

مقدمه

یکی از روش‌های اندازه‌گیری فرسایش، بررسی تلفات خاک یا رسوب تولید شده از کرت فرسایش در شرایط باران طبیعی و یا شبیه‌سازی است. با بررسی داده‌های جمع‌آوری شده، دامنه وسیع اختلاف در مقدار فرسایش خاک یک محل (تکرارها) و در سال‌های مختلف مشاهده می‌شود. زیرا، اصولاً، فرسایش پدیده‌ای پیچیده است و تغییرات مکانی و زمانی زیادی دارد. Toy و همکاران [۲۴] با ذکر دو مثال، تفاوت زیاد در مقدار تلفات خاک ناشی از یک رویداد بارندگی معین در چند کرت فرسایش (به ظاهر) مشابه از نظر مشخصات و آماده‌سازی که در مجاورت یکدیگر قرار داشتند را نشان دادند. در مورد اول، تلفات خاک از کرت‌هایی یکسان با فاصله‌ای کمتر از پنج متر و نرخ فرسایش زیر یک تن در هکتار در سال، اختلاف ۴۰۰ درصد بوده است (در یک کرت، تلفات خاک ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار در سال و در دیگری، یک تن در هکتار در سال). در مورد دوم، در دامنه‌ای با نرخ فرسایش حدود ۲۰ تن در هکتار در سال، ۳۰ درصد اختلاف در اندازه‌گیری‌ها مشاهده شده است.

از نظر زمانی، فرسایش معمولاً پدیده‌ای ثابت و پیوسته نیست و اغلب در آن نوسانات فصلی دیده می‌شود. بعلاوه، این پدیده از رویدادهای استثنایی که بسیار مخرب هستند تأثیر می‌پذیرد (Zachar, [۲۶]). دلیل عمده نقش رویدادهای استثنایی در تلفات خاک و تولید رسوب مربوط به ضریب رواناب بالاتر آن‌ها است. چه، بدون رواناب، خاک پاشمان یافته از محل خارج نخواهد شد. جدول (۱) درصدی از باران که در بارندگی‌های مختلف یک دوره ۱۲ ساله در روی خاک‌های لسی منطقه Tang-shan چین به رواناب تبدیل شده را مقایسه می‌کند. ملاحظه می‌شود که فقط در ۸۱ واقعه از ۷۰۹ مورد بارندگی، رواناب قابل اندازه‌گیری جریان یافته است. بعلاوه بررسی روند نیز حاکی از ازدیاد تعداد رویدادهای منجر به رواناب و بالا رفتن ضریب رواناب با افزایش ارتفاع بارندگی است. تغییرات فرسایش در رویدادها، و در نتیجه تفاوت نرخ فرسایش از سالی به سال دیگر، رسیدن به یک متوسط صحیح را بدون وجود آمار بلندمدت غیر ممکن می‌سازد.

علاوه بر اختلاف در مقیاس‌های مکانی و زمانی اندازه‌گیری، تفاوت شرایط اندازه‌گیری‌ها در پژوهش‌های مختلف نیز مطرح است. به عنوان مثال، در کرت‌های فرسایش با کاربری مرتعی، به دلیل شرایط قرق نسبی، مقادیر به‌دست آمده نمی‌تواند توضیح دهنده

امکان برآورد فرسایش متوسط سالانه درازمدت مبتنی بر اندازه‌گیری فرسایش حاصل از چند رخداد بارندگی

محمود عرب‌خردی^۱

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۰۱ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۵/۰۲

چکیده

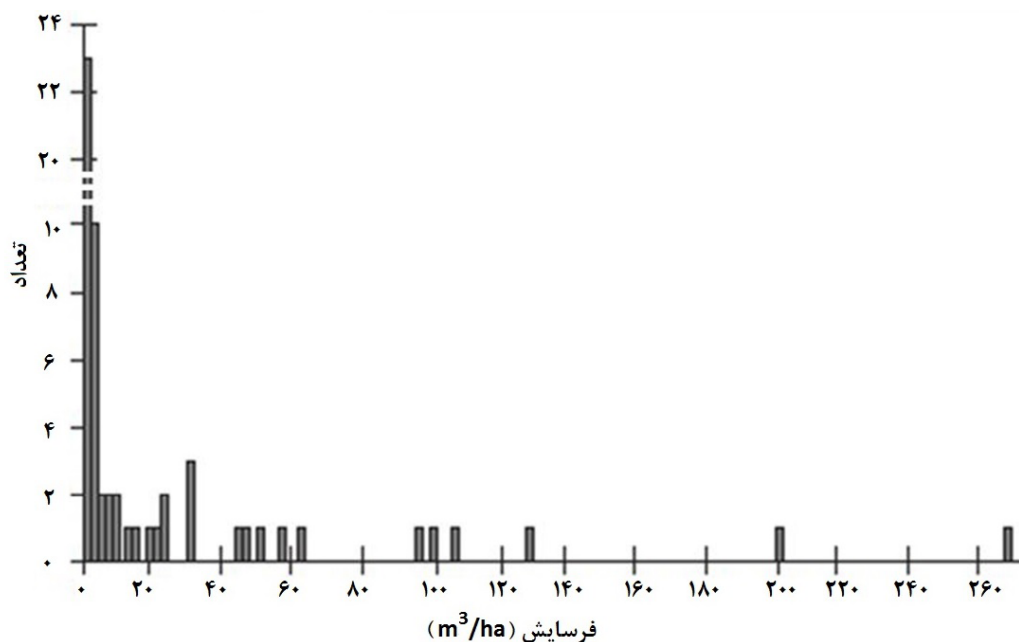
با اندازه‌گیری تغییرات زمانی مقادیر رسوب خارج شده از انتهای کرت‌های فرسایش تحت شرایط باران‌های طبیعی و شبیه‌سازی، اطلاعات با ارزشی تولید می‌شود. یکی از مهم‌ترین استفاده این داده‌ها، برآورد نرخ تلفات خاک در شرایط خاص مورد مطالعه است. برای رسیدن به یک میانگین قابل اعتماد از نرخ فرسایش در شرایط طبیعی، جمع‌آوری داده‌های طولانی‌مدت ضرورت دارد که خود نیازمند صرف وقت و سرمایه زیادی است. در این مقاله، نقش رویدادهای حداکثر در تلفات خاک کرت و تولید رسوب حوضه‌ها با ذکر مثال‌های متعدد از مناطق مختلف جهان و ایران تشریح شده است. بر اساس منابع مرور شده، دو رویکرد مختلف برای رسیدن به برآورد قابل اعتمادی از فرسایش متوسط سالانه با اندازه‌گیری محدود وجود دارد. در رویکرد اول که تکیه بر بزرگترین رویدادهای فرسایش و تولید رسوب است ملاحظه شد که در اکثر مناطق جهان مجموع چند رویداد حداکثر، سهمی در حدود ۵۰ درصد در تلفات خاک یا حمل رسوب دارند. در رویکرد دوم که بر احتمال وقوع رویدادها اتکا دارد، دو راهبرد استفاده از روش‌های نمونه‌گیری آماری در برداشت نمونه و اندازه‌گیری رویدادهای با دوره بازگشت معین بالا تشریح شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: احتمال وقوع، رویدادهای حداکثر، کرت فرسایش، کمبود داده، میانگین سالانه فرسایش.

