از پارامترهای انتقال و تولید رسوب دخالت دارند، برآورد این پارامترها از روی خصوصیات فیزیکی حوضه و شرایط جریان، کاری دشوار و بلکه غیر ممکن است. لذا به منظور برآورد این پارامترها بایستی از تکنیک‌های بهینه‌سازی استفاده نمود. در این تحقیق، به‌منظور برآورد این پارامترها از تکنیک بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک با استفاده از نرم افزار MATLAB استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک یک روش جستجوی موثر در فضاهای وسیع و بزرگ است که با الهام



شکل ۱. طرح کلی از مدل ۳ مخزنه برای یک حوضه آبریز

Archive of SID
www.SID.ir

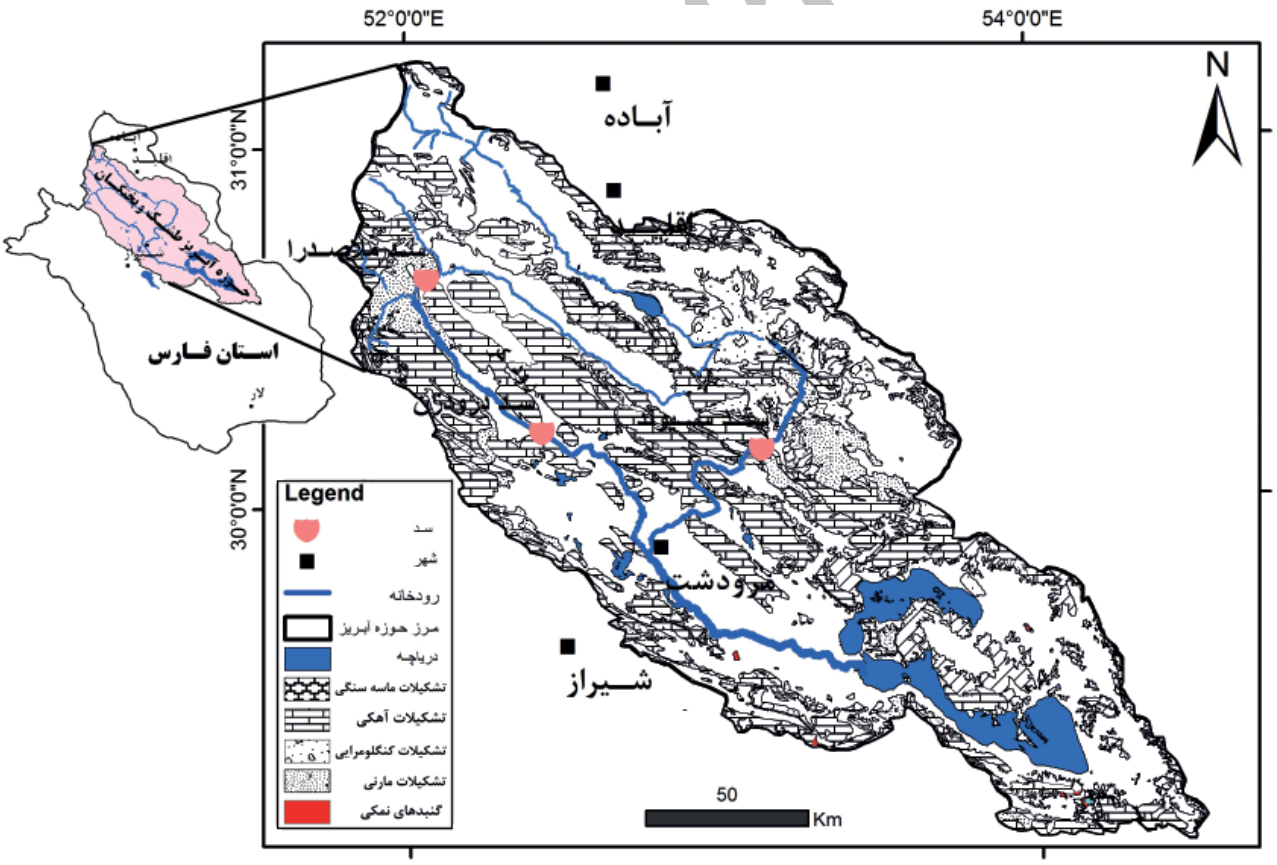
از اصول انتخاب طبیعی داروین در نهایت منجر به پیدا کردن یک جواب بهینه می‌گردد. در واقع مدل با دریافت مقادیر دبی رواناب و بده رسوب در دوره‌ای که اندازه‌گیری هر دو پارامتر در یک حوضه آبریز صورت گرفته است، پارامترهای موجود در فرمول‌های ۵، ۶ و ۷ را به گونه‌ای برآورد می‌کند که اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهده‌ای به حداقل برسد. پس از برآورد پارامترها می‌توان مدل را برای دوره‌هایی که فقط مقادیر دبی موجود است، اجرا و مقادیر بده رسوب را محاسبه کرد.

