

آنالیز روش‌های مختلف منحنی سنجه در برآورد رسوب ورودی به سدها مطالعه موردی سد دوستی

سید محمد کالوندی^۱، سعید رضا خدانشناس^۲، بیژن قهرمان^۳، رمضان
طهماسبی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشگاه فردوسی مشهد

۲،۳- عضو هیئت علمی گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد

۴- عضو هیئت علمی وزارت جهاد کشاورزی موسسه آموزش عالی علمی کاربردی

kalvandi.mohammad@gmail.com

خلاصه

تخمین دقیق حجم رسوبات حمل شده به وسیله رودخانه‌ها و متعاقباً حجم رسوب ورودی به سدها در بسیاری از پروژه‌های کلان مدیریت منابع آب دارای اهمیت فراوان است. به منظور تخمین بار رسوبی ورودی روش‌های مختلفی از جمله روابط رگرسیونی در قالب معادلات سنجه به کار برده می‌شوند که نحوه استفاده و دقت آن‌ها کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین به دلیل هزینه بالای اندازه‌گیری مداوم رسوب حمل شده و پایش آن برآورد میزان رسوبات معلق در رودخانه‌ها معمولاً از طریق منحنی سنجه رسوب انجام می‌گیرد. از این رو تحقیق حاضر در صدد ارزیابی عمل کرد ۷ روش منحنی سنجه از جمله همبستگی سالیانه، USBR، متوسط دسته‌ها، FAO و فرگوسن بوده است، که برای ۳۴ سال آماری در دو ایستگاه هریرود- پل خاتون و کشف رود- پل خاتون مرتبط با سد دوستی انجام شد. در نهایت برای کل داده‌ها نتایج این تحقیق نشان دهنده عمل کرد بهتر روش‌های FAO- متوسط دسته‌ها و فرگوسن- متوسط دسته‌ها بود. نتیجه این روش‌ها نیز بسیار نزدیک به هم بدست آمد. همچنین با این روش‌ها حجم مفید باقی‌مانده مخزن پس از ۳۴ سال محاسبه شد.

کلمات کلیدی: دبی رسوب، منحنی سنجه رسوب، روش فرگوسن، حد وسط دسته‌ها، پل خاتون.

کد مقاله: ۱۵۳۱

آنالیز روش‌های مختلف منحنی سنجه در برآورد رسوب ورودی به سدها مطالعه موردی سد دوستی

سید محمد کالوندی^۱، سعید رضا خدانشناس^۲، بیژن قهرمان^۳، رمضان طهماسبی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشگاه فردوسی مشهد

۲-۳- عضو هیئت علمی گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد

۴- عضو هیئت علمی وزارت جهاد کشاورزی موسسه آموزش عالی علمی کاربردی

پست الکترونیک: kalvandi.mohammad@gmail.com

خلاصه

تخمین دقیق حجم رسوبات حمل شده به وسیله رودخانه‌ها و متعاقباً حجم رسوب ورودی به سدها در بسیاری از پروژه‌های کلان مدیریت منابع آب دارای اهمیت فراوان است. به منظور تخمین بار رسوبی ورودی روش‌های مختلفی از جمله روابط رگرسیونی در قالب معادلات سنجه به کار برده می‌شوند که نحوه استفاده و دقت آن‌ها کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین به دلیل هزینه بالای اندازه‌گیری مداوم رسوب حمل شده و پایش آن برآورد میزان رسوبات معلق در رودخانه‌ها معمولاً از طریق منحنی سنجه رسوب انجام می‌گیرد. از این رو تحقیق حاضر در صدد ارزیابی عمل کرد ۷ روش منحنی سنجه از جمله همبستگی سالیانه، USBR، متوسط دسته‌ها، FAO و فرگوسن بوده است، که برای ۳۴ سال آماری در دو ایستگاه هریرود- پل خاتون و کشف رود- پل خاتون مرتبط با سد دوستی انجام شد. در نهایت برای کل داده‌ها نتایج این تحقیق نشان دهنده عمل کرد بهتر روش‌های FAO- متوسط دسته‌ها و فرگوسن- متوسط دسته‌ها بود. نتیجه این روش‌ها نیز بسیار نزدیک به هم بدست آمد. همچنین با این روش‌ها حجم مفید باقی‌مانده مخزن پس از ۳۴ سال محاسبه شد.

کلمات کلیدی: دبی رسوب، منحنی سنجه رسوب، روش فرگوسن، حد وسط دسته‌ها، پل خاتون.

۱. مقدمه

پدیده رسوب گذاری درمخازن سدها مهمترین عامل تهدید کننده سرمایه گذاری‌های عظیم در پروژه های آبی می‌باشد. دریاچه ها و سدها به عنوان فیلترهای بار رسوبی به حساب می آیند. تخمین زده شده است که ۳۰ درصد جریان رسوبی جهان پشت سدها به دام می افتد [1]. همچنین کاهش سالانه توانایی ذخیره سدهای جهان به دلیل ته نشین شدن رسوبات تقریباً ۰/۵ تا ۱ درصد حجم مخزن می باشد که برای بسیاری از سدها این مقدار بالاتر از ۴ تا ۵ درصد بوده و در نتیجه اغلب سدها قسمت اصلی توانایی ذخیره آب خود را در طول ۲۵ تا ۳۰ سال از دست می دهند [2].

بار رسوبی عبارت است از کل رسوب خروجی از یک حوزه که مقدار آن در یک نقطه مرجع و در یک دوره زمانی خاص قابل اندازه گیری باشد [3]. این مقدار را می توان به صورت بار رسوبی کل (تن در سال) و یا به صورت بار رسوبی ویژه (تن در سال در کیلومتر مربع) بیان کرد.