۱- استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری. تهران. صندوق پستی ۱۳۴۴۵-۱۱۳۶. ایمیل: arabkhedri@scwmri.ac.ir

جدول ۱- تعداد و مقدار بارندگی تبدیل شده به رواناب در یک دوره ۱۲ ساله در روی خاک‌های لسی منطقه Tang-shan چین (Zachar, [۲۶] به نقل از Zaslavskii)

مقدار بارش در هر رویداد (mm)	تعداد کل رویداد در ۱۲ سال	تعداد رویداد منجر به رواناب سطحی	درصد رویداد منجر به رواناب سطحی
<5	367	3	0.8
10-5	142	12	8.4
20-10	118	25	21.2
30-20	45	18	40.0
40-30	22	12	54.5
50-40	7	5	71.4
100-50	6	5	83.3
>100	1	1	100
جمع	709	81	4/11



شکل ۱) توزیع فراوانی فرسایش سالانه اندازه‌گیری شده در اراضی زراعی انگلستان و ولز (Morgan, [۱۹] به نقل از McHugh)

کرت‌ها وجود دارد. از آنجا که طول دوره آماری موجود از کرت‌های فرسایش در کشور ما کوتاه است، سوالی که وجود دارد این است که چگونه می‌توان از اندازه‌گیری محدود به برآورد قابل اعتمادی از فرسایش متوسط سالانه دست یافت. دو رویکرد مختلف برای حل این موضوع تاکنون ارائه شده که در این مقاله تشریح می‌شوند.

تکیه بر بزرگترین رویدادهای فرسایش و تولید رسوب

اصولاً، مقدار فرسایش اندازه‌گیری شده چه به صورت رویدادی و چه به صورت سال به سال، از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کند و چولگی زیادی به سمت مقادیر کم دارد که با دو مثال تشریح می‌شود. شکل ۱) توزیع فراوانی فرسایش سالانه، اندازه‌گیری شده در اراضی زراعی انگلستان و ولز و جدول ۲) توزیع فراوانی داده‌های مربوط

وضعیت فرسایش در مراتع طبیعی باشد. این موضوع، چگونگی تعمیم نتایج حاصل از اندازه‌گیری به سطوح بزرگ‌تر و کوچک‌تر^۱ و مناطق مشابه را پیچیده‌تر می‌کند (Boardman, [۸]). به عنوان نتیجه می‌توان گفت که فرآیندهای فرسایش و عوامل مؤثر بر آن، به مقیاس مطالعه وابسته هستند. مد نظر قرار دادن این موضوع، می‌تواند در درک مسائل پایه‌ای و اساسی فرسایش مؤثر باشد. با استفاده از آن، امکان بررسی مسایل مربوط به یک رویداد استثنایی در کرت فرسایش تا فرسایش درازمدت در سطح یک قاره فراهم می‌شود (Kirkby; [۱۵]).

با توجه به توضیحات فوق، زمینه‌های بسیار متنوعی در خصوص تحلیل صحیح داده‌های فرسایش جمع‌آوری شده با استفاده از

1- Upscaling and downscaling

جدول ۲- مثالی از اثر فراوانی و شدت بارندگی بر فرسایش در Zanesville اوهایو آمریکا (Morgan, ۱۹۹۱) به نقل از (Fornier)

حداکثر شدت ۵ دقیقه‌ای (mm/hr)	تعداد بارندگی‌ها	متوسط فرسایش در هر رویداد (kg/m ²)
0- 4.25	40	0.37
25.5-50.8	61	0.60
50.9-76.2	40	1.18
76.3-101.6	19	1.14
101.7-127.0	13	3.42
127.1-152.4	4	3.63
152.5-177.8	5	3.87
177.9-254.0	1	4.79

جدول ۳ (خلاصه آمار تلفات خاک از کرت‌های ۳/۲ در ۲۷/۴ متر در شهر Kingdom ایالت میسوری در رویدادها (Lane, ۱۹۶۱) بر اساس داده های Hjelmfelt و همکاران)

سری داده	تعداد رویداد	کل تلفات خاک (t/ha)	درصد از کل تلفات خاک	درصد رویدادها
کل رگبارها	513	285	100	100
>۲ t/ha تلفات خاک ^۱	33	187	66	6.4
>۴ t/ha تلفات خاک	20	147	52	9/3
>۸ t/ha تلفات خاک	6	68	24	1.2
بزرگترین رگبار ^۲	1	14.85	5.2	0.2

به ۱۸۳ رویداد بارندگی در Zanesville اوهایو آمریکا بین سال‌های ۱۹۳۴ تا ۱۹۴۲ که بر حسب حداکثر شدت بارندگی ۵ دقیقه‌ای مرتب شده‌اند را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۱)، بیش از نیمی از محل‌های اندازه‌گیری، نرخ فرسایش در دو دسته اول (فرسایش کمتر از چهار متر مکعب در هکتار سال) قرار دارد. در جدول (۲) نیز مجموع رویدادهای دسته اول و دوم (با فرسایش کمتر از یک کیلوگرم در متر مربع) که در متوسط فرسایش اثری کم دارند، به تنهایی بیش از نصف کل رویدادهای گزارش شده است. در این جدول، تعداد رویدادهای دسته اول کمتر از دسته دوم است که منطقی به نظر نمی‌رسد و به احتمال زیاد رویدادهای بارندگی بسیار کم شدت که رواناب نداشته‌اند در آن ملحوظ نشده است.

با بررسی دقیق‌تر ارقام جدول (۲)، ملاحظه می‌شود که تعداد زیادی رویدادهای با شدت متوسط (۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت) و تعداد محدودی رویدادهای شدید (بیش از ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت) به طور مشترک بر متوسط فرسایش تاثیر می‌گذارند. بر خلاف این مورد، Lane [۱۶] به نقل از Hjelmfelt و همکاران جدول (۳) که حاصل ۳۷ سال نمونه‌برداری از تکرارهای کرت‌های فرسایش به ابعاد ۳/۲ در ۲۷/۴ متر با شخم متداول و محصول ذرت در شهر Kingdom ایالت میسوری می‌باشد را گزارش کرده است. ملاحظه می‌شود که ۲۷ رویداد حداکثر (حدود ۵/۳ درصد تعداد بارندگی‌ها)، مجموعاً مسئول انتقال ۵۲ درصد از رسوب می‌باشد.

