

بررسی میزان خطای منحنی های سنجه رسوب برای برآورد بار رسوبی وقایع سیلابی در رودخانه قره چای

جواد وروانی*، عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی اراک
شهرام خلیقی سیگارودی، عضو هیات علمی دانشگاه تهران

چکیده

برآورد رسوب دهی وقایع سیلابی و توزیع زمانی آن از چالش های مهم و اساسی در زمینه مدیریت رودخانه ها درحوزه های آبخیزی باشد از طرفی تحقیقات اندکی در زمینه درک رفتار رسوب دهی سیلابی و کاربرد منحنی های سنجه رسوب در جهت برآورد بار رسوبی وقایع سیلابی انجام شده است. به منظور بررسی میزان خطای حاصله از کاربرد منحنی های سنجه رسوب در برآورد بار رسوبی وقایع سیلابی، مقادیر برآوردی ۱۰ نوع منحنی سنجه رسوب با رسوب مشاهداتی در شاخه های صعودی و نزولی هیدروگراف چند واقعه سیلابی در ایستگاه هیدرومتری پل دوآب روی رودخانه قره چای استان مرکزی در طول ۴۹ درجه و ۲۱ دقیقه و عرض ۳۴ درجه و ۳ دقیقه مورد مقایسه قرار گرفت. با در نظر گرفتن شاخص های مختلف صحت و دقت آن ها مشخص گردید. در تمامی موارد منحنی های سنجه رسوب باعث برآورد کمتر از میزان واقعی از حداقل ۴۰ درصد تا حداکثر ۸۰ درصد می شوند. در این بین روش سازمان خوار و بار و کشاورزی جهانی نسبت به سایر روش ها عملکرد بهتری داشته و برآورد به نسبت نزدیک تری به مقدار واقعی به دست می دهد. به رغم کارایی موثر روش های حد وسط دسته ها و MVUE در برآورد بار رسوبی سالیانه این روش ها در برآورد بار رسوبی هیدروگراف سیل، غیر کار آمدی خود را نشان دادند.

واژه های کلیدی: رسوب دهی، منحنی سنجه رسوب، هیدروگراف سیل، MVUE، قره چای

مقدمه

بررسی های علمی در مورد انتقال رسوب معلق رودخانه ها بیش از ۱۰۰ سال است که انجام می شود (۲۱). به طوری که نخستین نمونه برداری از بار معلق رودخانه ها در سال ۱۸۴۵ میلادی در رودخانه می سی سی پی انجام شد. پس از آن در سال ۱۸۶۳ در رودخانه های سن و مارن فرانسه و در سال ۱۹۳۹ در رودخانه نیل صورت گرفت و به تدریج در سراسر جهان توسعه یافت (۲). گسترش فعالیت های اندازه گیری موازی با افزایش نیاز به اطلاعات در مورد بار معلق بوده است زیرا درک مسئله رسوب معلق رودخانه ها بخش مهمی از مدیریت منابع آب می باشد. به عنوان مثال اندازه گیری تغییرات بار معلق عامل مهمی در مطالعه و ارزیابی اثر برنامه های مبارزه با منابع آلوده کننده غیر نقطه ای می باشد. در برنامه های مدیریتی جدید درک رسوب معلق می تواند در تعیین مواد شیمیایی و انتقال آنها در اثر فعالیت های انسانی و در برنامه های قدیمی در ارزیابی نرخ پرشدن مخازن، مورد استفاده قرار می گیرد (۱، ۱۷ و ۱۰). ماهیت متغیر و پیچیده بار رسوبدهی رودخانه ها باعث شده است که برآورد میزان رسوب وارده به مخازن و تولید رسوب طولانی مدت برای تعیین عمر سازه ها، با مشکل رو به رو باشد.

روش های متعددی برای برآورد بار رسوب معلق رودخانه ها پیشنهاد شده است و این روش ها از جنبه های مختلف مورد بحث و بررسی قرار گرفته اند به طور کلی روش های برآورد بار رسوب معلق رودخانه ها به دو دسته تقسیم شده اند. دسته اول روش های مبتنی بر قوانین دینامیک و مکانیک سیالات که عموماً توسط متخصصان و صاحب نظران علم هیدرولیک ارائه شده است و دسته دوم روش های مبتنی بر اندازه گیری های مستقیم و تحلیل های آماری که بیشتر توسط متخصصین علم هیدرولوژی توصیه شده اند (۲). تقسیم بندی دیگری توسط پرستن و همکاران (۱۹۸۹) انجام شده است که به نظر تقسیم بندی جامع تری می باشد و در این تقسیم بندی، سه طبقه عمده از روش های هیدرولوژیکی دیده می شود که شامل برآورد کننده های میانگین^۱، برآورد کننده های نسبتی^۲ و برآورد کننده های رگرسیون^۳ می باشد. در هر طبقه، اصول آماری ویژه ای اجرا می شود و در صورتی که خصوصیات داده ها مشخص باشد می توان یکی از روش های مذکور را برای مطالعه و بررسی انتخاب نمود. برآورد کننده های رگرسیونی (منحنی های سنجه) در اغلب موارد به صورت لگاریتمی به کار برده می شوند زیرا توزیع مناسب غلظت و جریان توزیع لوگ نرمال دو متغیره می باشد در کاربرد منحنی های سنجه رسوب دو نوع اریب به مدل های رگرسیون خطی وارد می شود. اریب نوع اول مربوط به نوع روشی است که برای به دست آوردن معادله رگرسیون به کار می رود و اریب نوع دوم به علت تغییر حالت از لگاریتمی به