پیشقدم محاسبات رسوبات غیر یکنواخت، انیشتین [4] بود. میلر [5]، کلزر و لین [6] و کامورا [7] روابطی را برای محاسبه وزن واحد حجم ظاهری رسوبات با در نظر گرفتن زمان ارائه دادند. چرچیل [8]، براون [9]، بر مبنای داده‌های جمع آوری شده از تعداد ۴۴ مخزن در سال ۱۹۵۳ و برون [10] برای تخمین راندمان تله اندازه‌گیری روابطی را ارائه دادند. موریس [11] یک سری از مدل‌های تجربی بر اساس نقشه برداری و مشاهدات صحرائی تهیه کرد که برای تخمین مقدار بار رسوب سالانه مخزن (RSL)، بار تجمعی رسوب مخزن (ARSL)، بکار برده شدند. همچنین چندین مدل ریاضی بر اساس معادلات حرکت و پیوستگی آب و رسوب برای پیش‌بینی رسوب گذاری مخازن تهیه کرد. با این وجود، در عمل مدل‌های تجربی به طور وسیع به کار برده می‌شوند. اندازه گیری بار رسوبی بوسیله روش‌های مختلفی امکان پذیر است: a. مشاهده همزمان بار رسوب معلق و دبی جریان، b. استفاده از منحنی های سنجه، c. محاسبه کل خاک فرسایش یافته و حجم رسوبات ته نشین شده در حوزه های کوچک، e. اندازه گیری حجم رسوب در داخل آبخیز ها، دریاچه ها و یا مخازن سدها [12]. در این تحقیق از روش منحنی های سنجه با ۷ مدل مختلف استفاده شد. اهداف تحقیق به ترتیب زیر می- باشد: a- مقایسه ۷ مدل تجربی برای برآورد بار رسوب سدها و بررسی صحت و درستی آنها، b- ارائه مدل مناسب جهت برآورد بار کل رسوب در رودخانه ها، c- برآورد حجم رسوب سد دوستی.

۲. مواد و روش‌ها

۱,۲ منطقه مورد مطالعه

مساحت کل حوضه آبریز ۷۰۶۰۰ کیلومتر مربع، ۴۵ درصد خاک افغانستان، ۴۰ درصد ایران و ۱۵ درصد در ترکمنستان است. حوضه آبریز هریرود در ایران از شاخه فرعی جام رود، جنت آباد و صالح آباد، کشف رود و شورلق و دولت آباد تشکیل شده است [۱۳]. رودخانه هریرود از ارتفاعات هندوکش در خاک افغانستان سرچشمه گرفته، پس از طی ۹۰۰ کیلومتر به مرز ایران می‌رسد و بعد از طی حدود ۲۴۰ کیلومتر از طریق مرز شهر مرزی سرخس به خاک ترکمنستان وارد می‌گردد. این رودخانه پرآب‌ترین رودخانه خراسان و دارای رواناب متوسط یک میلیارد متر مکعب می‌باشد. تغییرات رواناب سالانه آن بین یکصد میلیون تا چهار میلیارد متر مکعب است [۱۴]. سد دوستی از نوع خاکی سنگریزه‌ای با هسته رسی است که ارتفاع آن از پی ۷۸ متر، طول تاج ۶۵۵ متر و عرض تاج ۱۵ متر، حجم کل مخزن ۱ میلیارد و ۲۵۰ میلیون متر مکعب و حجم آب قابل تنظیم سالانه ۸۲۰ میلیون متر مکعب است.

۲,۲ آمار و مطالعات

در این مطالعه پس از جمع‌آوری داده‌های همزمان دبی رسوب معلق-دبی جریان به مدت ۳۴ سال از سال‌های آماری ۱۳۴۶ تا ۱۳۸۰ در ایستگاه‌های هیدرومتری هریرود-پل خاتون و کشف رود پل خاتون از شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان رضوی، این ایستگاه‌ها مناسب تشخیص داده شد بدین صورت که پس از برآورد رسوب هر ایستگاه به صورت جداگانه داده‌های کشف‌رود از داده‌های ایستگاه هریرود کم شد و حجم ورودی رسوب خالص به سد محاسبه شد.

برای محاسبه مقدار رسوب متوسط سالانه در این مطالعه از فرمول توانی منحنی سنجه برآورد رسوب که در آن دبی رسوب به دبی جریان عبوری در هر ایستگاه ارتباط داده می‌شود استفاده شد [۱۵].

$$Q_s = a Q_w^b \quad (1)$$

که در آن Q_s دبی باررسوبی (ton/day)، Q_w دبی جریان (m^3/sec) و a, b پارامترهای ثابت می‌باشند. با داشتن دبی‌های روزانه جریان در طول دوره آماری مشخص و قرار دادن آنها در فرمول توانی به دست آمده برای هر ایستگاه و سپس تقسیم مقدار حاصله بر طول دوره آماری دبی روزانه، مقدار متوسط بار رسوبی برای هر ایستگاه در کل سال محاسبه شد. محاسبات آماری نشان می‌دهند که مقدار بار رسوبی یک رودخانه وقتی غلظت‌ها از دبی جریان خروجی تخمین زده می‌شود و از رگرسیون حداقل مربعات از متغیرهای لگاریتم گرفته شده استفاده می‌شود، از مقدار واقعی کمتر تخمین زده می‌شود. برای اصلاح مقادیر اندازه‌گیری شده توسط منحنی سنجه چندین فرم از فاکتورهای اصلاح شیب a پیشنهاد شده است. در این بررسی از ضریب اصلاحی FAO استفاده شد که در آن مقدار a در رابطه ۱ به صورت زیر تعدیل می‌شود:

$$a' = \frac{\bar{Q}_s}{\bar{Q}_w^b} \quad (2)$$

که در آن a' ضریب FAO، \bar{Q}_s متوسط بار رسوب روزانه (ton/day)، \bar{Q}_w متوسط دبی جریان روزانه (m^3/s) می‌باشد. در ادامه a' جایگزین a در فرمول ۱ می‌شود و مجدداً بار رسوب از روی رابطه جدید محاسبه می‌گردد.