برخی از پژوهشگران به تحلیل مجموعه داده‌های چندین ایستگاه پرداخته‌اند که موید نقش بالای رویدادهای شدید در فرسایش است. مثلاً Wischmeier [۲۵] بر اساس تحلیل داده‌های حاصل از تعداد زیادی کرت‌های فرسایش طبیعی اظهار می‌دارد که ۷۵ درصد از کل تلفات خاک سالانه، ناشی از چهار رگبار بزرگ رخ داده در همان سال است. اخیراً Gonzalez-Hidalgo و همکاران [۱۳] داده‌های طولانی مدت کرت‌های فرسایش USLE آمریکا (۴۴۵۲۸

روز اندازه‌گیری از ۵۹۴ کرت در ۳۵ ایستگاه در یک دوره ۴۱ ساله) که در ۴ منطقه مختلف جغرافیایی آن کشور قابل طبقه‌بندی بودند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی نشان داد که برای ۵۸ رویداد مشترک در کلیه ایستگاه‌ها سهم ۵ رویداد حداکثر، ۴۷ درصد در منطقه جنوب شرقی، ۴۹ درصد در منطقه جنوب، ۵۱ درصد در منطقه نیوانگلند-نورس آتلانتیک و ۵۰ درصد در منطقه میدوست-نورس است که بسیار به هم نزدیک است.

۱- کل تلفات خاک ۳۷ ساله ۲۸۵ تن بر هکتار است. بنابراین تلفات خاک متوسط سالانه ۷/۷ تن بر هکتار در سال می‌شود.

۲- منظور رگباری است که تلفات خاک آن بیش از ۲ تن بر هکتار است. به طور مشابه برای ۴ و ۸ تن بر هکتار.

۳- بزرگترین رگبار در مدت ۳۷ سال آماربرداری در June ۱۹۷۰ رخ داده است.

بررسی سهم انتقال رسوب در مقیاس حوضه آبخیز نیز نتایج مشابهی را نشان می‌دهد. Morgan [۱۹] نمونه جالبی در مورد اهمیت وقایع استثنایی بر فرسایش را از Edwards و Owens نقل کرده است. این محققین با بررسی ۲۸ سال آمار نه آبخیز کوچک با تناوب کشت ذرت-گندم-گراس-گراس در Coshocton اوهایو مشخص کردند که از میان تمام رویدادهای رخ داده، سه واقعه بزرگ‌تر (هر سه با دوره بازگشت ۱۰۰ سال و بیش‌تر)، ۵۲ درصد از فرسایش و ۹۲ درصد از تلفات خاک را سهم داشته‌اند. عرب‌خدری و همکاران [۵] با بررسی سهم دهک‌های احتمال وقوع جریان در حمل رسوب هفت رودخانه در ایران، اهمیت رویدادهای شدیدتر را نشان دادند. در جدول (۴) سهم رسوب حمل شده به تفکیک دهک‌ها برای دو ایستگاه سیرا و رودک (به ترتیب روی رودخانه کرج و لتیان هر دو با ۴۰ سال آمار) آمده است. ملاحظه می‌شود که با حرکت به طرف دهک‌های بالاتر احتمال وقوع، مقدار رسوب حمل شده به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد. در نگاهی کلی، عامل انتقال بیش از ۹۲

جدول ۴- سهم رسوب حمل شده در دهک‌های احتمال وقوع جریان در دو ایستگاه رودک و سیرا (عرب‌خدردی و همکاران، [۵])

رسوب تجمعی (%)		سهم از رسوب حمل شده (%)		دبی متناظر با احتمال حداقل (m ³ /s)		حدود دسته‌های احتمال	
سیرا	رودک	سیرا	رودک	سیرا	رودک	حد بالا	حد پایین
0.30	0.07	0.30	0.07	0.30	0.10	10	0.005
0.74	0.20	0.45	0.13	3.70	2.19	20	10
1.31	0.37	0.57	0.18	4.25	2.52	30	20
2.07	0.63	0.76	0.26	4.81	2.92	40	30
3.12	1.01	1.05	0.38	5.51	3.39	50	40
4.80	1.63	1.69	0.62	6.70	4.06	60	50
8.17	2.86	3.37	1.23	8.89	5.07	70	60
16.20	6.55	8.03	3.69	13.32	7.28	80	70
35.59	20.19	19.39	13.64	20.10	12.40	90	80
100.00	100.00	64.41	79.81	30.40	19.78	99.995	90

بزرگ‌تر، سه سیل بزرگ‌تر و چهار سیل بزرگ‌تر انتقال می‌یابد. انجام چنین بررسی‌هایی نقش رویدادهای استثنایی در طولانی مدت را نیز روشن می‌کند. Fang و همکاران [۱۰] نیز در حوضه کوچک ۱۶/۷ کیلومتر مربعی Wangjiaqiao چین که دارای اندازه‌گیری مداوم به مدت ۱۶ سال آبی است، به بررسی سهم رویدادهای سیلابی بر حمل رسوب پرداخت. ملاحظه شد که ۲۰۵ رویداد بارندگی-رواناب در این مدت وجود دارد که از این میان ۱۰ رویداد بزرگ‌تر به تنهایی مسئول ۸۳/۳ درصد از کل رسوب می‌باشد. دلیل این موضوع ضریب رواناب بالاتر و غلظت بیشتر رسوب ذکر شده است که احتمالاً ناشی از حمل مجدد نهشته‌های مربوط به رویدادهای پیشین و فروریزش دیواره رودخانه می‌باشد.