^۱ - Averaging Estimator

^۲ - Ratio Estimator

^۳ - Regression Estimator

حالت طبیعی حاصل می گردد. اریب نوع اول را می توان تا حدودی با کاربرد روش مناسب مانند حداقل مربعات که تا حدودی نا اریب می باشد، کاهش داد لیکن در مورد اریب نوع دوم بایستی یکسری تصحیحات مانند اضافه کردن متغیرهای مستقل اضافی به رابطه انجام داد. در یک تخمین نا اریب یک واحد برآورد بیش از حد واقعی^۱ با همان مقدار برآورد زیر میزان واقعی^۲ احتمال و شانس یکسانی دارد به طوری که نسبت برآورد زیر حد واقعی به برآورد بیش از حد واقعی آن برابر است. معمولی ترین روش ترسیم منحنی سنجه رسوب، گذراندن یک خط (یا بیش از یک خط) از بین ابر نقاط دبی جریان و دبی رسوب می باشد که تحت عنوان منحنی سنجه رسوب "یک خطی" نامیده می شود. علاوه بر این جانسون (۱۹۹۶)، پیشنهاد می کند دبی های جریان با یک مقدار افزایشی معین به تعدادی دسته تقسیم شده و برای دبی متوسط هر دسته میانگین رسوب دسته مذکور تعیین گردد و منحنی سنجه رسوب با استفاده از داده های جدید ترسیم گردد. این روش به نام منحنی سنجه رسوب "حد وسط دسته ها" نامیده میشود. جونز و همکاران (۱۹۸۱) به جای استفاده از معادله $[Q_s = aQW^b]$ که از نقطه ای با مختصات میانگین نقاط $\log Q_s$ و $\log QW$ عبور می کند از معادله خطی موازی که از میانگین نقاط Q_s و QW متناظر با آن می گذرد استفاده می کنند. این روش به نام "روش فائو" عنوان شده است و در عمل به عنوان ضریبی محاسبه شده و در منحنی سنجه رسوب یک خطی اعمال می گردد. منحنی های سنجه رسوب دیگری که در آنها مساله اریب ناشی از تبدیل لگاریتمی تا حدودی بر طرف شده است عبارت از روش $QMLE^3$ (۱۳ و ۱۲) و Smearing (۱۹) می باشد. معادله کلی روش $QMLE$ به صورت زیر است:

$$\hat{L}_{QMLE} = L_{RC} \cdot \exp\left(\frac{S^r}{\psi}\right) \quad [1]$$

در این حالت رسوب برآورد شده از روش $QMLE$ می باشد. L_{RC} رسوب برآورد شده با استفاده از منحنی سنجه یک خطی و S^2 مجذور میانگین اشتباه رگرسیون می باشد. این روش به نام روش پارامتری CF1 نیز گزارش شده است. برآورد کننده Smearing (CF2) یک روش غیرپارامتری بوده که شکل کلی معادله آن به صورت زیر است:

$$L_s = L_{RC} \frac{\sum_{i=1}^N \exp(e_i)}{N} \quad [2]$$

¹- Overestimation

²- Underestimation

³- Quasi-Maximum Likelihood Estimator

که در آن :

L_S : رسوب برآورد شده با استفاده از روش Smearing، ei : باقی مانده حداقل مربعات معادله منحنی سنجه بوده و در واقع تفاوت لگاریتم طبیعی رسوب مشاهده و برآورد شده است. در روش MVU^۱ یا برآورد کننده نا اریب با حداقل واریانس که اغلب روش Bradu-Mundlak نیز نامیده می شود تصحیح اریب برای هر یک از مقادیر دبی روزانه به کار برده می شود (۹). معادلات این روش به صورت زیر است:

$$\hat{L}_{MVUE} = L_{Rc(t)} \cdot g_m \quad [۳]$$

$$g_m = \frac{m+1}{2m} [(1-V)S^T] \quad [۴]$$

$$V = \frac{1}{N} + \left[\frac{(\ln(Q_x) - \ln(\bar{Q}))^2}{\sum_{i=1}^N (\ln(Q_i) - \ln(\bar{Q}))^2} \right] = \frac{1}{N} + \left[\frac{(\ln(Q_x) - Q_{Bar})^2}{Q_{var}} \right] \quad [۵]$$

در این معادلات $L_{Rc(t)}$: بار رسوبی برآورد شده از منحنی سنجه برای هر روز t ، Q_x : میانگین دبی جریان برای روزهایی که بار رسوبی پیش بینی می شود. Q : دبی جریان لحظه ای استفاده شده در رگرسیون، N : تعداد داده های وارد شده در رگرسیون، Q_{var} : واریانس دبی های جریان استفاده شده در معادله رگرسیون (منحنی سنجه)، Q_{Bar} : متوسط دبی و S : اشتباه استاندارد منحنی سنجه می باشند. بونینگ (۲۰۰۱) ضمن تشریح روش های فوق در یک گزارش بیان می دارد که دبی رسوب محاسبه شده بدون استفاده از ضریب تصحیح اریب ۱۳ درصد کوچکتر از رسوب برآورد شده با استفاده از روش MVUE می باشد. همچنین برآورد روش QMLE، ۴ درصد بزرگتر از برآورد MVUE می باشد. همچنین روش MVUE و Smearing ۰/۶ درصد با هم دیگر اختلاف دارند. وی در این گزارش بیان می دارد زمانی که توزیع آماری اشتباهات از توزیع نرمال تبعیت می کند روش MVUE روش مناسبی بوده در غیر این صورت روش Smearing مناسب می باشد. کن و همکاران (۱۹۸۹) به بررسی اریب و واریانس سه روش منحنی سنجه یک خطی، منحنی سنجه تغییر شکل یافته و برآورد کننده نااریب با واریانس حداقل (MVUE) پرداخته و نشان دادند که در بیشتر موارد برآورد کننده های قدیمی و تغییر شکل یافته می توانند مقادیر قابل قبولی را به دست دهند. اما در شرایطی مثل تعداد کم نمونه برداری و شرایط سیلابی، اشتباه استاندارد این روش ها زیاد است. اما روش MVUE نااریب بوده و نسبت به روش های دیگر جواب قابل قبول تری ارائه می دهد. وانگ و لینکلر (۱۹۹۹) در مطالعه خود با