همچنین ضریب فرگوسن [۱۶] برای اصلاح مقادیر رسوبی استفاده شد. در این روش مقدار کاهش پیش‌بینی بار رسوبی توسط منحنی سنجه متناسب با اندازه پخشیدگی داده‌ها در اطراف خط رگرسیونی می‌باشد

$$CF = 2.651S^2 \quad (3)$$

که در آن S^2 متوسط مربعات خطا در رگرسیون داده‌های لگاریتم (\log_{10}) تعریف شده است و CF ضریب اصلاح اریب (شیب) می‌باشد. این ضریب کاهش در تخمین باررسوبی، در اثر پخش شدگی داده‌ها در اطراف خط رگرسیونی و تبدیل لگاریتمی داده‌ها را از بین می‌برد.

راندمان تله اندازی درصدی از مواد رسوبی وارد شده به مخزن را که ته‌نشین می‌شوند را نشان می‌دهد. راندمان تله اندازی تابعی است از نسبت C/IW که C ظرفیت مخزن و IW کل آب سالیانه وارده به مخزن (آبدهی سالیانه) می‌باشد. روش برون و روش چرچیل از جمله روش‌های مورد استفاده برای برآورد راندمان تله اندازی می‌باشد که در این تحقیق روش برون مورد استفاده قرار گرفت. این روش بر مبنای داده‌های جمع‌آوری شده از تعداد ۴۴ مخزن ارایه گردیده که به منحنی‌های تله اندازی برون معروف هستند. همچنین انتخاب هر یک از سه منحنی برون، بر اساس اندازه ذرات رسوبی خواهد بود. معادله این منحنی‌ها برای سال t ام به صورت زیر می‌باشد:

$$TE_t = a_3 + b_3 \{ \log_{10}(C_{t-1}/IW_t) \}^2 \quad (4)$$

که در آن TE_t ، راندمان تله اندازی در سال t ام بر حسب درصد، C_{t-1} حجم مفید مخزن (m^3) در شروع سال t ، a_3 و b_3 ضرایب منحنی‌های براون و

IW_t ، آبدهی سالیانه (m^3) می‌باشند. باید توجه داشت که به علت رسوب گذاری در مخزن، از حجم آن به تدریج کاسته می‌گردد و در نتیجه نسبت C/IW و به تبع آن راندمان تله اندازی نیز کاهش می‌یابد. بنا بر این در محاسبه TE لازم است تا کاهش تدریجی ظرفیت مخزن نیز مد نظر باشد. همچنین برای تعیین وزن مخصوص رسوبات با گذشت زمان از روابط معروف لین و کولزر همچنین میلر استفاده شد که میلر رابطه لین و کولزر را تصحیح کرده و معادله زیر را ارائه داده است: [9]

$$W_t = W_1 + 0.4343K \left[\left(\frac{t}{t-1} \right) \ln t - 1 \right] \quad (5)$$

که در آن W_t متوسط وزن حجمی رسوبات پس از t سال بهره برداری از مخزن (kg/m^3) و W_1 وزن مخصوص اولیه رسوبات (kg/m^3) و t ، تعداد سالهایی که بعد از آن وزن حجمی محاسبه می‌شود، k ثابت معادله که از فرمول زیر به دست می‌آید.

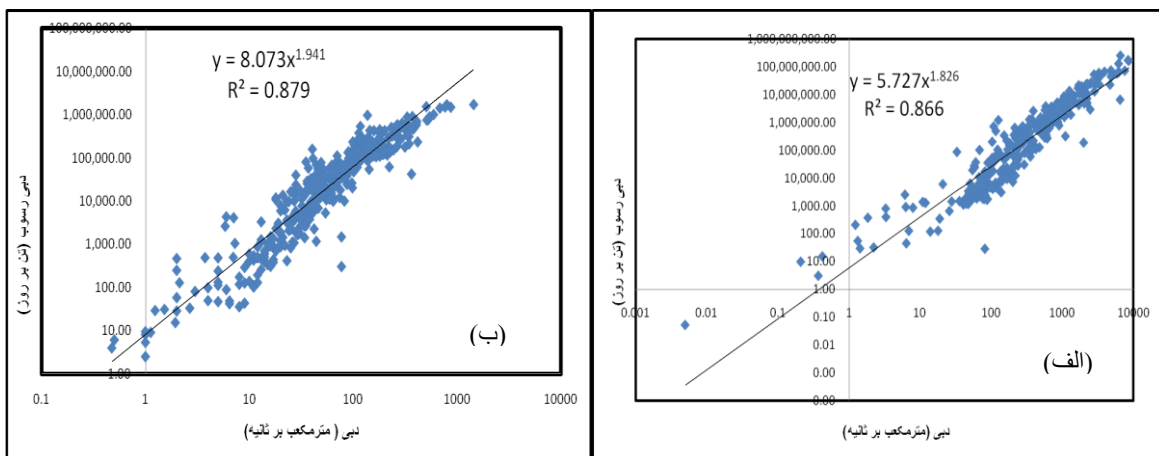
$$K = 0.01[K(c)P(c) + K(m)P(m) + K(s)P(s)] \quad (6)$$

و $K(c)$ ، $K(m)$ و $K(s)$ به ترتیب ثابت‌های تحکیم رس، سیلت و ماسه و $P(c)$ ، $P(m)$ و $P(s)$ به ترتیب درصد ذرات رس، سیلت و ماسه می‌باشد. همچنین در این تحقیق برای آنالیزها از نرم افزارهای Excel و Matlab استفاده شد.