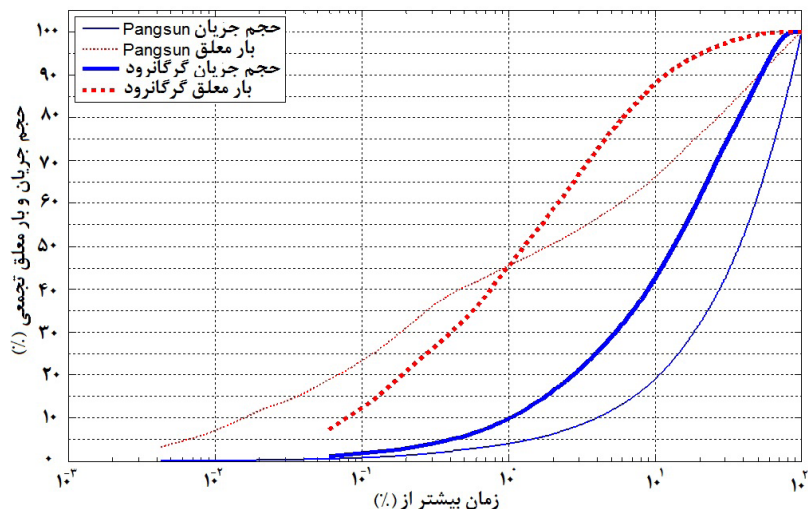
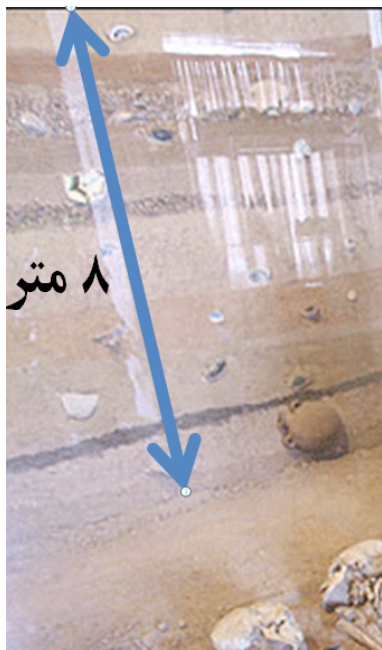
Gonzalez-Hidalgo و همکاران [۱۲] با تحلیل بالغ بر ۲/۵ میلیون داده روزانه رسوب ۱۴۸۳ ایستگاه به تفکیک مناطق هیدرولوژیک آمریکا مشاهده کردند که به طور متوسط مجموع رسوب ۲۵ روز حداکثر در کل دوره اندازه‌گیری، سهمی بیش از ۵۰ درصد در حمل رسوب دارد. در منطقه هیدرولوژیک کالیفرنیا که اقلیمی شبیه مدیترانه‌ای دارد، سه روز حداکثر، سهمی معادل ۳۸ درصد، ۱۰ روز حداکثر، سهمی معادل ۶۱ درصد و ۲۵ روز حداکثر، سهمی معادل ۷۶ درصد از کل رسوب را به عهده داشتند. بررسی این محققین نشان داد که در حوضه‌های کوچک (< 100km²) سهم روزهای حداکثر در حمل رسوب مستقل از منطقه هیدرولوژیک است.

بخش قابل توجهی از داده‌های اندازه‌گیری شده از فرسایش در کرت‌ها و رسوب رودخانه‌ها در ایران و جهان کم‌تر از نیم‌قرن تداوم داشته‌اند و داده‌های طولانی‌مدت‌تر نظیر صد تا هزار سال از تلفات خاک کرت‌های فرسایش و یا رسوبدهی در دسترس نیست. علاوه بر این داده‌ها، شواهدی دیگر مبنی بر نقش رویدادهای حداکثری در فرسایش و تولید رسوب وجود دارد. یک راه مناسب برای ارزیابی

درصد رسوب در هر دو ایستگاه به دو یا سه دهک بالای جریان مربوط است. در مقابل، دهک‌های پایین جریان، رسوب قابل توجهی را انتقال نمی‌دهند و انتظار می‌رود جریان نسبتاً صاف و زلالی داشته باشد. به این ترتیب، می‌توان نتیجه گرفت که با تمرکز روی رسوب دبی‌های بالا و به طور خاص بالاترین دهک احتمال وقوع جریان، بهتر می‌توان به تحلیل روند پرداخت. البته مشخص شدن اهمیت نقش دهک‌های بالای جریان در انتقال بار معلق، الزاماً به معنی نقش یک یا دو دبی استثنایی نیست. حد پایین دهک دبی‌های موثر (جدول ۴؛ ستون‌های ۳ و ۴) هر دو ایستگاه چند برابر کوچک‌تر از دبی حداکثر روزانه ثبت شده مربوط به همان حوضه می‌باشد. نتیجه قابل توجه دیگر این بود که با افزایش مساحت حوضه‌ها سهم دهک‌های بالا در حمل رسوب کاسته می‌شد.

شکل (۲) منحنی‌های تداوم جریان و رسوب ایستگاه قزاقلی روی گرگانرود با مساحت حوضه بالغ بر ۷۰۰۰ کیلومتر مربع واقع در شمال شرقی ایران و ایستگاه هیدرومتری مستقر در خروجی حوضه کوچک Sg. Pangsun با مساحت ۲/۶ کیلومتر مربع واقع در استان Selangor کشور مالزی را نشان می‌دهد. برای ترسیم این منحنی‌ها از داده‌های مداوم رسوب استفاده شده که در مورد اولی ۵ سال به‌صورت روزانه و در مورد دومی ۸ ماه هر ۱۵ دقیقه می‌باشد. این شکل نشان می‌دهد که در یک‌درصد زمان بین ۴ تا ۱۰ درصد از جریان و ۴۵ درصد از رسوب حمل شده است. در گرگانرود، ۹۰ درصد رسوب و در Sg. Pangsun، ۶۵ درصد از کل رسوب در ۱۰ درصد از زمان منتقل شده‌اند (Arabkhedri, [۷]).

Markus و Demissie [۱۷] نقش چهار سیلاب بزرگ سالانه را در حمل رسوب ۲۷ رودخانه کوچک و متوسط در ایلینویز آمریکا بررسی کردند. ملاحظه شد که به طور متوسط ۳۲، ۴۹، ۶۱ و ۶۸ درصد از کل رسوب سالانه به ترتیب توسط بزرگ‌ترین سیل، دو سیل



شکل ۲- منحنی تداوم جریان و رسوب در دو حوضه Sg. Pangsun و گرگانود (Arabkhedri، [۷])

شکل ۳- لایه‌های آبرفتی شبیه‌سازی شده محل کشف اسکلت‌های سه هزار ساله در موزه آذربایجان (عکس از خبرگزاری مهر)