اضافه نمودن متغیرهای دیگر مثل روند فصلی دراز مدت بار معلق و غیره مدل رگرسیونی ارائه دادند که در آن همبستگی بار معلق با جریان و زمان وجود دارد. این مدل اشتباه معیار و برآورد کمتری نسبت به روش های دیگر دارد. نامبردگان به نقل از کوهن و همکاران (۱۹۸۹) بیان می دارند که نتایج روش MVUE در مقایسه با روش های دیگر خطای اریب کمتری داشته لیکن نسبت به فرضیه نرمال بودن داده ها حساس است. در زمینه کاربرد منحنی های سنجه رسوب مذکور در برآورد بار رسوبی سالانه مطالعات زیادی انجام شده است (۲، ۶، ۱۴، ۲۳ و ۲۴) لیکن با توجه به نقش زیاد رسوب دهی وقایع سیلابی در آورد رسوبی سالانه کاربرد منحنی های سنجه رسوب در برآورد بار رسوبی هیدروگراف سیل مطالعاتی صورت نگرفته است. یکی از دلایل مهم این کار عدم وجود اطلاعات آماری مناسب در این زمینه می باشد. یکی از نکات مهم در تحقیق حاضر اعتبار یابی کاربرد منحنی های سنجه رسوب در برآورد بار رسوبی وقایع سیلابی بوده که گامی موثر در پیشبرد این نوع تحقیق می باشد. براساس جدول ۱ حوزه آبخیز مورد مطالعه با مساحت ۱۷۵۰/۹۲ کیلومتر مربع در بین عرض جغرافیایی ۳۳-۴۵ تا ۱۱-۳۴ و طول ۰۷-۴۹ تا ۵۰-۴۹ قرار داد. طول آبراهه اصلی این حوضه ۷۱/۲ کیلومتر و ارتفاع حداقل آن ۱۸۳۴/۲ متر و حداکثر ارتفاع ۳۲۸۰ متر می باشد. ایستگاه هیدرومتری و رسوب سنجی پل دو آب در خروجی این حوزه آبخیز قرار دارد. شیب متوسط حوزه آبخیز مطالعه متغیر از ۱۶/۲۳ درصد در سرشاخه نهر میان تا ۲۵/۶۲ درصد در بازنه بوده و به طور متوسط مقدار شیب در حدود ۲۰/۴۶ درصد می باشد. اقلیم منطقه در طبقه بندی دو مارتن در محدود اقلیم نیمه خشک سرد قرار دارد. متوسط درجه حرارت سالانه ۱۱/۸ سانتی گراد می باشد. قدیمی ترین تشکیلات رسوبی منطقه شامل شیل های خاکستری تیره تا سیاه رنگ می باشد که معادل سازند شمشک در البرز مرکزی است. همچنین تشکیلات کربناته کرتاسه به لحاظ گسترش منطقه ای و ضخامت قابل توجه در ذخیره بارندگی ها و تغذیه آبخوان اهمیت قابل ملاحظه ای دارد. کاربری اراضی به عنوان مرتع با مساحت ۸۹۳/۷۱ کیلومتر مربع نسبت به دیگر موارد گسترش بیشتری داشته است کشت آبی و دیم زارهای کم بازده نیز از دیگر کاربری های عمده منطقه مورد مطالعه می باشد. کاربری های مختلف به جز در موارد بسیار محدود به طور عمده بدون رعایت اقدامات حفاظتی خاک صورت می گیرد. تپ های مختلف اراضی در منطقه شامل ۷ تپ کوهستان با مساحت ۴/۶۲ کیلومتر مربع تپه ۲۳/۲۳ کیلومتر مربع، فلات ۸۹/۶۶۷ کیلومتر مربع، مخروط افکنه ۶۱/۴۶ کیلومتر مربع دشت های دامنه ای ۵/۳۳۶ کیلومتر مربع که در این بین گسترش فلات در منطقه نسبت به دیگر تپ ها بیشتر می باشد (۵).

جدول ۱: خصوصیات فیزیوگرافی حوزه آبخیز پل دوآب

ارتفاع حداکثر آبراهه اصلی (m)	بزرگترین طول حوزه (km)	طول آبراهه اصلی (km)	زمان تمرکز (hr)	محیط (km)	مساحت (km ²)	شیب متوسط (%)	متوسط	حداکثر	حداقل
۱۹۶۷	۵۲/۶	۷۱/۲	۱۱/۲۵	۲۸۵/۱۹	۱۷۵۰/۹۲	۲۰/۴۶	۲۳۷۴/۷	۳۳۸۰	۱۸۳۴/۲