نتایج

با توجه به وابستگی پارامترهای انتقال و تولید رسوب به عوامل مختلف شامل خصوصیات فیزیکی حوضه و شرایط هیدرولوژیکی جریان آب و رسوب، بایستی برای برآورد این پارامترها از تکنیک‌های بهینه‌سازی استفاده نمود. برای این منظور لازم است که داده‌های دبی آب و رسوب یک حوضه آبریز در یک دوره آماری معین اندازه‌گیری گردد. سپس با داشتن دبی رسوب و دبی رواناب و استفاده از تکنیک‌های تخمین پارامتر[1] می‌توان پارامترهای انتقال رسوب شامل α_t^i ، β_t^i و γ_t^i و تولید رسوب شامل α_p^i ، β_p^i و γ_p^i حوضه آبریز را برآورد کرد. در این تحقیق مدل رسوبی پیشنهادی سامانی بر روی داده‌های روزانه دبی و بده رسوب حوضه‌های آبریز کر (ایستگاه تنگ براق) و سیوند (ایستگاه دشتبال) که توسط شرکت آب منطقه‌ای فارس اندازه‌گیری شده، اعمال گردیده است و به کمک الگوریتم ژنتیک، پارامترهای مختلف تولید و انتقال رسوب در این دو حوضه برآورد شده است.