۳. نتایج

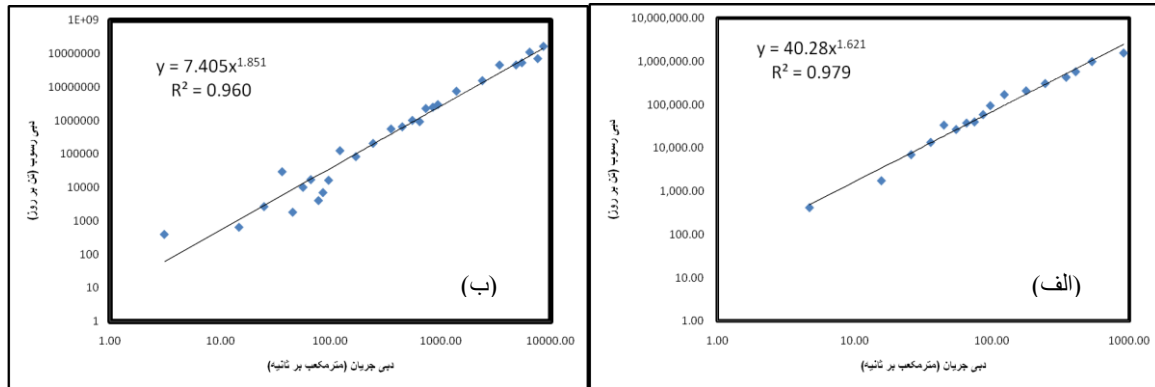
در ابتدا بر اساس روش‌های ارایه شده در بخش مواد و روش‌ها که در کل ۷ روش را شامل می‌شد، به برآورد سرعت کاهش حجم سد دوستی پرداخته شد. بدین منظور پارامترهای رسوبی که شامل مقدار رسوب ورودی، راندمان تله اندازی و وزن حجمی رسوبات ته نشین شده می‌باشد، برآورد گردید. قابل ذکر است که دبی رسوب ورودی به سد دوستی بر اساس آمار آبیسنجی و رسوب سنجی ایستگاه‌های پل خاتون و روش‌های ذکر شده برآورد و در نهایت نتایج روش‌ها با سایر تحقیقات صورت گرفته در این زمینه مورد مقایسه قرار گرفت. در ذیل آنالیز هر روش با ذکر جداول و نمودارها آمده است. مشکلی که در استفاده از این روش‌ها وجود دارد این است که آمار مطلوبی از دبی رسوب در مواقع سیلابی در ایستگاه‌ها ثبت نشده است لذا رابطه همبستگی استخراج شده بین دبی آب و دبی رسوب قدری می‌تواند همراه با نتایج دست پایین باشد که لازم است در انتخاب روش‌ها، این مشکل مد نظر باشد. لازم به ذکر است که روابط بر اساس روابط نمایی استخراج شده، که رابطه مورد قبول بین دبی آب و دبی رسوب است. همچنین حداقل سطح معنی دار بودن ۵٪ در نظر گرفته شد.

برای برآورد دبی سالیانه رسوب به روش همبستگی سالیانه، روابط همبستگی هر سال بر اساس مشاهدات همزمان دبی رسوب و آب به دست آمد و رابطه همبستگی برای روش USBR برای ایستگاه‌های هریرود- پل خاتون و کشف رود - پل خاتون به صورت شکل ۱ الف و ب حاصل شد و برای روش متوسط دسته‌ها به صورت شکل ۲ الف و ب ارائه گردید.



خطوط ممتد — خطوط رگرسیون و علامت‌های ♦ مقادیر مشاهده ای می‌باشد.

شکل ۱- رابطه دبی رسوب - دبی با روش USBR در طول دوره آماری (از سال ۱۳۴۶ تا ۱۳۸۰)،
(الف) - ایستگاه هریرود - پل خاتون و (ب) - ایستگاه کشف رود - پل خاتون.



خطوط ممتد — خطوط رگرسیون و علامت‌های ♦ مقادیر مشاهده ای می باشد.

شکل ۲- رابطه دبی رسوب - دبی با روش متوسط دسته‌ها در طول دوره آماری (از سال ۱۳۴۶ تا ۱۳۸۰)،
(الف) - ایستگاه هریرود - پل خاتون و (ب) - ایستگاه کشف رود - پل خاتون.

روش اصلاحی FAO را بر روی دو روش USBR و متوسط دسته‌ها انجام شد و با استفاده از فرمول ۲ ضریب اصلاحی \hat{a} محاسبه و پس از قرار دادن \hat{a} در فرمول ۱ محاسبات را دوباره تکرار شد (جدول ۱).

جدول (۱): تأثیر ضریب FAO بر روی دو روش USBR و متوسط دسته‌ها برای ایستگاه‌های هریرود - پل خاتون و کشف رود - پل خاتون

تأثیر ضریب FAO بر روی روش متوسط دسته‌ها			تأثیر ضریب FAO بر روی روش USBR			نام ایستگاه
\hat{a}	b	a	\hat{a}	b	a	
110/94	1/621	40/280	41/75	1/941	8/073	هریرود - پل خاتون
154/95	1/851	7/405	107/26	1/826	5/727	کشف رود - پل خاتون

روش اصلاحی دیگر روش فرگوسن بود که این روش را نیز بر روی دو روش USBR و متوسط دسته‌ها تأثیر داده شد که پس از محاسبه CF از فرمول ۳ و ضرب آن در فاکتور \hat{a} ، ضریب اصلاح شده \hat{a} حاصل شد و با این ضریب محاسبات دوباره انجام گرفت (جدول ۲).

جدول (۲): تأثیر ضریب فرگوسن بر روی دو روش USBR و متوسط دسته‌ها برای ایستگاه‌های هریرود - پل خاتون و کشف رود - پل خاتون

تأثیر ضریب فرگوسن بر روی روش متوسط دسته‌ها					تأثیر ضریب فرگوسن بر روی روش USBR					نام ایستگاه
\hat{a}	CF	S^2	b	a	\hat{a}	CF	S^2	b	a	
104/526	2/595	0/979	1/621	40/280	18/810	2/330	0/879	1/941	8/073	هریرود-پل خاتون
18/846	2/545	0/960	1/851	7/405	13/149	2/296	0/866	1/826	5/727	کشف رود- پل خاتون

نتایج برآورد رسوب سالیانه را برحسب تن در روز با استفاده از این ۷ روش برای ایستگاه هریرود - پل خاتون و کشف رود پل خاتون در جدول ۳ و برای کشف رود - پل خاتون در جدول ۴ آمده است.