مواد و روش ها

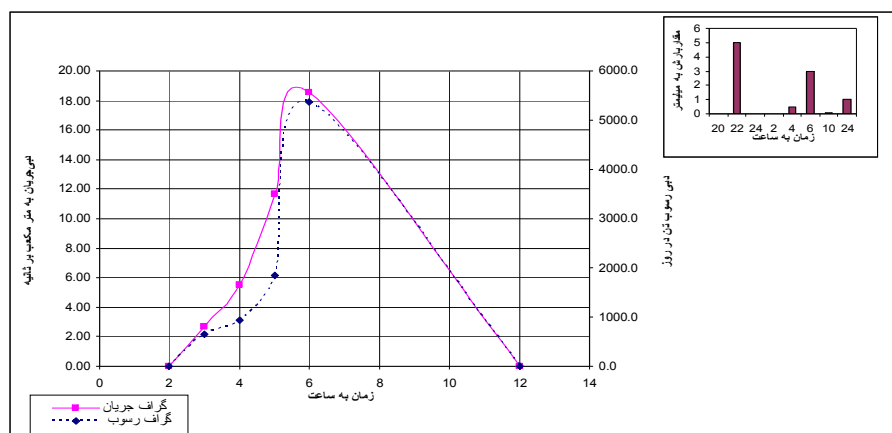
یکی از مهم ترین بخش های این تحقیق نمونه برداری وقایع سیلابی با فواصل زمانی کوتاه می باشد به طوری که بتواند شاخه های صعودی و نزولی آبنمود سیل را شامل شود. بدین منظور در قالب یک طرح ملی (۴) در محل ایستگاه پل دوآب و در زمان بارندگی با افزایش ارتفاع سطح آب در رودخانه قرائت اشل با فواصل زمانی یک ساعته انجام شد. همزمان با این کار نمونه برداری با دستگاه USDH-48 از سه نقطه با فواصل عرضی تقریباً یکسان (E.W. I.)^۱ و به صورت انتگراسیون عمقی صورت گرفت (۱۱). نمونه بردار مذکور یک محفظه آلومینومی ۳۳ سانتیمتری دارد که در داخل محفظه یک بطری ۰/۵ لیتری گرد قرار داده می شود. در مدل های جدید این دستگاه بطری های چهارگوش نیز می تواند تعبیه شود. با خروج هوا از طریق دریچه آب وارد بطری می گردد. وزن این دستگاه در حدود ۲ کیلوگرم بوده و تا هشت سانتی متری بستر می تواند نمونه برداری کند. این وسیله با نازل ۰/۶۳۵ سانتی متری کالیبره شده و در شرایط سیلابی می تواند نازل های دیگری جایگزین آن گردد. زمانی که رودخانه عریض بوده و یا از روی پل امکان نمونه برداری وجود دارد می توان از این نمونه بردار استفاده کرد. مقدار غلظت رسوب معلق گرم در لیتر نمونه ها به صورت یک کار آزمایشگاهی تعیین گردید. در هر واقعه سیل وضعیت بارندگی در حوزه آبخیز توسط ایستگاه سینوپتیک اراک کنترل گردید و هیتوگراف بارندگی های مربوطه از روی کاغذهای باران نگار استخراج گردید. بعد از تفکیک جریان پایه باروش های مختلف هیدروگراف رواناب مستقیم سیلاب ها محاسبه شد (۳). با توجه به رابطه منحنی سنجه آب در ایستگاه اطلاعات و رقوم سطح آب به دبی تبدیل و هیدروگراف جریان سیلاب ها ترسیم گردید. برای به دست آوردن نمودار رسوب، میزان غلظت رسوب بدست آمده با استفاده از رابطه [۶] تبدیل به دبی رسوب شد (۲).

$$Q_s = 0.0864 C Q_w \quad [6]$$

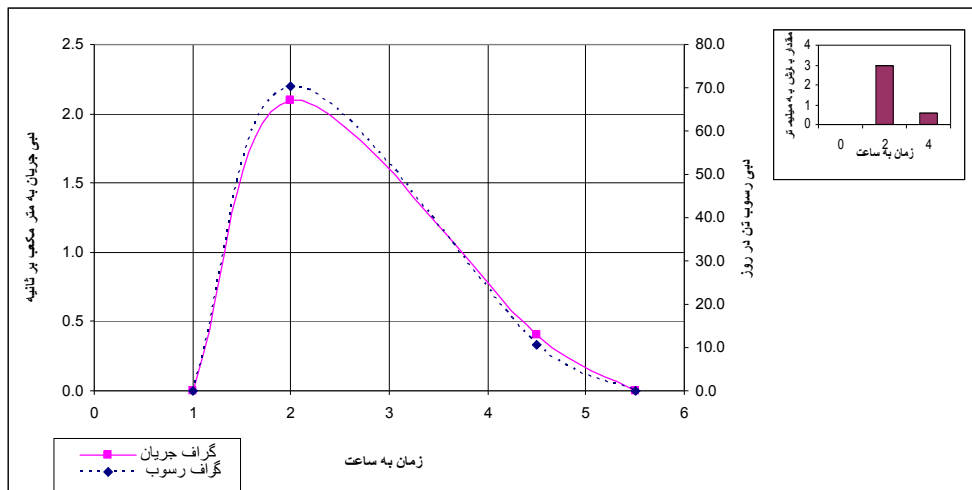
در این رابطه: Q_w دبی جریان آب (متر مکعب بر ثانیه) و C غلظت رسوب (میلی گرم در لیتر) می باشد. تغییرات دبی رسوب در طی ساعت های مختلف به صورت گراف رسوب ارائه شد. پس از به دست آوردن گراف رسوب حجم رسوبات معلق هر واقعه سیل از روی گراف ترسیم شده محاسبه گردید. همچنین برای محاسبه بار کل رسوب باتوجه به جداول استاندارد، درصدی به عنوان بارکف به آن اضافه گردید (۳) که در نهایت میزان بارکل رسوب هر هیدروگراف به دست آمد. با توجه به آمار طولانی مدت بار معلق و دبی جریان آب همزمان ایستگاه پل دوآب ۱۰ نوع منحنی سنج رسوب از جمله یک خطی، یک خطی! ضریب فائو، یک خطی - CF1، یک خطی - CF2، یک خطی - MVUE، حد وسط، حد وسط - ضریب فائو، حد وسط - CF1، حد وسط - CF2 و حد وسط!! MVUE ترسیم شد. برای استفاده از ضریب MVUE برنامه ای در محیط فرترن تدارک دیده شد که محاسبات پیچیده این ضریب را آسان تر می کرد. با توجه به منحنی های سنج رسوب به دست آمده مقدار بار رسوب هریک از هیدروگراف های مذکور محاسبه گردید و با توجه به شاخص های مختلف صحت از جمله میانگین اختلافات BIAS، مجذور میانگین مربع خطاها (RMSE) شاخص خطای برآورد (PE)، میانگین اختلاف برآورد به تن و ضریب تغییرات (درصد) به عنوان شاخص دقت برآورد کارایی آنها مورد ارزیابی قرار گرفت (۱۶).