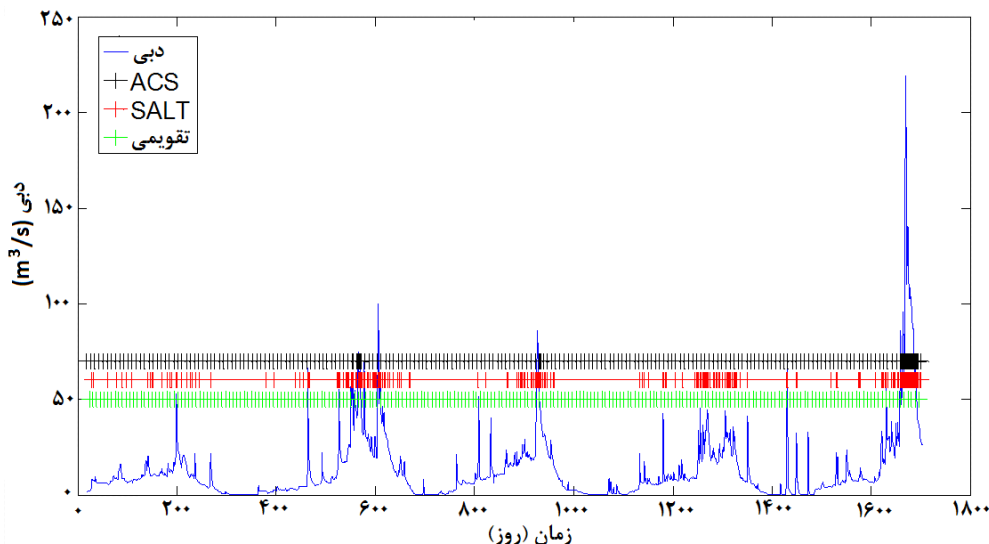
بر روی زیرحوضه ۶۳۵۰ هکتاری صلوات‌آباد از سرشاخه‌های رودخانه قشلاق را گزارش کرده است. در اثر این باران که در مورخ ۱۳۸۴/۸/۲۱ رخ داد، سیلی بزرگ به وقوع پیوست و با فرسایش شدید به تولید رسوب ویژه برابر ۸۵ تن در هکتار منجر شد. به عنوان جمع‌بندی مبحث تکیه بر بزرگ‌ترین رویدادها در برآورد نرخ متوسط فرسایش، دو دیدگاه کاملاً متضاد در مورد اثر رویدادهای شدید و معمول بر فرسایش وجود دارد: یک دیدگاه به اثر بیش‌تر رویدادهای استثنایی بر فرسایش و تولید رسوب تاکید می‌کند (اکثر نمونه‌های ارایه شده فوق) و دیدگاه دیگر در مقابل، اثر باران‌های متوسط را که در هر سال چند بار رخ می‌دهد را بیش‌تر می‌داند (جدول ۲). به عقیده Zachar [۲۶] و Gonzalez-Hidalgo و همکاران [۱۲] این موضوع تابعی از اقلیم است. به طوری که در مناطقی با اقلیم معتدل اقیانوسی (تغییرات دما نسبتاً کم) به دلیل غلبه رویدادهای معمولی، فرسایش و تولید رسوب بیش‌تر از رویدادهای متوسط تاثیر می‌پذیرد. در این مناطق، سطح زمین در اثر فرسایش، سیمایی مدور به خود می‌گیرد. در مقایسه، در اقلیم خشک و مدیترانه‌ای، به دلیل اهمیت رویدادهای شدید، فرسایش و تولید رسوب بیش‌تر از رویدادهای حداکثر تاثیر می‌پذیرد که نتیجه آن چهره فرسایشی دندانه‌دار ارتفاعات می‌باشد.

استفاده از مفهوم احتمال وقوع

از میان عوامل موثر بر فرسایش آبی، داده‌های بارندگی و رواناب

روند تغییرات در جریان رسوب (و تعیین سهم رویدادهای حداکثر)، بررسی لایه‌های رسوب نهشته شده در مخروط افکنه‌ها، دریاچه‌ها و دلتای رودخانه‌ها در یک مقیاس زمانی است. به این منظور اطلاع از سن لایه‌های رسوبی ضرورت دارد. مثالی از شدت فرسایش و رسوبگذاری در ایران، عمق هشت متری قبور سه هزار ساله کشف شده در محوطه مسجد کبود تبریز است. نمونه‌هایی از اسکلت مردگان به موزه انتقال یافته و لایه‌های آبرفتی ریز و درشتی که در گذر زمان آن را پوشانیده، در موزه تبریز شبیه‌سازی شده است (شکل ۳). اگر عمق تدفین دو متر در نظر گرفته شود، رسوبگذاری بیش از شش متر طی سه هزار سال (میانگین دو میلی‌متر در سال)، حکایت از وضعیت حاد فرسایش و رسوبگذاری مرتبط با رویدادهای حداکثری (حدود ۸ لایه اصلی در ۶ متر فوقانی) در شرایط مناطق نیمه خشک کشور دارد.

نمونه‌هایی از رخداد بارندگی‌های شدید و غیر معمول گزارش شده در سال‌های اخیر حکایت از تداوم اهمیت چنین پدیده‌هایی در تغییر شکل زمین دارد. مثلاً ملکوتی و نوروزی [۶]، نزول ۲۱ میلی‌متر باران در ۵ دقیقه در مورخ ۱۳۶۲/۲/۲۸ در ایستگاه سد امیرکبیر (شدت تقریبی ۲۵۰ میلی‌متر بر ساعت) که به سیل مخربی در حوزه فرعی ۳۱۰۰ هکتاری مشرف به مخزن سد منجر شده و فرسایش و تخریب زیادی نیز در پی داشته است را به طور مفصل شرح داده‌اند. در نمونه‌ای دیگر، خالدیان [۱] بارندگی ۴۵/۳ میلی‌متری در مدت نیم‌ساعت (شدت تقریبی ۹۰ میلی‌متر بر ساعت)



شکل ۴- الگوی نمونه برداری سه روش ACS، SALT و روش تقویمی (عرب خدری، [۴])

که حاکی از تمرکز بیش تر نمونه برداری از دبی های بالا با دو روش ACS و SALT است. در جدول (۵) برآوردهای سه روش در این ایستگاه با مقدار واقعی برآمده از ۱۸۰۰ مشاهده مقایسه شده است که حاکی از مزیت مطلق دو روش ACS و SALT در مقایسه با برآورد بدست آمده از روش متداول (تلفیق منحنی منحنی سنج رسوب متکی به نمونه های تقویمی با دبی جریان روزانه) است (عرب خدری، [۴]). استفاده از این روش های آماری نیازمند نصب تجهیزات نمونه گیری هوشمند در محل ایستگاه اندازه گیری است. به نظر می رسد که این روش ها برای کرت های فرسایش نیز مناسب باشد.