ایستگاه تنگ براق

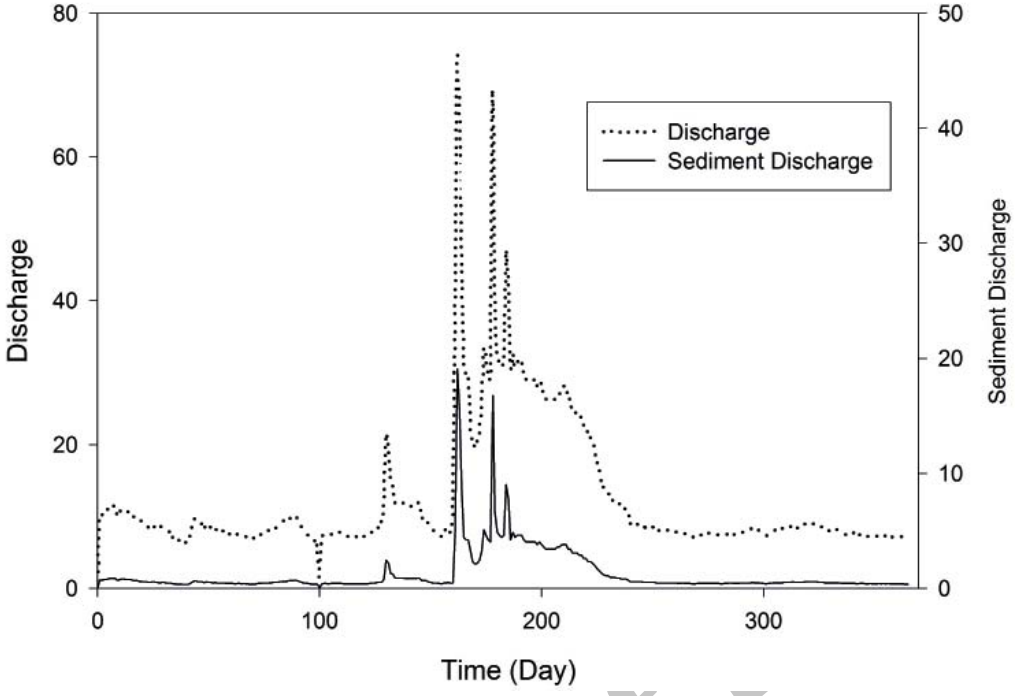
ایستگاه هیدرومتری تنگ براق با مختصات عرض جغرافیایی ۳۰° ۳۸′ شمالی و ۵۲° ۰۵′ شرقی بر روی رودخانه کر در استان فارس واقع شده است (شکل ۲). انتخاب این ایستگاه به دلیل قرار گرفتن آن در محل احداث سد مخزنی ملاصدرا می‌باشد. هیدروگراف و نمودار رسوب[2] این ایستگاه در شکل ۳ مشاهده می‌گردد. مدل رسوبی سامانی در حالت‌های ۱ تا ۳ مخزنه بر روی داده‌های این ایستگاه اعمال شده که نتایج آن در جدول ۱ مشاهده می‌گردد. تابع هدف در این مدل در واقع اختلاف بین مقادیر بده رسوب شبیه‌سازی شده توسط مدل با مقادیر مشاهده شده می‌باشد. همانطورکه مشاهده می‌شود میزان خطا (تابع هدف) در حالت ۲ مخزنه حداقل است و لذا پارامترهای این حالت به عنوان پارامترهای رسوبی حوضه آبریز کر در ایستگاه تنگ براق در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲. نقشه حوضه آبریز طشک و بختگان

1- Parameter estimation
2- Sediment graph

www.SID.ir



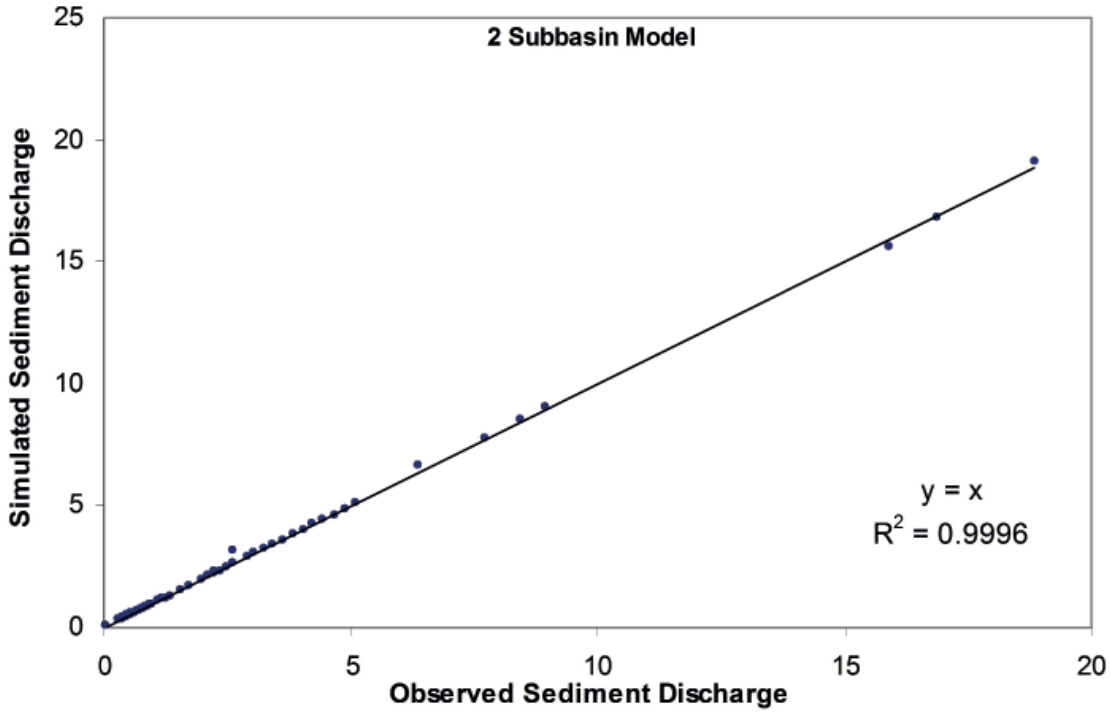
شکل ۳. هیدرو گراف و نمودار رسوب ایستگاه تنگ براق بر روی رودخانه کر