نتایج و بحث

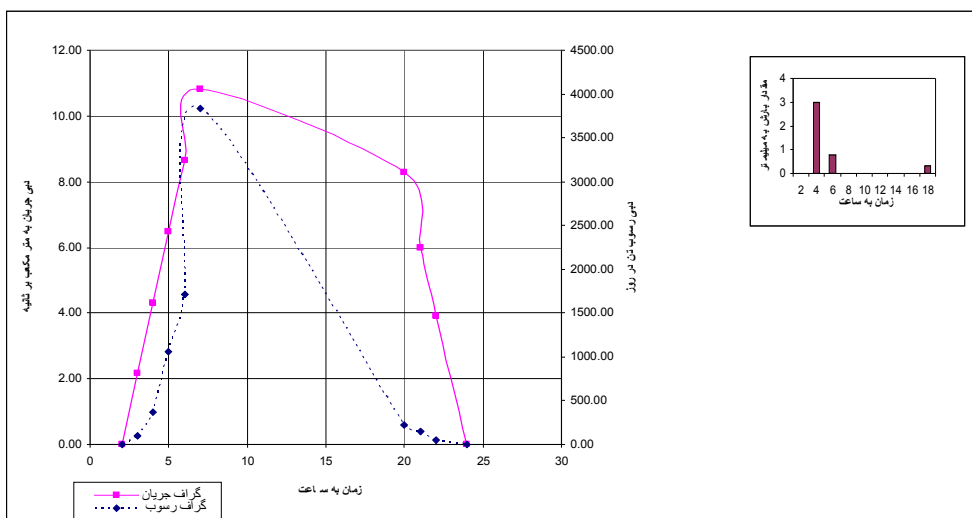
مقادیر رسوب مشاهداتی سیلاب های نمونه برداری شده با توجه به گراف رسوب اشکال ۱ تا ۵ محاسبه گردید. با استفاده از روابط منحنی های سنج رسوب ترسیم شده نیز مقدار رسوب برآوردی برای هر یک از وقایع سیلابی مذکور به دست آمد.



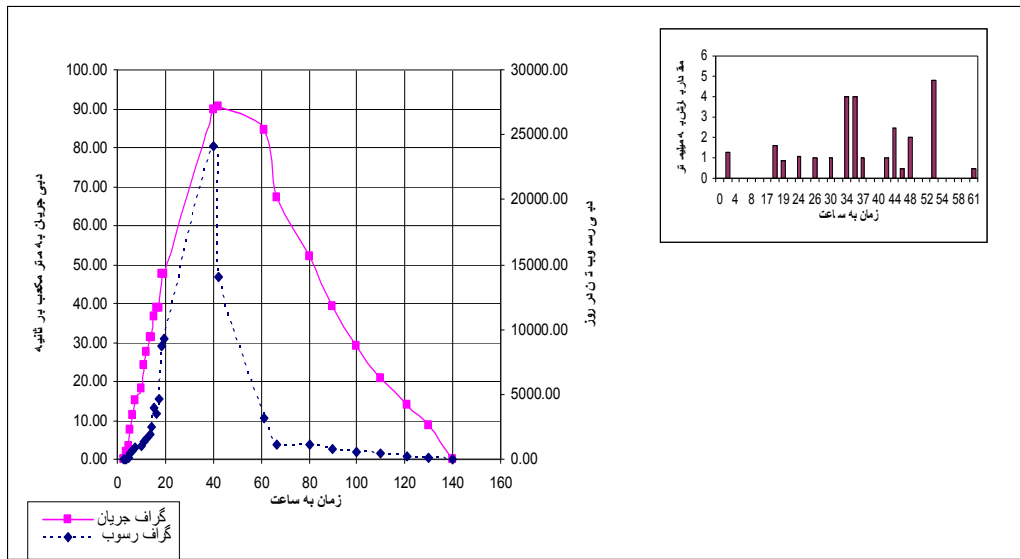
شکل ۱: هیدروگراف سیلاب مورخه ۸۳/۱/۱۶ و هیتوگراف بارش مربوطه



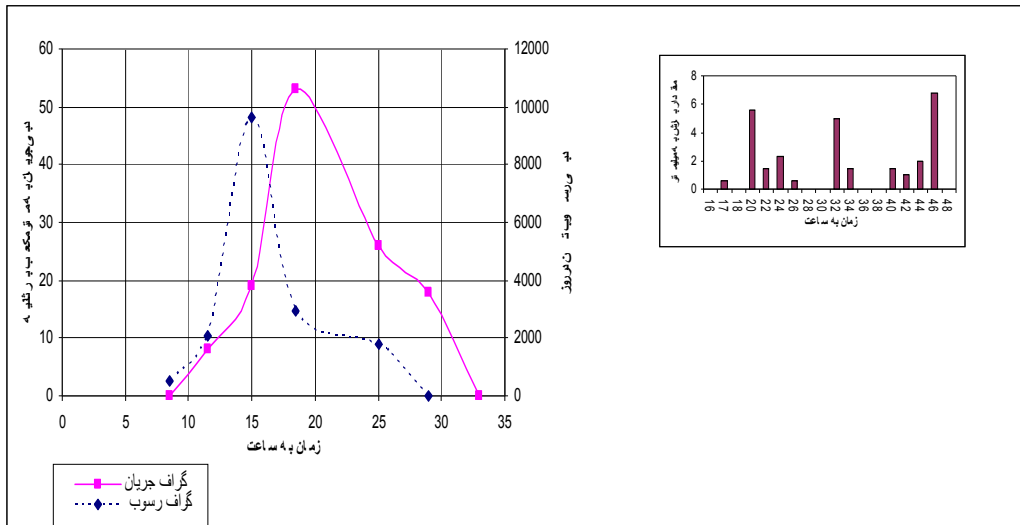
شکل ۲: هیدروگراف سیلاب مورخه ۱۳/۱/۲۲ و هیتوگراف بارش مربوطه