جدول شماره (۳): نتایج برآورد دبی رسوب سالیانه (ton/day) برای ایستگاه هریرود - پل خاتون با استفاده از روش‌های مختلف

روش سال	همبستگی سالیانه	USBR	متوسط دسته‌ها	FAO, USBR	FAO, متوسط دسته‌ها	فرگوسن، متوسط دسته‌ها	فرگوسن، USBR
۱۳۴۶ - ۴۷	19508	۱۳۸۸۹	14574	۷۱۸۲۵	40140	37819	32360
۱۳۴۷ - ۴۸		۱۱۱۷۷۰	91043	۵۷۸۰۲۶	250753	236256	260423
۱۳۴۸ - ۴۹	1048	۲۹۴۳	4491	۱۰۲۱۹	12370	11655	6857
۱۳۴۹ - ۵۰	1796	۸۴۷	1085	۴۳۸۱	2990	2817	1974
۱۳۵۰ - ۵۱	84386	۲۷۶۹۴	28247	۱۴۳۲۲۳	77797	73299	64528
۱۳۵۱ - ۵۲	22672	۱۳۵۰۸	15356	۶۹۸۶۰	42295	39850	31475
۱۳۵۲ - ۵۳	5461	۷۲۳۸	8702	۳۷۴۳۱	23967	22581	16864
۱۳۵۳ - ۵۴	75015	۴۱۵۳۶	38761	۲۱۴۸۰۴	106756	100584	96777
۱۳۵۴ - ۵۵	22692	۷۹۰۸۵	61567	۴۰۸۹۹۳	169568	159765	184267

10593	6574	11243	۱۴۵۹۱	4082	۲۸۲۱	2417	۱۳۵۵-۵۶
20537	13064	21798	۲۸۹۹۵	7914	۵۶۰۷	5654	۱۳۵۶-۵۷
24448	18109	25948	۴۰۱۹۵	9421	۷۷۷۲	20596	۱۳۵۷-۵۸
170951	179448	181441	۳۹۸۲۹۷	65878	۷۷۰۱۷	149091	۱۳۵۸-۵۹
110102	116175	116858	۲۵۷۸۵۸	42429	۴۹۸۶۱	41392	۱۳۵۹-۶۰
138456	143114	146952	۳۱۷۶۵۰	53355	۶۱۴۲۲	74164	۱۳۶۰-۶۱
275098	320042	291978	۷۱۰۳۵۳	106011	۱۳۲۷۵۸	198241	۱۳۶۱-۶۲
35438	31836	37613	۷۰۶۶۱	13656	۱۳۶۶۳	2844	۱۳۶۲-۶۳
2773	1308	2944	۲۹۰۳	1069	۵۶۱	1270	۱۳۶۳-۶۴
35511	30039	37690	۶۶۶۷۴	13685	۱۲۸۹۲	68036	۱۳۶۴-۶۵
19535	14523	20734	۳۲۲۳۵	7528	۶۲۲۳	9708	۱۳۶۵-۶۶
52672	54804	55904	۱۲۱۶۴۱	20298	۲۳۵۲۱	36899	۱۳۶۶-۶۷
102335	95003	108615	۲۱۰۸۶۵	39436	۴۰۷۷۴	15047	۱۳۶۷-۶۸
230221	265223	244348	۵۸۸۶۸۰	88718	۱۱۳۸۳۰	57778	۱۳۶۸-۶۹
۹۸۴۷۰	۱۰۵۲۶۱	۱۰۴۵۱۲	۲۳۳۶۳۵	۳۷۹۴۶	۴۵۱۷۷	۲۵۷۸۶۳	۱۳۶۹-۷۰
393558	476280	417708	۱۰۵۷۱۳۵	151661	۲۰۴۴۱۳	266413	۱۳۷۰-۷۱
348009	394435	369364	۸۷۵۴۷۵	134108	۱۶۹۲۸۶	6092587	۱۳۷۱-۷۲
25984	17144	27578	۳۸۰۵۲	10013	۷۳۵۸	18506	۱۳۷۲-۷۳
105976	103636	112479	۲۳۰۰۲۸	40839	۴۴۴۷۹		۱۳۷۳-۷۴
106448	102489	112979	۲۲۷۴۸۱	41020	۴۳۹۸۷	143400	۱۳۷۴-۷۵
90335	96473	95879	۲۱۴۱۲۸	34812	۴۱۴۰۵	36349	۱۳۷۵-۷۶
239667	277564	254374	۶۱۶۰۷۲	92358	۱۱۹۱۲۷	51	۱۳۷۶-۷۷
25904	20719	27494	۴۵۹۸۷	9982	۸۸۹۲		۱۳۷۷-۷۸
209	60	222	۱۲۲	80	۲۶	1	۱۳۷۸-۷۹
126	42	133	۹۲	48	۱۸		۱۳۷۹-۸۰

جدول (۴): نتایج برآورد دبی رسوب سالیانه (ton/day) برای ایستگاه کشف رود - پل خاتون با استفاده از روش های مختلف