جدول ۱. نتایج تخمین پارامترهای تولید و انتقال رسوب حوضه آبریز کر (ایستگاه تنگ براق) در حالت‌های ۱ تا ۳ مخزنه

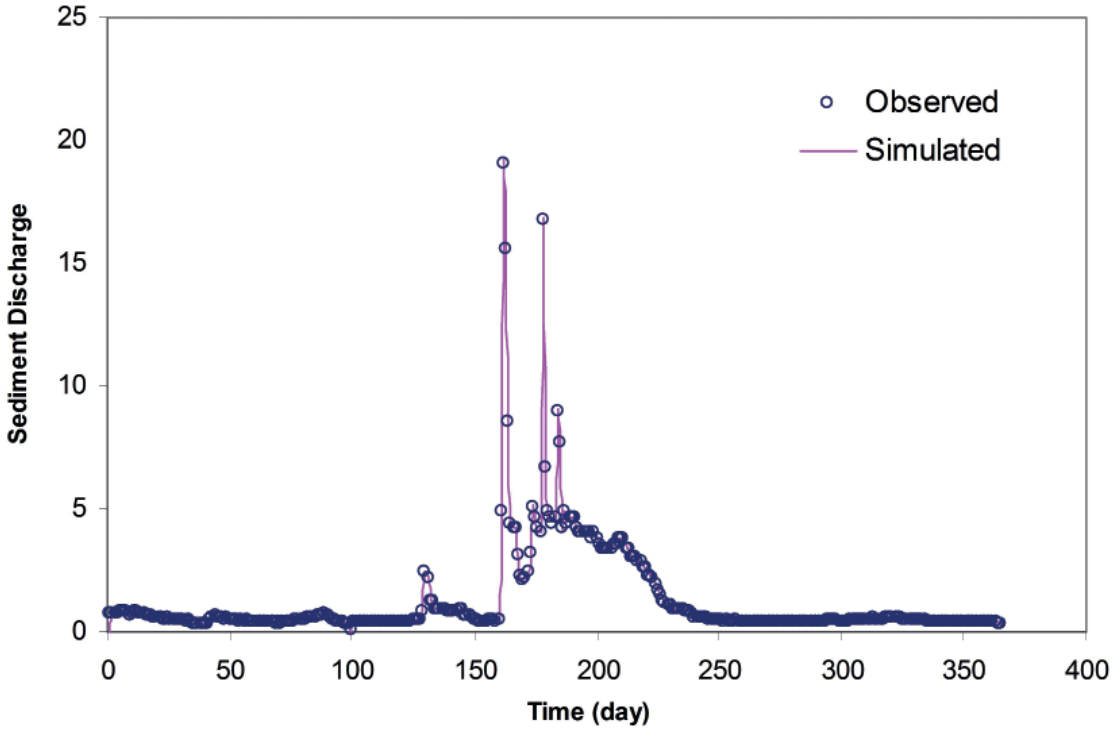
مخزن	فرایند	پارامتر	مدل تک مخزنه	مدل ۲ مخزنه	مدل ۳ مخزنه
۱	انتقال	α_t	0.017	0.037	4.274
		β_t	0.254	1.346	0.664
		γ_t	1.635	0.148	3.144
	تولید	α_p	0.319	0.376	2.482
		β_p	5.519	0.763	4.146
		γ_p	0.987	0.421	2.738
۲	انتقال	α_t		2.166	2.215
		β_t		1.107	4.224
		γ_t		0.575	1.843
	تولید	α_p		0.016	4.418
		β_p		0.730	3.656
		γ_p		1.644	0.763
۳	انتقال	α_t			0.082
		β_t			3.840
		γ_t			1.209
	تولید	α_p			0.782
		β_p			3.296
		γ_p			4.034
تابع هدف			4.497	4.005	33.52