شکل ۳: هیدروگراف سیلاب مورخه ۱۳/۲/۱ و هیتوگراف بارش مربوطه



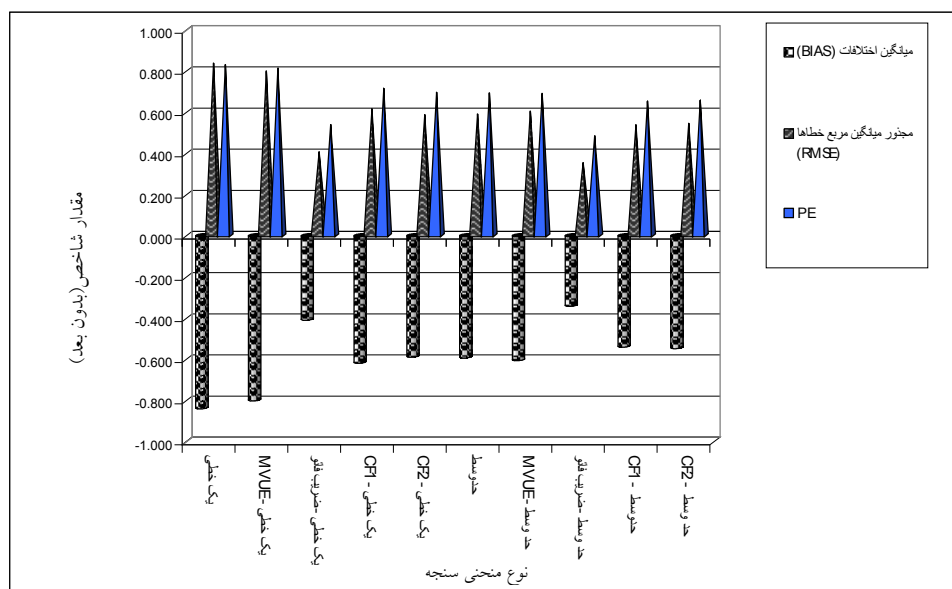
شکل ۴: هیدروگراف مورخه ۸۳/۲/۴ و هیتوگراف بارش مربوطه



شکل ۵: هیدروگراف مورخه ۸۳/۲/۴ و هیتوگراف بارش مربوطه

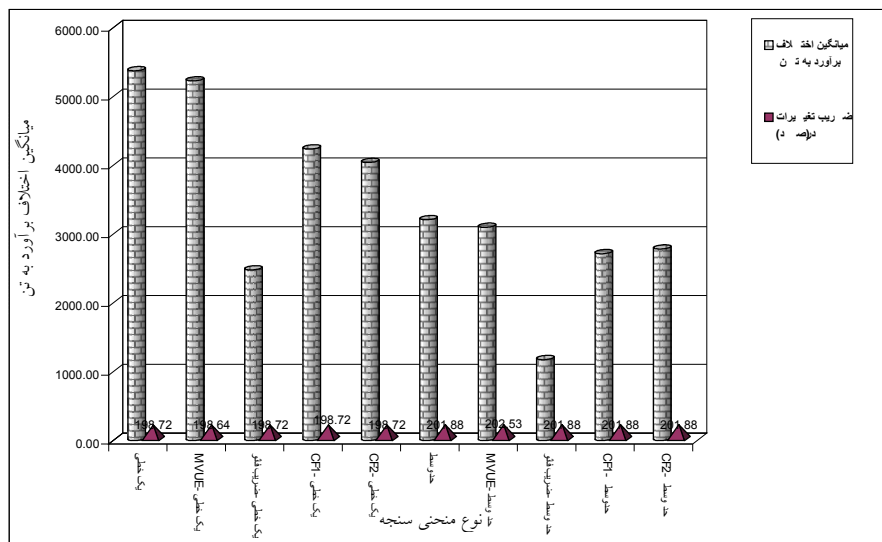
جدول ۲: مقادیر شاخص های مختلف صحت و دقت منحنی های سنجه رسوب در برآورد بار رسوبی وقایع سیلابی

نوع منحنی سنجه رسوب	میانگین اختلافات (BIAS)	مجدور میانگین مربع خطاها (RMSE)	شاخص خطای برآورد (PE)	میانگین اختلاف برآورد (تن)	ضریب تغییرات (درصد)
یک خطی	-۰/۸۳۶	۰/۸۴	۰/۸۳	۵۳۷۷/۰۱	۱۹۸/۷۲
یک خطی - MVUE	-۰/۷۹۸	۰/۸۰	۰/۸۱	۵۲۲۹/۳۶	۱۹۸/۶۴
یک خطی - ضریب فائو	-۰/۴۰۵	۰/۴۱	۰/۵۴	۲۴۸۱/۷۹	۱۹۸/۷۲
یک خطی - CF1	-۰/۶۱۴	۰/۶۱	۰/۷۱	۴۲۳۹/۶۴	۱۹۸/۷۲
یک خطی - CF2	-۰/۵۸۵	۰/۵۹	۰/۶۹	۴۰۴۲/۷۵	۱۹۸/۷۲
حد وسط	-۰/۵۸۹	۰/۵۹	۰/۶۹	۳۲۱۰/۹۶	۲۰۱/۸۸
حد وسط - MVUE	-۰/۶۰۲	۰/۶۰	۰/۶۹	۳۱۰۰/۸۳	۲۰۲/۵۳
حد وسط - ضریب فائو	-۰/۳۳۸	۰/۳۵	۰/۴۸	۱۱۷۷/۸۳	۲۰۱/۸۸
حد وسط - CF1	-۰/۵۳۷	۰/۵۴	۰/۶۵	۲۷۱۷/۱۲	۲۰۱/۸۸
حد وسط - CF2	-۰/۵۵۴	۰/۵۴	۰/۶۶	۲۷۸۲/۲۸	۲۰۱/۸۸



شکل ۶: مقادیر شاخص های صحت منحنی های سنجه رسوب

۱- مقدار این شاخص از رابطه $PE = \frac{\sum_{i=1}^n |Q_i - \hat{Q}_i|}{N} \times 100$ به دست می آید که در آن Q_i مقدار مشاهداتی و \hat{Q}_i مقدار برآوردی است. هر چه مقدار این ضریب به صفر نزدیکتر باشد شاخص صحت زیادتر می شود (۱۵).