فرگوسن، متوسط دسته‌ها	فرگوسن، USBR	FAO, متوسط دسته‌ها	FAO, USBR	متوسط دسته‌ها	USBR	همبستگی سالیانه	روش سال
687	440	5649	۳۵۹۱	270	۱۹۲	143	۱۳۴۶-۴۷
1715	1100	14102	۸۹۷۵	674	۴۷۹		۱۳۴۷-۴۸
137	87	1125	۷۰۹	54	۳۸	0	۱۳۴۸-۴۹
109	69	893	۵۶۴	43	۳۰		۱۳۴۹-۵۰
2099	1308	17257	۱۰۶۶۸	825	۵۷۰	804	۱۳۵۰-۵۱
1131	717	9296	۵۸۵۲	444	۳۱۲	128	۱۳۵۱-۵۲
1036	650	8515	۵۳۰۳	407	۲۸۳	82	۱۳۵۲-۵۳
3	2	26	۱۸	1	۱	0	۱۳۵۳-۵۴
25291	15244	207942	۱۲۴۳۴۹	9937	۶۶۳۹	1505	۱۳۵۴-۵۵
1503	930	12358	۷۵۸۶	591	۴۰۵	65	۱۳۵۵-۵۶
168	111	1381	۹۰۳	66	۴۸	3	۱۳۵۶-۵۷
406	264	3341	۲۱۵۴	160	۱۱۵	45	۱۳۵۷-۵۸
499	322	4101	۲۶۲۶	196	۱۴۰	28	۱۳۵۸-۵۹
7276	4472	59821	۳۶۴۸۰	2859	۱۹۴۸	713	۱۳۵۹-۶۰
1832	1148	15062	۹۳۶۷	720	۵۰۰	90	۱۳۶۰-۶۱
301	191	2471	۱۵۵۹	118	۸۳	21	۱۳۶۱-۶۲
372	236	3055	۱۹۲۳	146	۱۰۳		۱۳۶۲-۶۳
70	45	573	۳۶۸	27	۲۰	22	۱۳۶۳-۶۴
52	35	425	۲۸۲	20	۱۵	2	۱۳۶۴-۶۵
61	40	498	۳۲۴	24	۱۷	2	۱۳۶۵-۶۶
1839	1125	۱۵۱۲۴	۹۱۷۷	۷۲۳	۴۹۰	167	۱۳۶۶-۶۷
6	4	47	۳۲	2	۲	0	۱۳۶۷-۶۸
13	9	108	۷۱	5	۴	2	۱۳۶۸-۶۹
439	278	3607	۲۲۶۴	172	۱۲۱	35	۱۳۶۹-۷۰
1167	738	9593	۶۰۲۳	458	۳۲۲	413	۱۳۷۰-۷۱
2005	1259	16488	۱۰۲۷۱	788	۵۴۸		۱۳۷۱-۷۲
82	54	672	۴۳۷	32	۲۳	1	۱۳۷۲-۷۳
54	35	447	۲۸۸	21	۱۵		۱۳۷۳-۷۴
172	110	1413	۸۹۳	68	۴۸	3	۱۳۷۴-۷۵
1488	915	12231	۷۴۶۸	585	۳۹۹	61	۱۳۷۵-۷۶
10330	6182	84931	۵۰۴۲۸	4059	۲۶۹۳		۱۳۷۶-۷۷
200	129	1641	۱۰۵۶	78	۵۶		۱۳۷۷-۷۸
0	0	0	۰	0	۰		۱۳۷۸-۷۹
2	1	13	۹	1	۰	15	۱۳۷۹-۸۰

اندازه گیری و تخمین بار بستر معمولاً بسیار پیچیده بوده و از این رو رقمی بین ۱۰ تا ۲۰ درصد بار معلق را به عنوان بار بستر در نظر می گیرند، که برای این تحقیق متوسط آن، ۱۵ درصد در نظر گرفته شد. نتایج متوسط بار معلق روزانه، بار بستر روزانه و بار کل رسوبی رودخانه های هریرود و کشف رود و همچنین بار رسوب ورودی به سد دوستی با استفاده از روش های مختلف در جدول شماره ۵ آورده شده است.

جدول شماره (۵): متوسط بار رسوبی روزانه ورودی به سد دوستی با روش های مختلف (ton/day)

روش	نوع رسوب	رودخانه هریرود	رودخانه کشف رود	ورودی به سد
همبستگی سالیانه	بار معلق	۲۵۷۸۶۳	۱۶۷	۲۵۷۶۹۶
	بار بستر	38679	25	38654
	بار کل	296542	192	296350
USBR	بار معلق	۴۵۱۷۷	۴۹۰	44687
	بار بستر	6777	74	6703
	بار کل	51954	564	51390
متوسط دسته ها	بار معلق	۳۷۹۴۶	۷۲۳	37223
	بار بستر	5695	108	5587
	بار کل	43641	831	42810
FAO, USBR	بار معلق	۲۳۳۶۳۵	۹۱۷۷	224458
	بار بستر	35045	1377	33668
	بار کل	268680	10554	258126
متوسط دسته ها FAO,	بار معلق	۱۰۴۵۱۲	۱۰۱۲۴	89388
	بار بستر	15677	2269	13408
	بار کل	120189	17393	102796
فرگوسن، USBR	بار معلق	۱۰۵۲۶۱	1125	104136
	بار بستر	15789	169	15620
	بار کل	121050	1294	119756
فرگوسن، متوسط دسته ها	بار معلق	۹۸۴۷۰	1839	96631
	بار بستر	14770	276	14494
	بار کل	113240	2115	111125

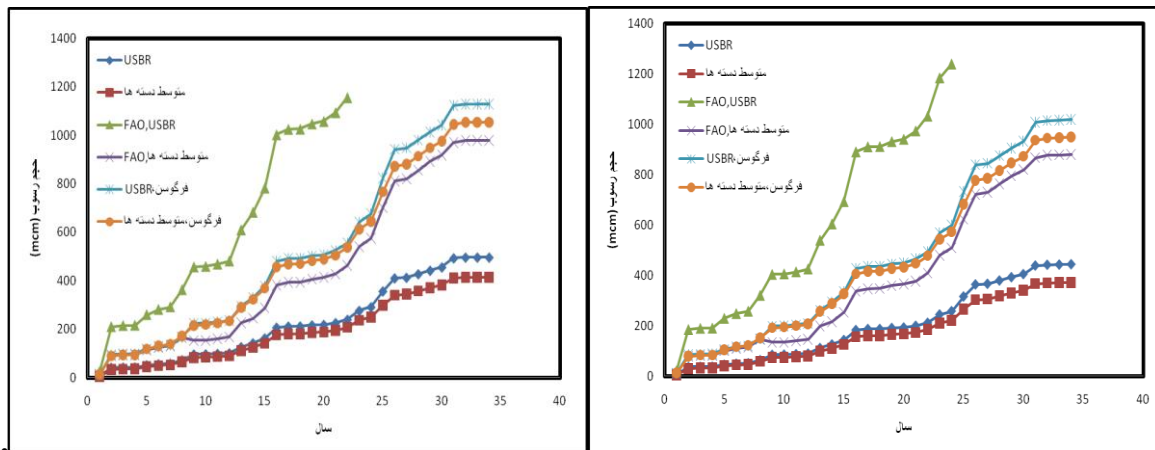
برای تبدیل بار رسوب وزنی به حجم، از روابط ارائه شده توسط لین و کولزر و میلر استفاده شد. طبق نتایج این روش ها وزن حجمی اولیه رسوبات به ترتیب برابر 1371/3، 1392/1 و 994/4 کیلوگرم بر متر مکعب برآورد می شود و پس از ۳۴ سال با روش های لین و کولزر و میلر به ترتیب 1411/8 و 1246/5 کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد. در این تحقیق با توجه به وضعیت سد دوستی، رسوبات داخل مخزن از نوع 2 یعنی به طور معمول و متعادل سطح آب در مخزن تغییر می کند، در نظر گرفته شد. همان طور که در بخش قبل اشاره شد راندمان تله اندازی با نسبت C/IW ارتباط مستقیمی داشته و از روی منحنی برون به دست می آید. پس از محاسبه پارامترهای رسوبی برای تخمین سرعت کاهش حجم مخزن از روش توضیح داده شده در بخش مواد و روش ها استفاده شد که نتایج محاسبات برای روش های مختلف در جدول ۶ آمده است.