در راهبرد دیگر، تعدادی از محققین تلاش کرده اند از مفهوم احتمال وقوع و دوره بازگشت رویدادها برای به دست آوردن برآورد واقعی تری از میانگین استفاده کنند. Simons و Senturk [۲۱] رابطه ای برای محاسبه رسوبدهی متوسط بر اساس برآوردهای حاصل از MUSLE ارائه داده اند. پس از مشخص کردن مقدار حجم جریان و رسوبدهی برای رگبارهایی با دوره بازگشت ۲، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال، با ضرب هر یک از آنها در احتمال افزایشی مربوطه، مقادیر به صورت وزنی در آمده و سپس مقدار رسوبدهی متوسط سالانه محاسبه می شود.

$$A_s = \frac{Q_a(0.01 Y_{s100} + 0.01 Y_{s50} + 0.02 Y_{s25} + 0.06 Y_{s10} + 0.4 Y_{s2})}{0.01 Q_{v100} + 0.01 Q_{v50} + 0.02 Q_{v25} + 0.06 Q_{v10} + 0.4 Q_{v2}} \quad (1)$$

که در آن A_s رسوبدهی سالانه بر حسب تن، Q_a متوسط آبدهی سالانه بر حسب متر مکعب، Y_s و Q_v به ترتیب معادل رسوبدهی (تن) و آبدهی (متر مکعب) هیدروگراف های سیل با دوره بازگشت مختلف اشاره شده در معادله مذکور می باشد.

این معادله در ترکیب با برآوردهای روش MUSLE توسط سرخوش و همکاران [۲]، Canbazoglu و Gogus [۹] و Oguz [۲۰] در تعدادی آبخیز به کار رفته اند.

پدیده های تصادفی^۱ محسوب می شوند و آن ها را می توان از نظر فراوانی و احتمال وقوع تحلیل کرد. به تبع این دو عامل فرساینده، به واسطه تاثیر سایر عوامل (به ویژه پوشش)، فرسایش نیز به صورت تصادفی رخ می دهد. بررسی مشخصات آماری این متغیرها به منظور شناخت علمی آنها ضروری است. اصولاً، دوره آماری طولانی تری در مقایسه با پارامترهای هواشناسی و دبی برای رسیدن به متوسط قابل اعتماد فرسایش / رسوب ضروری است. همچنین، در حرکت از اقلیم مرطوب به خشک نیز دوره مورد نیاز طولی تر می شود (عرب خدری، [۳]). دو راهبرد در این زمینه وجود دارد.

راهبرد اول متکی به احتمال وقوع، استفاده از طرح های آمارگیری نمونه ای است. دو روش آمارگیری نمونه ای برای اندازه گیری رسوب پیشنهاد شده است. روش اول که "انتخاب در زمان فهرست کردن" (SALT) نامیده می شود مبتنی بر طرح نمونه گیری احتمال متناسب با اندازه^۲ است (Thomas، [۲۲]). روش دوم "نمونه گیری سازوار خوشه ای" (ACS)^۳ نامیده می شود که برای جوامع خوشه ای نادر^۴ (از قبیل رسوب معلق) مناسب هستند (Thompson، [۲۳]). هر دو روش مذکور دارای برآوردهای^۵ مخصوص به خود هستند که در Arabkhedri [۷] معرفی شده اند. با استفاده از این دو روش نمونه گیری آماری، با برداشت تعداد کم تری نمونه در مقایسه با روش نمونه گیری تقویمی (به عنوان روش پایه آماری) می توان به نتایج صحیح تری دست یافت. در شکل (۴) شمایی از برداشت ۲۵۰ نمونه از جامعه ۱۸۰۰ تایی داده های روزانه مشاهداتی ایستگاه قزاقلی روی گرگانرود به سه روش ACS، SALT و تقویمی مقایسه شده است

- 1- Stochastic
- 2- Selection At List Time
- 3- Probability proportion to size
- 4- Adaptive Cluster Sampling
- 5- Rare clustered population
- 6- Estimator

7- Incremental probability

جدول ۵) خلاصه نتایج ۵۰ برآورد رسوبدهی معلق به سه روش مختلف با تکرار نمونه‌گیری از ۱۸۰۰ نمونه برداشت شده در ۵ سال از ایستگاه فزاقلی روی گرگانرود (عرب‌خدری، [۴])

روش برآورد	میانگین برآورد (تن)	انحراف از معیار (تن)	متوسط درصد خطا نسبت به مقدار مشاهده‌ای	ضریب تغییرات (%)	مجذور مربعات خطای نرمال شده
روش متداول*	2982137	60568	- 76	2	0.76
SALT	12035096	1605437	- 4	13	0.13
ACS	11952291	1307695	- 4	11	0.11

* تلفیق منحنی سنج رسوب متکی به نمونه‌های تقویمی با دبی جریان روزانه

جدول ۶- فرسایش شبیه‌سازی شده رگبار ۱۰ ساله و متوسط سالانه در خاک‌های منطقه Mid-Wales بر حسب Morgan (t/ha [۱۸])

اجتماع خاک و شرح آن		تلفات خاک برای رگبار با دوره بازگشت ۱۰ ساله				متوسط سالانه تلفات خاک	
چرای کم	چرای بی رویه	چرای کم	چرای بی رویه	چرای کم	چرای بی رویه	میانگین	محدوده
میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	محدوده
0.00	-	1.12	0.96	0.001	0.000- 0.003	1.88	0.06- 4.10
0.00	-	1.41	1.01	0.002	0.000 -0.005	2.44	0.32- 4.95
0.00	-	16.43	13.35	0.006	~0.02- 0.03	10.07	0.33- 19.80
0.23	0.68	0.41	2.22	0.11	~0.03- 0.46	0.95	~2.02- 3.92

با هر دوره بازگشت محاسبه شد. Morgan [۱۸] بدون توضیح جزئیات روش، بیان می‌کند که از جمع‌بندی کل مقادیر به دست آمده برای دوره‌های بازگشت مختلف با توجه به فراوانی وقایع، نرخ فرسایش متوسط سالانه محاسبه می‌شود. در زیر یک نمونه از جدول ارائه شده برای فرسایش شبیه‌سازی رگبار ۱۰ ساله و متوسط سالانه ارائه می‌شود (جدول ۶). در این جدول، فرسایش متوسط سالانه و محدوده فرسایش بر اساس مقادیر رویدادهای منفرد و انحراف معیار آن‌ها برآورد شده است.

به‌طور خلاصه می‌توان گفت که در مبحث احتمال وقوع، دو راهبرد استفاده از روش‌های آمارگیری نمونه‌ای و تکیه به رویدادهای با دوره‌بازگشت معین مطرح است. دو روش آمارگیری نمونه‌ای SALT و ACS قابلیت به کارگیری در ایستگاه‌های رسوب‌سنجی را دارد و با تعداد کم‌تری نمونه‌گیری نسبت به روش تقویمی، سبب بالا رفتن صحت و دقت برآورد رسوب سالانه می‌شود. امکان استفاده از این روش‌ها در نمونه‌گیری کرت‌های بزرگ فرسایش وجود دارد. دو مثال نیز از تکیه بر تعیین رسوب / فرسایش با دوره‌های بازگشت مختلف برای برآورد مقادیر متوسط سالانه ارائه شد. متاسفانه مبنای نظری استفاده از این روش‌ها در منابع به خوبی تشریح نشده است.