شکل ۷: مقادیر شاخص های صحت و دقت منحنی های سنجه رسوب

گراف رسوب و جریان ترسیم شده در شکل های ۱ تا ۵ بیانگر روند نسبتا همسان بار معلق و دبی جریان می باشد. همچنین هیستوگراف بارش ثبت شده هر سیلاب تطابق خوبی با وقایع ثبت شده دارد. در جدول ۲ شاخص های مختلف صحت و دقت برای ۱۰ نوع منحنی سنجه رسوب به کار گرفته شده محاسبه گردیده است و اشکال ۶ و ۷ نیز تغییرات این مقادیر را برای منحنی های مذکور نشان می دهد. مقدار دبی پیک سیلاب های ثبت شده متغیر از ۲/۱ در سیلاب مورخه ۸۳/۱/۲۲ تا ۹۰/۷ متر مکعب در ثانیه در سیلاب مورخه ۸۳/۲/۴ می باشد. زمان پایه سیلاب ها نیز به ترتیب برای سیلاب های مذکور متغیر از ۵/۵ تا ۱۴۰ ساعت می باشد. با توجه به گراف رسوب مشاهده شده حجم کل رسوبات سیلابی متغیر از ۶/۵ تن در سیلاب ۸۳/۱/۲۲ تا ۲۹۲۸۷/۸۸ تن در سیلاب مورخه ۸۳/۲/۴ می باشد. بعد از برآورد میزان رسوبدهی با منحنی های مختلف سنجه رسوب مقادیر شاخص های صحت و دقت برآورد بدست آمد که در جدول ۲ دیده می شود. در این جدول مقادیر شاخص BIAS متغیر از (-۰/۳۳۳۸) برای منحنی سنجه حد وسط! ضریب فائو تا (-۰/۸۳۶) در روش یک خط می باشد. مقدار شاخص RMSE نیز تغییرات یکسان با شاخص BIAS و با علامت مثبت داشت است. مقدار شاخص PE به عنوان یکی از شاخص های دیگر صحت کمترین مقدار خود را در منحنی سنجه حد وسط!! ضریب فائو با مقدار ۰/۴۸ و بیشترین مقدار آن را در روش منحنی سنجه یک خطی به مقدار ۰/۸۳ داشته است. میانگین اختلاف برآورد در روش یک خطی ۵۳۷۷/۰۱ تن و در روش حد وسط- ضریب فائو کمترین مقدار خود در حدود ۱۱۷۷/۸۳ تن داشته است. ضریب تغییرات به عنوان شاخص دقت کمتری در بین روش ها داشته و مقدار آن متغیر از ۱۹۶/۶۴ برای روش یک خطی MVUE! تا ۲۰۲/۵۳ در روش حد وسط! MVUE! بوده است.

عمده بار رسوبی سالانه حمل شده توسط رودخانه ها در طی چند واقعه سیلابی صورت می گیرد و تحقیقات متعددی موبد این موضوع است که سهم رسوب دهی وقایع سیلابی در آورد سالانه بیش از ۷۰ درصد می باشد. گذشته از این که معمولا سهم رسوب دهی سیلابی در برآورد رسوبی سالانه در نظر گرفته نمی شود. روش مناسبی نیز برای برآورد هیدروگراف سیل پیشنهاد نشده است و منحنی های سنجه رسوب به عنوان ابزار مناسبی است که می تواند به این منظور به کار آید. اما در بیشتر موارد منحنی های سنجه رسوب برآورد زیر حد واقعی داشته اند و اختلاف زیادی بین مقادیر مشاهده شده و برآورد شده در تمام انواع منحنی های سنجه رسوب وجود دارد (۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴ و ۲۵). در بررسی روش های مختلف منحنی های سنجه رسوب، روش فائو نسبت به سایر موارد صحت و دقت بیشتری داشته است و برآورد بار رسوبی وقایع سیلابی با این روش به نسبت دقیق تر از منحنی های سنجه دیگر است. این در حالی است که در برآورد بار رسوبی سالیانه کاربرد این ضریب باعث کاهش دقت و صحت برآوردهای منحنی های سنجه رسوب مذکور می گردد. در مطالعات زیادی اشاره شده است که ضریب فائو نمی تواند در برآورد بار رسوبی سالیانه دقت و صحت خوبی داشته باشد اما بر خلاف تحقیقات مذکور در برآورد بار رسوب وقایع سیلابی این ضریب بهتر عمل کرده و برآورد نسبتا نزدیک تری به مقدار مشاهداتی داشته است. از نظر دقت برآورد روش های مختلف تقریبا در یک حد بوده و تفاوت چندانی بین دقت برآورد روش ها وجود ندارد. تغییرات این پارامتر از ۱۹۸/۶۴ درصد برای روش یک خطی $MVUE!!$ تا ۲۰۲/۵۳ درصد در روش حد وسط $MVUE!$ می باشد. به رغم این که ضریب $MVUE$ در بیشتر تحقیقات باعث افزایش کارایی منحنی های سنجه رسوب می گردد. (۲۴/۹۰۷) لیکن در این تحقیق این ضریب کارایی چندانی از خود نشان نداده است. با بررسی مقدار شاخص های مختلف صحت در این روش به طور متوسط مقداری در حدود ۷۵ درصد نسبت به بار واقعی خطای برآورد دیده می شود. این در حالی است که مقدار خطای برآورد روش فائو در حدود ۵۰ درصد می باشد.

دو روش $CF1$ و $CF2$ به طور متوسط خطای برآوردی در حدود ۶۸ درصد داشته اند. از یافته های این تحقیق چنین برمی آید که کاربرد روش های مختلف منحنی سنجه رسوب باید با احتیاط بیشتری انجام شود و با توجه به نوع هدف و شرایط داده ها هر یک از روش ها خصوصیات انحصاری خود را دارا می باشند. به علت محدودیت آمار موجود دبی رسوب در شاخه های بالا رونده و پایین رونده وقایع سیلابی ارزیابی دقت و صحت روش های مختلف با مشکل مواجه است. لیکن اعتبار دادهای موجود در این تحقیق این امکان را میسر نمود تا صحت و دقت برآورد ۱۰ نوع منحنی سنجه مورد ارزیابی قرار گیرد. علت برآورد به نسبت مناسب روش فائو در این تحقیق به ماهیت داده ها و شرایط موجود بر می گردد. ضریب فائو معمولا تحت تاثیر دادهای سیلابی است و از تقسیم متوسط رسوب مشاهده شده به مقدار برآوردی به دست می آید به طوری که در عمل ضریب افزایشده ای به حساب می آید و

از این رو برآورد های زیر حد واقعی منحنی های سنجه یک خطی و حد وسط را افزایش می دهد و به مقدار واقعی نزدیک تر می نماید.