Archive of SID
www.SID.ir

شکل ۴ همبستگی داده‌های رسوب شبیه‌سازی شده در حالت ۲ مخزنه را در مقابل داده‌های واقعی نشان می‌دهد. ضریب همبستگی ۰/۹۹۹۶ نشان دهنده انطباق بسیار خوب داده‌های شبیه سازی شده با داده‌های واقعی می‌باشد. نمودار رسوب داده‌های شبیه‌سازی شده ایستگاه تنگ براق نیز در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

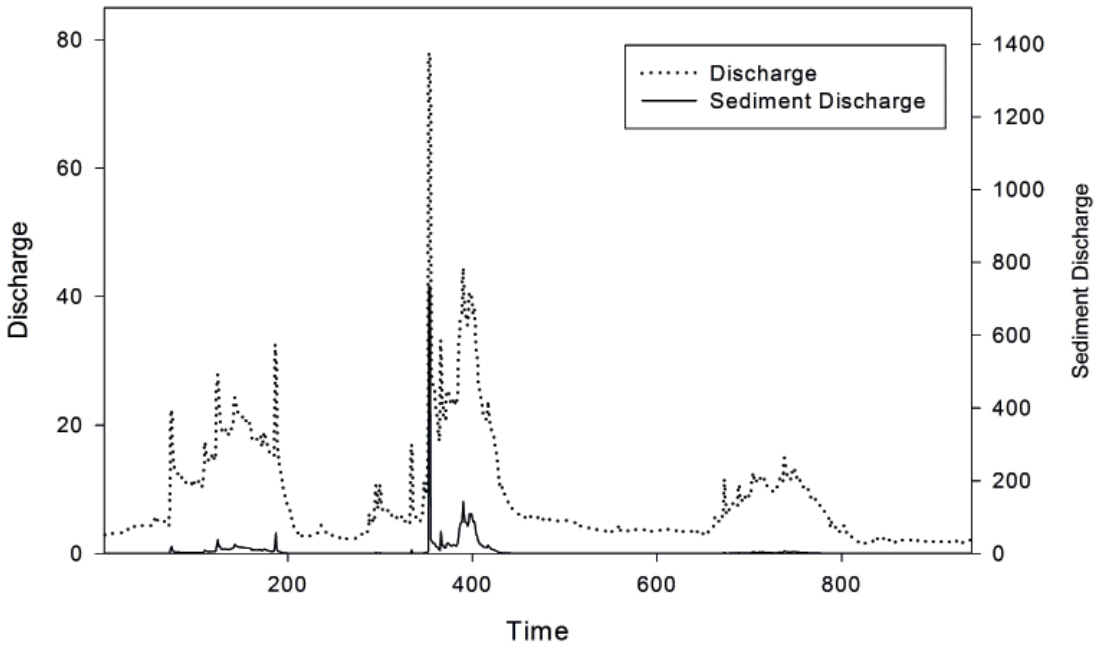


شکل ۴. همبستگی داده های رسوب شبیه‌سازی شده در حالت ۲ مخزنه با داده‌های واقعی



شکل ۵. نمودار رسوب داده‌های شبیه‌سازی شده ایستگاه تنگ براق

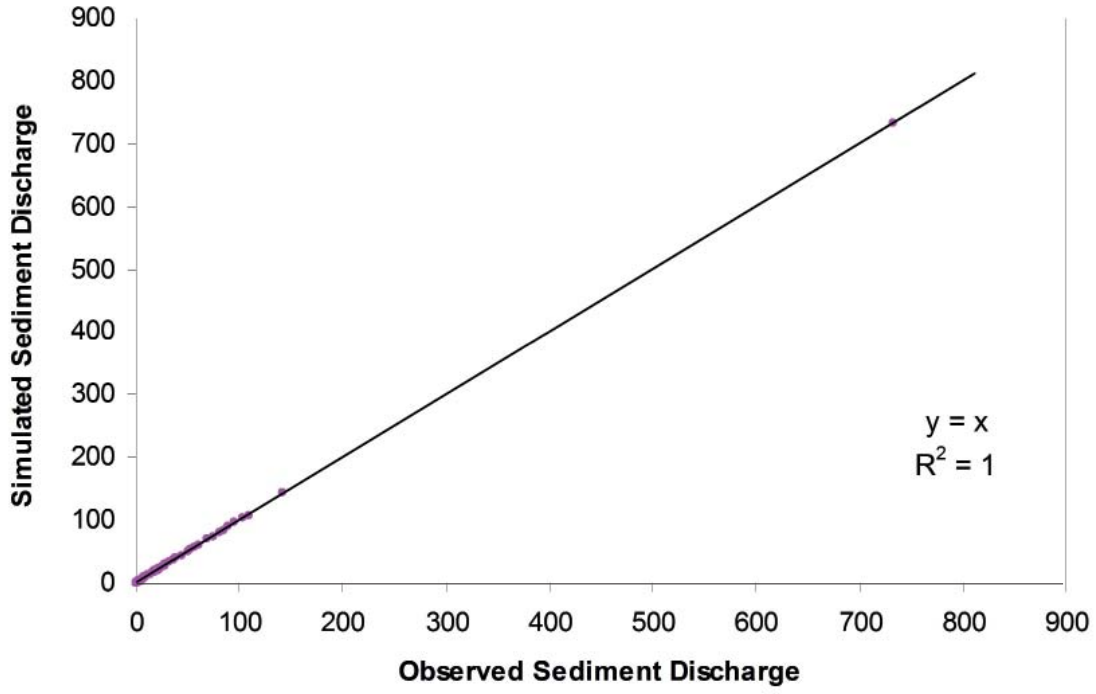
www.SID.ir



شکل ۶. هیدرو گراف و نمودار رسوب ایستگاه دشتبال بر روی رودخانه سیوند

ایستگاه دشتبال

ایستگاه هیدرومتری دشتبال با مختصات '۰۱ °۳۰ و '۵۸ °۵۲ بر روی رودخانه سیوند در استان فارس واقع شده است (شکل ۱). این ایستگاه در فاصله چند کیلومتری زیردست سد درحال ساخت سیوند قرار دارد. شکل ۶ هیدروگراف و نمودار رسوب این ایستگاه را نشان می‌دهد. مدل رسوبی سامانی (1982) در حالت‌های ۱ تا ۳ مخزنه بر روی داده‌های این ایستگاه نیز اعمال شده که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. مدل در حالت ۳ مخزنه، کمترین میزان خطا (تابع هدف) را دارد، لذا پارامترهای این حالت به عنوان پارامترهای رسوبی حوضه آبریز سیوند در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۷ همبستگی بالای داده‌های رسوب شبیه‌سازی شده در حالت ۳ مخزنه، در مقابل داده‌های واقعی قابل مشاهده است. نمودار رسوب داده‌های شبیه‌سازی شده حوضه آبریز سیوند نیز در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