جدول (۶): نتایج محاسبات حجم مفید مخزن سد دوستی با استفاده از روش های مختلف (mcm)

سال	USBR	متوسط دسته ها	FAO, متوسط دسته ها	فرگوسن، USBR	فرگوسن، متوسط دسته ها
1	1245/42	1245/22	1227/18	1239/32	1237/58
2	1208/94	1215/59	1040/71	1154/32	1160/71
3	1207/96	1214/10	1035/85	1152/06	1156/85
4	1207/69	1213/75	1034/56	1151/41	1155/94
5	1198/66	1204/63	990/56	1130/40	1132/26
6	1194/26	1199/65	969/21	1120/13	1119/34
7	1191/93	1196/87	958/46	1114/70	1112/12
8	1178/17	1184/03	887/58	1082/67	1078/84
9	1154/15	1166/91	793/70	1026/72	1034/32
10	1153/34	1165/74	791/35	1024/82	1031/27
11	1151/48	1163/11	781/99	1020/49	1024/46
12	1148/92	1160/01	769/29	1014/53	1016/43
13	1123/62	1138/40	640/57	955/77	960/51
14	1107/72	1125/26	567/85	918/78	926/45
15	1087/60	1107/87	467/92	872/09	881/51
16	1042/95	1073/41	247/50	768/93	792/85
17	1038/42	1068/90	225/13	758/41	781/17

780/26	757/99	856/76	224/29	1068/55	1038/24	18
768/45	748/00	844/34	202/80	1063/98	1033/94	19
761/95	743/16	837/58	192/39	1061/47	1031/86	20
745/04	725/31	824/00	156/30	1054/94	1024/17	21
711/54	694/23	788/36	93/95	1041/92	1010/72	22
637/47	609/00	709/43		1012/97	973/61	23
605/30	574/59	676/23		1000/45	958/69	24
483/45	427/54	548/44		952/00	893/42	25
377/69	308/82	439/37		909/29	839/54	26
369/19	303/24	430/51		905/96	837/10	27
335/44	270/62	394/54		892/52	822/49	28
301/77	238/64	358/86		879/05	808/06	29
273/29	208/40	331/85		867/72	794/50	30
204/05	129/09	279/72		839/01	756/77	31
195/68	122/51	271/23		835/70	753/82	32
195/60	122/48	271/14		835/67	753/80	33
195/54	122/45	271/08		835/64	753/79	34

در انتها مقایسه نتایج روش های مختلف با استفاده از ارقام حاصل از هیدروگرافی سد دوستی می تواند روش برتر محاسبه رسوب سالیانه را نیز مشخص نماید. این مقایسه به خوبی در نمودارهای ۵ و ۶ قابل مشاهده است.



شکل ۶- مقایسه نتایج روش های مختلف برای برآورد حجم رسوب با روش Lane & Koelzer

شکل ۵- مقایسه نتایج روش های مختلف برای برآورد حجم رسوب با روش Miller

۴. بحث و نتیجه گیری

با توجه به نتایج بالا مشاهده می شود روش های USBR و متوسط دسته ها معمولاً روابط برآزش داده شده از بین دبی آب و رسوب، بار رسوبی را کمتر از مقدار واقعی برآورد می کند و این مشکل به این علت است که تعداد برداشت دبی رسوب در مواقع سیلابی بسیار کم، بالعکس برداشت دبی رسوب در مواقع دبی پایین زیاد می باشد، لذا در برآزش منحنی به کل آمار فرمول ایجاد شده، دبی های پایین را بهتر برآورد کرده و در برآورد دبی های بالا دچار مشکل می شود که برای حل این مشکل در این پژوهش از ضرایب تعدیل (افزایش دهنده) FAO و فرگوسن بر روی دو روش USBR و متوسط دسته ها استفاده شد که با توجه به اشکال ۵ و ۶ این افزایش به خوبی قابل مشاهده است. شایان ذکر است که روش همبستگی سالانه به علت کمبود آمار در بعضی از سال های آماری (جداول ۳ و ۴) از محاسبات حذف شد. در روش FAO-USBR با توجه به نمودارهای ۵ و ۶ مشاهده شد که این روش مقدار تخمین حجم رسوب را بیشتر از میزان واقعی تخمین می زند و علت آن با توجه به شکل ۲، خط رگرسیونی که به صورت توانی رسم می شود برای داده های لگاریتمی به حالت مستقیم است حال آنکه دبی مشاهده ای در دبی های بالا و سیلابی به صورت انحنا و تعادل می رسد که با تأثیر ضریب FAO، برآورد رسوب از حد انتظار بالاتر می رود. اما برای افزایش سهم دبی های یکی از روش ها این است که دبی ها را دسته بندی کرده متوسط هر دسته را به دست آورده و بین متوسط دسته های دبی جریان و متوسط دسته های دبی رسوب رگرسیون گرفته شود که روش متوسط دسته ها حاصل می شود و با تأثیر ضرایب FAO و همچنین ضریب تعدیل فرگوسن، همان طور که در شکل های ۵ و ۶ دیده می شود نزدیک به هم و بهترین روش ها در گروه منحنی های