روش MVUE در واقع در برآورد بار رسوب روزانه عملکرد بهتری نسبت به دوره های زمانی کوتاه تر به خصوص شرایط سیلابی دارد. در این روش برای هر مقدار دبی جریان یک ضریب اریب محاسبه می شود و در یک هیدروگراف سیل در شاخه های صعودی و نزولی دبی های جریان یکسانی وجود دارد که مقادیر دبی رسوب آن ها با یکدیگر به طور کامل متفاوت است لیکن برای هر دو میزان دبی یک مقدار ضریب اریب برآورد می گردد و این کار باعث خطای این روش در محاسبه بار رسوبی هیدروگراف سیل می شود. دو ضریب دیگر CF1 و CF2 متاثر از اشتباه استاندارد منحنی سنجه و خطای باقی مانده های منحنی های سنجه یک خطی و حد وسط می باشند و تغییرات آنها به شدت وابسته به برآوردهای دو نوع منحنی سنجه مذکور می باشد. با توجه به موارد مذکور می توان اذعان داشت کاربرد منحنی های سنجه رسوب در برآورد بار رسوب رودخانه ها و حوزه های آبخیز باید با احتیاط بیشتری صورت گیرد. شرایط داده ها و هدف کاربرد منحنی ها تاثیر زیادی در انتخاب نوع منحنی سنجه رسوب دارند. به طوری که در برآورد بار رسوب سالیانه به رغم این که روش فائو کارایی زیادی ندارد لیکن در برآورد بار رسوبی هیدروگراف سیلاب این روش به خوبی می تواند مقادیر به نسبت نزدیک تری به مقدار واقعی برآورد نماید. تحقیقات بیشتری در این زمینه لازم است تا بتوان کارایی روش های مختلف را با ضریب اطمینان بالا مورد آزمون قرار داد.

منابع

- ۱- عرب خدری، م، حکیم خانی ش، ولی خوجینی، ع. ۱۳۷۷. ضرورت تجدید نظر در روش متداول بار معلق رودخانه ها، پژوهش و سازندگی، شماره ۳۹.
- ۲- میر ابوالقاسمی، ه و مرید، س، ۱۳۷۴. بررسی روش های هیدرولوژیکی برآورد بار معلق رودخانه ها، آب و توسعه شماره ۱۰، صفحات ۵۴ تا ۶۷.
- ۳- مهدوی، م، ۱۳۷۱. هیدرولوژی کاربردی دانشگاه تهران، دو جلد.
- ۴- وروانی، ج، حکیم خانی ش، ابراهیمی. ن. ۱۳۸۴. بررسی رابطه پارامترهای رسوب نمود واحد لحظه ای سیلاب ها با ویژگی های بارش، گزارش نهایی طرح ملی مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور.
- ۵- بی نام. ۱۳۸۴. مجموعه مطالعات پایه حوزه های آبخیز، تواندشت، نهرمیان و سازند، مهندسین مشاور نهرآب، دانشگاه علم و صنعت.

6- Asselman, N. E. M. 2000. Fitting and interpretation of sediment rating curves, Journal of Hydrology, 234, 228-248.

7- Boning, W. C., 2002. Recommendations for use of retransformation methods in regression models used to estimate sediment loads, <http://water.Usgs.Gov>.

8- Cohn, T. A., Delong L. L., Gilroy E. J., Hirsch R. M. and Wells D.K. 1989. Estimating constituent loads, Water Resources Res. 25(5) pp. 937-942-1989.

- 9- **Crawford, C. G., 1991.** Estimation of suspended and sediment ratings curves and mean suspended sediment loads, *Jour. of Hydrology*, 129. Pp.331-398.
- 10- **Edwards K.T. and Glysson G.D., 1988.** Field methods for measuring of fluvial sediment, US Geological Survey open file report.
- 11- **Duan, N., 1983.** Smearing estimate , a nonparametric retransformation method: *Journal of the American Statistical Association*, 78, 383, p. 605-610.
- 12- **Ferguson, R.I, 1987.** Accuracy and precision of methods, for estimating river loads, *Earth Surface Processes and Land Forms*, 12, P. 95-104.
- 13- **Jansson,M. B. 1996.** Estimating a sediment rating curves of the Reventzon river at Palomo using logged mean loads within discharge classes ,*Journal of Hydrology* ,183:4,227-241.
- 14- **Jones, K. R.,O. Berney, D. P. Carr and E.C.Barret,1981.** Arid zone hydrology for agricultural development,FAO Irrigation and Drainage paper,No.37,271 p.
- 15- **Martine and Rango, 1989.** Merits of statistical criteria for performance of hydrological models, *Water Resources Bull.*25(2):42-432.
- 16- **Olive, L.J. and W.A. Reiger, 1992.** Stream suspended sediment transport monitoring – why, how and what is being measured? *IAHS* , 210:537-540.
- 17- **Preston, Stephen, victor, J. Bier man, 1989.** An evaluation of methods for the Estimation of Tributary Mass Loads, *Water Resources Research*. Vol. 25, No, 6.
- 18- **Thomas,R.B.1985.**Estimating total suspended sediment yield with probability sampling .*water resources research* ,21,1381-1388.
- 19- **Vericat D.,Batalla R. J.,2005.** Sediment transport in a highly regulated system during two consecutive floods ,*Earth Surface processes and Landforms* ,30,(4):385-402.
- 20- **Walling D.E, and B. W. Webb, 1981.**The Reliability of Suspended Sediment Load Data, *Erosion and Sediment Transport Measurement*, *IAHS, Pub*, 133,177-194.
- 21- **Waling, D.E, 1977.** Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin, *Water Resources Research*, 13: 531-538.
- 22- **Walling D. E. and Webb, B.W. and Wood, J. C, 1992.** Some sampling considerations in the design of effective strategy for monitoring sediment associated transport, *IAHS*, 210.
- 23- **Wang, P., L. Linker, 1999.** An Alternative Regression method for Constituent Loads from steams, USE PACBPO.