Morgan [۱۸] در قالب پروژه تحقیقاتی "تحلیل داده‌های فرسایش اراضی بالادست" (مراجع انگلستان و ولز، با هدف تهیه تصویری از وضعیت فرسایش مناطق مورد بررسی، روشی را برای برون‌یابی نتایج مطالعات نقطه‌ای به اراضی وسیع ارائه داده است. در این ارتباط، اراضی به تعدادی واحدهای نسبتاً یکنواخت از نظر خاک-منظر تقسیم شدند و مدل اروپایی فرسایش خاک (EUROSEM) در توپوسکانس‌های^۱ معرف و شاخص به کار برده شد. پس از تقسیم اراضی به توپوسکانس‌ها، با استفاده از شبیه‌ساز، باران‌هایی با دوره بازگشت ۰/۵، ۱، ۲، ۵، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ سال را روی مراتع با چرای کم و چرای بیش از حد در ۱۰ تکرار تولید و فرسایش خاک را بررسی کردند. برای هر دوره بازگشت، باران یک‌ساعته‌ای (متناسب از نظر مقدار بارندگی) با ده دقیقه اوج بارندگی (متناسب از نظر شدت) تولید شد. بارندگی اوج ۱۰ دقیقه‌ای در سه حالت مختلف مشتمل بر ابتدا، وسط و انتهای یک ساعت در نظر گرفته شد. تعداد ۱۰ مورد شبیه‌سازی برای هر دوره بازگشت با تغییر تصادفی نوع بارندگی، شیب دامنه، فرسایش‌پذیری خاک و زبری سطحی انجام گرفت. از نتایج، متوسط و انحراف معیار مرتبط

1- Toposequences

جدول ۷- محاسبه احتمال آنکه یک برنامه پایشی N ساله، رویدادی با دوره بازگشت T سال را شامل شود (Lane [۱۶])

دوره بازگشت T (سال)		طول دوره پایش N (سال)				
	1	2	10	20	50	100
2	0.5	0.75	0.999	~1	~1	~1
5	0.2	0.36	0.693	0.988	~1	~1
10	0.1	0.19	0.651	0.878	0.995	~1
25	0.04	0.078	0.335	0.558	0.870	0.983
50	0.02	0.080	0.183	0.332	0.636	0.867
100	0.01	0.020	0.096	0.182	0.395	0.634

جمع بندی و نتیجه گیری

به طور کلی در مدل کردن داده‌های اندازه‌گیری شده برای تعیین نرخ واقعی فرسایش باید به محدودیت‌های تغییرات زمانی و مکانی شدید این متغیر و تفاوت شرایط اندازه‌گیری توجه شود. از بهترین مدل نیز نمی‌توان انتظار داشت که بتواند برآوردی را بهتر از تغییرات تصادفی یا طبیعی موجود در داده‌های مشاهداتی انجام بدهد (Toy و همکاران، [۲۴]).

به رغم شناخت اهمیت رویدادهای حداکثری در فرسایش (و در نتیجه فرسایش)، گاهی استثنایی بودن اثر برخی از بارندگی‌های شدید مانع از استفاده از آن شده است. مثلاً در تهیه نقشه فرسایش آمریکا مربوط به مدل RUSLE2، ایستگاه‌هایی با آمار بارندگی حداقل ۱۵ سال تا ۲۰-۳۰ سال مورد استفاده قرار گرفته است. در تهیه این نقشه، رگبارهایی با دوره بازگشت بیش از ۵۰ سال منظور نشدند زیرا به طور معنی‌داری سبب به هم ریختگی میانگین فرسایش سالانه می‌شد (Foster و همکاران، [۱۱]). موارد این چنینی با موضوع اهمیت رویدادهای حداکثری متناقض است.

ملاحظه شد که داده‌های با دوره بازگشت بالا سهم قابل توجهی در رسیدن به متوسط واقعی دارند. سوالی که وجود دارد این است که اگر قرار باشد با جمع‌آوری داده از کرت‌های طبیعی، متوسط واقعی بلندمدت به دست آید، چه مدت داده لازم است؟ Lane [۱۶] به نقل از Rao و Hamed جدول (۷) را برای رسیدن به جواب این سوال ارائه کرده است. به عنوان مثال، با پایش ۱۰ ساله، احتمال وقوع یک رویداد ۵۰ ساله، ۱۸ درصد است. همچنین، برای آنکه به احتمال حدود ۹۰ درصد، رویداد ۱۰ ساله رخ دهد، دوره پایشی بیش از ۲۰ سال ضرورت دارد. نباید فراموش کرد که لازمه تفکیک رویدادهای حداکثر، اندازه‌گیری کلیه رویدادها است. به عبارت دیگر، فقط پس از اندازه‌گیری کلیه رویدادها، می‌توان وقایع حدی را شناسایی کرد. مگر آن‌که بتوان این‌گونه وقایع حدی فرسایش و رسوب را با تکیه به عوامل کمکی بارش، دبی جریان، گل‌آلودگی، ضخامت لایه رسوبگذاری و نظایر آن شناسایی کرد.

با توجه به توضیحات فوق، سه پیشنهاد ارائه می‌شود:

با توجه به شناخته بودن ارزش رویدادهای حداکثری، و کوتاه بودن آمار موجود، نتیجه هر ایستگاه و کرت به تنهایی معتبر به نظر نمی‌رسد. ممکن است با تلفیق منطقه‌ای آمار کوتاه بدون بعد شده حوضه‌ها و کرت‌ها و ضخامت لایه‌های محدود رسوبگذاری بندها، بتوان به صورت منطقه‌ای به سهم تعداد n رویداد حداکثر رسید و در مرحله بعد از آن برای برآورد منطقه‌ای نرخ متوسط فرسایش و رسوب استفاده کرد.

روش‌های نمونه‌گیری آماری SALT و ACS با توجه به اهمیت بیش‌تر رویدادهای حداکثری پیشنهاد شده‌اند. این شیوه‌ها قابلیت استفاده در تحقیقات فرسایش هنگامی که جمع‌آوری کل رواناب مقدور نیست، توصیه می‌شود. به این ترتیب با تعدادی نمونه محدود می‌توان به برآوردی معقول رسید.

روش دیگر استفاده از شبیه‌سازی برای برآورد نرخ فرسایش دوره‌های بازگشت مختلف است. پس از انجام این کار، با استفاده از رابطه Simons و Senturk (۱۹۹۲) می‌توان مقدار فرسایش متوسط سالانه را برآورد کرد. در این مسیر از مدل‌های رویدادی واسنجی شده می‌توان برای برآورد فرسایش دوره‌های بازگشت مختلف استفاده کرد. اصلاح ضرایب معادله رابطه مذکور با استفاده از اندازه‌گیری فرسایش و رواناب درازمدت نیز ضرورت دارد.