سنجه می‌باشد. همچنین تحقیقات دانکو [۱۷]، گنجی نوروزی [۱۸]، ناظریان [۱] در این زمینه مویید این نکته می‌باشد. این که متوسط راندمان تله اندازی همه روش‌های به کار گرفته شده در بازه ۹۶ تا ۹۸ درصد بوده و تفاوت چندانی با یکدیگر نداشته نکته دیگر در این تحقیق است. قابل ذکر است که در این تحقیق برای محاسبه وزن مخصوص رسوبات مخزن در طول ۳۴ سال از دو روش میلر و لین و کولزر استفاده شد که رابطه لین و کولزر چگالی نخستین سال رسوب گذاری پس از t سال تحکیم را نشان می‌دهد در حالی که مسأله مورد علاقه ما، متوسط چگالی در طی t سال جهت محاسبه فضای لازم برای ورود مداوم رسوب به داخل مخزن می‌باشد. این مسأله توسط فرمول میلر تأمین می‌شود. معادله اصلاح شده میلر وزن حجمی مربوط به معادله لین و کولزر را به متوسط وزن حجمی برای t سال تبدیل می‌کند. با توجه به نتایج و روش‌های تجربی مورد استفاده مناسب زمان پر شدن مخزن در حدود ۳۵ تا ۴۰ سال می‌باشد که این زمان با توجه به فرمول‌های به کار رفته بدون احتساب عملیات تخلیه رسوب مخزن، فلاشینگ و فعالیت‌های باز دارنده و حفاظتی مخزن می‌باشد.

همچنین تخمین زده شده که کاهش سالانه توانایی ذخیره سدهای جهان به دلیل ته نشین شدن رسوبات تقریباً ۰/۵ تا ۱ درصد حجم مخزن می‌باشد که برای بسیاری از سدها این مقدار بالاتر از ۴ تا ۵ درصد بوده و در نتیجه اغلب سدها قسمت اصلی توانایی ذخیره آب خود را در طول ۲۵ تا ۳۰ سال از دست می‌دهند [۲]. با توجه به این نکته و نتایج بالا این مخزن عملکردی متعادل دارد. شایان ذکر است که در این سد به دلیل تازه به بهره برداری رسیدن و همچنین خشکسالی‌های مداوم پس از احداث سد عملیات رسوب سنجی انجام نگرفته و به طور متوسط در سدهای ایران هر ۱۰ تا ۱۵ سال یک مرتبه این کار صورت می‌گیرد همچنین عملیات رسوب سنجی با توجه به نکات بالا و این که داده‌های این تحقیق مربوط به قبل از احداث سد است منطقی نمی‌باشد و فاکتور مقایسه‌ای درستی نمی‌باشد.

۵. مراجع

۱. ناظریان، ح.، (۱۳۸۴)، "مدلهای رگرسیونی چند متغیره برآورد رسوب در شمال خراسان"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
۲. Verstraeten, G. J., Poesen, J. D. Vente, and Koninckx, X., (2003), "Sediment yield variability in Spain: aquantitative and semiquantitative analysis using reservoir sedimentation rates," (50), pp 327-348.
۳. Vanoni, V.A., (1975), "Sedimentation Engineering, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices," Vol (54).
4. Einstein, H.A., (۱۹۵۰), "The bed load function for sediment transportation in open channel flows," Tech Bulletin, No. ۱۰۲۶, United States.
۵. Miller, C. R., (۱۹۵۳), Determination of the unit weight of sediment for use in sediment volume computations, Bureau of Reclamation, Denver.
۶. Lane, E. W., and Koelzer, V. A., (۱۹۵۸), "Density of sediments deposited in reservoirs. A Study of methods used in measurement and analysis of sediment load in streams," Rep. No. ۹, Hydraulic lab, Univ of Iowa.
۷. Komura, S., (۱۹۶۳), Discussion: Erosion of Sediments. Task Committee on Preparation of Sediment Manual, J. of the Hydraulic Div., ASCE, Vol. ۸۹, No. HY 1, Proceeding, pp ۱۹۶۳-۳۴۰۵.
۸. Churchill, M.A., (۱۹۴۸), "Discussion of Analysis and use of reservoir sedimentation data," by L. C. Gottschalk. Proc., Fed. Interagency Sedimentation Conf., pp ۱۳۹-۱۴۰.
۹. Brune, G. M., (۱۹۵۳), "Trape efficiency of Reservoirs," Trans. AGU, ۳۴(۳), pp ۴۰۷-۴۱۸.
۱۰. Brown, C. B., (۱۹۵۸), "Sediment transportation. Engineering hydraulics," H. E. Rouse, ed., Wiley, New York .
۱۱. Morris, G. L., and J. Fan., (۱۹۹۸), "Reservoir sedimentation handbook," McGraw-Hill, New York, pp ۱۵-۳۰.
۱۲. Verstraeten, G., and J. Poesen., (2001), "Factors controlling sediment yield from small intensively cultivated catchments inatempere humid climate," Geomorphology (40), pp 123-144.
۱۳. وزارت نیرو، آب منطقه‌ای خراسان رضوی، "مشخصات هیدرولوژیکی رودخانه هریرود"، شماره ۶۲۲۳ .
۱۴. وزارت نیرو، آب منطقه‌ای خراسان رضوی، "گزارش خلاصه مشخصات و اهمیت طرح سد دوستی در منطقه مرزی سرخس"، شماره ۵۲۹۷.
۱۵. Harrison, C. G. A., (2000), "What factor control mechanical erosion rates," Int. J. Earth Sci. 531.
۱۶. Ferguson, R. I., (1986), "River loads underestimated by rating curves," Water Resources Research (22), pp 74-76.
۱۷. دانکو، علی، (۱۳۸۴)، "آنالیز عدم قطعیت برای برآورد حجم رسوب در مخزن سد"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ساری، ساری.
۱۸. گنجی نوروزی، زهرا، (۱۳۸۵)، "بررسی عدم قطعیت حجم رسوب مخازن (سد اکباتان)"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.