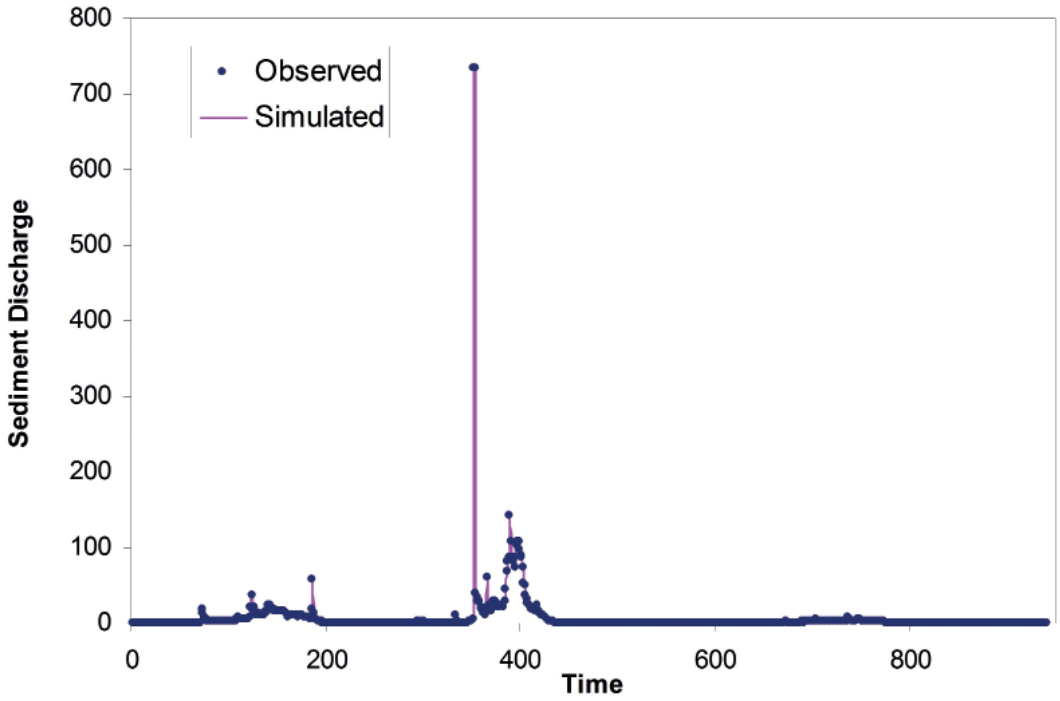


شکل ۷. همبستگی داده های رسوب شبیه سازی شده در حالت ۲ مخزنه با داده های واقعی

www.SID.ir

جدول ۲. نتایج تخمین پارامترهای تولید و انتقال رسوب حوضه آبریز سیوند (ایستگاه دشتبال) در حالت‌های ۱ تا ۳ مخزنه

مخزن	فرایند	پارامتر	مدل تک مخزنه	مدل ۲ مخزنه	مدل ۳ مخزنه
۱	انتقال	α_t	0.003	0.280	1.381
		β_t	0.246	0.070	2.068
		γ_t	2.888	1.932	1.723
	تولید	α_p	0.800	0.853	2.230
		β_p	0.764	0.153	0.140
		γ_p	2.538	1.224	0.941
۲	انتقال	α_t		0.003	2.707
		β_t		0.661	1.905
		γ_t		2.853	2.413
	تولید	α_p		0.079	1.393
		β_p		1.528	0.206
		γ_p		0.431	0.769
۳	انتقال	α_t			0.002
		β_t			0.023
		γ_t			2.910
	تولید	α_p			0.734
		β_p			0.250
		γ_p			0.222
تابع هدف			108.600	135.080	97.759