منابع مورد استفاده

۱. خالدیان، ح. ۱۳۸۴. بررسی فرسایش و رسوب ناشی از بارندگی مرداد ماه سال ۸۴ در حوزه آبخیز صلوات آباد و نایسر در حومه سنندج. مجموعه مقالات دومین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک. ۱۵۰۰-۱۴۹۴.
۲. سرخوش، ا.، ح. رفاهی، م. عرب خدری و م. پاک پرور. ۱۳۸۲. مقایسه و ارزیابی دو مدل MPSIAC و MUSLE در برآورد رسوبدهی حوزه آبخیز درکه در شمال تهران. مجله علوم کشاورزی ایران، جلد ۳۴، شماره ۳: ۷۳۳-۷۴۷.
۳. عرب خدری، محمود. ۱۳۹۳. مروری بر نرخ فرسایش آبی و تولید رسوب در ایران. ترویج و توسعه آبخیزداری. ۲ (۴): ۲۳-۳۰.

1- Distort

Meeting held May 24-29, 1999 at Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, 860-870.

16. Lane, L.J., 2007. The role of large storms in determining mean annual sediment yield. In: R.I. Barnhisel (Ed.), Proceedings of National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation, Gillette, WY, 30 Years of SMCRA and Beyond, June 2-7, 2007. Published by ASMR. 403-412.

17. Markus, M. and Demissie, M., 2006. Predictability of annual sediment loads based on flood events. *Journal of Hydrologic Engineering* 11(4): 354-361.

18. Morgan, R.P.C., 2003. Application of soil erosion modeling, Appendix H: Modelling upland erosion. http://randd.defra.gov.uk/Document.aspx?Document=SP0402_423_FRA.doc.

19. Morgan, R.P.C., 2005. *Soil Erosion and Conservation*, 3rd edition. Blackwell Publishing.

20. Oguz, I., 2012. Analyzing variation of sediment yields in wet and drought years. *Journal of Agricultural Sciences*. 18: 146-156.

21. Simons, D. B., and Senturk, F. 1992. *Sediment Transport Technology: Water and Sediment Dynamics*. Water Resources Publications.

22. Thomas, R. B. and Lewis, J., 1993. A comparison of selection at list time and time-stratified sampling for estimating suspended sediment loads. *Water Resources Research*. 29(4), 1247-1256.

23. Thompson, S. K., 1992. *Sampling*. Wiley, New York, 343 p.

24. Toy, T. J., Foster G. R. and Renard K. G. 2002. *Soil Erosion, Processes, Prediction, Measurement and Control*. John Wiley & Sons. Washington, D.C.

25. Wischmeier, W. H., 1962. Storms and soil conservation. *J. Soil and Water Conservation*, 17(2): 55-59.

26. Zachar, D., 1982. *Soil Erosion*. Elsevier, Amsterdam.

۴. عرب خدري، م. ۱۳۸۹. مقایسه چند روش آمارگیری نمونه‌ای در برآورد تولید رسوب رودخانه. مجموعه مقالات چهارمین همایش ملی فرسایش و رسوب. نور. ۸-۹ اردیبهشت ۱۳۸۹.

۵. عرب خدري، م. ک. صدارتی و ا. اسمعیلی ۱۳۹۳. بررسی روند تغییرات رسوب معلق در ایران. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی. شماره ثبت سازمان تحقیقات ترویج و آموزش کشاورزی ۴۴۳۱۰. ۱۰۸ص.

۶. ملکوتی، ع. و غ. نوروزی. ۱۳۶۲. تحلیلی بر سیل مورخ ۱۳۶۲/۲/۲۸ حوزه آبخیز سد کرج. دفتر حفاظت خاک و آبخیزداری سازمان جنگل‌ها و مراتع.

7. Arabkhedri, M., 2009. Sampling designs and estimation methods for sediment load prediction in two rivers in Iran and Malaysia. PhD Thesis, University Putra Malaysia. 236 p.

8. Boardman, J., 2006. Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. *Catena*, 68: 73-86.

9. Canbazoglu, M.K. and Gogus, M., 2004. Sediment yields of basins in the Western Black Sea Region of Turkey. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* 28: 355-367.

10. Fang, N-F, Shi, Z-H, Yue, B-J, Wang, L., 2013. The characteristics of extreme erosion events in a small mountainous watershed. *PLoS ONE* 8(10): e76610. doi:10.1371/journal.pone.0076610

11. Foster G.R., Yoder, D.C., Weesies, G.A., McCool, D.K. and McGregor, K.C., 2003. User's Guide Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 RUSLE2. USDA-Agricultural Research Service

12. Gonzalez-Hidalgo, J.C., Batalla, R., Cerda, A., de Luis, M., 2009. Contribution of largest events to sediment transport across USA. *Land Degradation and Development* 21: 83-91.

13. Gonzalez-Hidalgo, J.C., Batalla, R.J., Cerda A. and de Luis, M. 2012. A regional analysis of the effects of largest events on soil erosion. *Catena*, 95: 85-90.

14. Hudson, N.W., 1981. *Soil Conservation*. Batsford, London.

15. Kirkby, M.J., 2001. From plot to continent: Reconciling fine and coarse scale erosion models. In: D.E. Stott, R.H. Mohtar and Steinhardt, G.C. (Eds.), *Sustaining the Global Farm, Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization*

*Abstract*

The Possibility of Estimation of Long-Term Average Annual Erosion Based on Measurements of Erosion From a Few Rainfall Events

M. Arabkhedri¹

Received: 2014/12/22 Accepted: 2015/07/24

A lot of soil loss and sediment data have been measured at the end of erosion plots during recent decades under natural as well as simulated rainfall. As an important task, the rate of soil loss could be estimated using this kind of data. To achieve reliable average erosion, several years of record are necessary, which requires a lot of cost and time. In this article, the role of extreme events on plot soil loss and basin sediment load was explained by giving a few examples from Iran and the world. Based on the reviewed references, two different approaches were found in order to reach reliable average erosion rate in the absence of adequate data. In the first approach, which is based on the greatest erosion/ sediment events, it had been realized that the summation of a few events are responsible for about 50 percent of soil loss and sediment yield produced. The second approach is based on the probabilities and could be categorized into two strategies including a) application of sampling designs in field sampling and b) measuring only the yield of events with predefined high return periods.

Keywords: *Average annual erosion, Data insufficiency, Erosion plot, Maximum events, Occurrence probability*

1. Assistant Prof. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Tehran Iran. POBox: 13445-1136. Email: arabkhedri@scwmri.ac.ir