شکل ۸. نمودار رسوب داده‌های شبیه‌سازی شده ایستگاه دشتبال

www.SID.ir

نتیجه‌گیری

یک مدل پارامتریک شبیه‌سازی فرایند فرسایش در حوضه‌های آبریز که در آن فرایند فرسایش به دو زیر فرایند تولید و انتقال رسوب تفکیک شده، توسط Samani (1982) پیشنهاد گردیده است. در این مدل هر حوضه آبریز به چند مخزن تقسیم شده که هر مخزن به عنوان یک سیستم تولید، ذخیره و انتقال رسوب عمل می‌کند. از آنجاکه پارامترهای موجود در فرمول‌های تولید و انتقال رسوب معرف خصوصیات فیزیکی حوضه و شرایط هیدرولوژیکی جریان آب و رسوب می‌باشند، جهت برآورد مقادیر این پارامترها بایستی از تکنیک‌های بهینه‌سازی استفاده شود. مدل سامانی جهت برآورد پارامترهای مختلف تولید و انتقال رسوب برای بخشی از حوضه آبریز طشک و بختگان (ایستگاهای تنگ براق و دشتبال) در استان فارس مورد استفاده قرار گرفت و پارامترهای تولید و انتقال رسوب برای هر حوضه به روش الگوریتم ژنتیک برآورد گردید. نتایج نشان می‌دهد که مدل سامانی به خوبی توانایی شبیه‌سازی بده رسوب در این حوضه‌ها را دارد و بهترین نتایج برای ایستگاههای تنگ براق و دشتبال به‌ترتیب در حالت‌های ۲ و ۳ مخزنه حاصل شده است. پس از برآورد پارامترهای رسوبی به راحتی می‌توان از این مدل، جهت پیش بینی حجم رسوب به‌منظور طراحی سازه‌های هیدرولیکی از جمله مخازن سدهای ملاصدرا و سیوند استفاده کرد.

منابع

– شفاعی بجستان، م.، ۱۳۷۸. هیدرولیک رسوب. دانشگاه شهید چمران اهواز، ۳۲۷.

- Ackers, P. and White, W.R., 1973. Sediment transport: new approach and analysis. Journal of the Hydraulics Division, 99, 204-254.

- Bagnold, R.A., 1956. The flow of cohesionless grains in fluids. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 964, 235-297.

- Bhowmik, N.G., Demissie, M. and Adams, J.R., 1988. Sediment transport in streams and rivers. Journal of Applied Hydrology, AHI, 1, 1.

- Campbell, F.B. and Bouder, H.A., 1940. A rating curve method for determining silt discharge of rivers. Transactions American Geophysical Union, 21, 603-607.

- Komura, S., 1976. Hydraulics of slope erosion by overland flow. Journal of the Hydraulics Division, 102, 10, 1573-1586.

- Li, R.M., Shen, H.W. and Simon, D.B., 1973. Mechanics of soil erosion by overland flow, Proc. 15th congress of IAHS, Istanbul, Turkey , Proceeding Paper, 1, 437-446.

- Meyer-Peter, E. and Muller, R., 1948. Formula for bed-load transport. Proc. 2nd Congress of IAHR, Stockholm, 39-64.

- Miller, C.R., 1951. Analysis of flow-duration, sediment-rating curve method of computing sediment yield. United States Department of Interior, Bureau of Reclamation, 80.

- Samani, N., 1982. On the development and calibration of a parametric catchment sediment model, Ph. D Thesis, University of London, 638.

- Samani, N., 1989. A parametric catchment erosion model. International Journal of Engineering, 2, 3, 118-127.

- Sharma, T., Hines, W. and Dickinson, W., 1979. Input-output model for runoff-sediment yield processes. Journal of Hydrology, 40, 3, 299-322.

- Williams, J.R., 1972. Sediment yield prediction with the universal equation using runoff energy factor. Proceedings of the Sediment-Yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Mississippi, 244-252.

- Yalin, M.S., 1977. Mechanics of Sediment Transport. 2nd. edition. Pergamon Press. 298.

Archive of SID

www.SID.ir