معرفی معادله رسوب معلق دلیری (۱۳۹۲) و لحاظ رسوب سیل در آنالیز آمار رسوب

فرهاد دلیری[۱]، حسن سید سراجی[۲]
۱- مدیر بخش هیدرولیک شرکت مهندسین آبسام
۲- هیات علمی دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی

[*۱]نویسنده مسئول: info@absam.ir

خلاصه

در پروژه های آبی و مدیریت آلودگی محیط زیست اغلب نیاز به بار رسوب معلق جهت مدیریت رواناب آلوده شهری و حمل آلاینده، آلودگی مخازن، طراحی حجم مرده مخازن سد، تدقیق تراز سیل، رقوم دریچه تحتانی سد، ابعاد حوضچه آرامش، سازه های آبخیزداری، تخلیه رسوب، و غیرو می باشد. در بسیاری از موارد فاصله ایستگاه معرف تا نقطه طراحی زیاد بوده و اغلب از دبی ویژه رسوب که نتایج نامناسبی ارائه می دهد جهت تعمیم آمار استفاده می گردد. در این خصوص معادله برآورد حوضه ای رسوب معلق دلیری (۱۳۹۲) پس از واسنجی با آمار ایستگاه های معرف، با خطای نسبی ۲۴٪ درصد امکان تعمیم نتایج را فراهم کرد. همچنین جهت لحاظ رسوب حین سیل در منحنی سنجه رسوب که اغلب اندازه گیری نمی شود و یا در صورت اندازه گیری، روش های آنالیز سنجه رسوب به درستی اثر آن را وارد محاسبات نمی کنند، روش شناسی کاربردی ارائه شد. بار معلق رسوب ورودی به مخزن سد رودبار لرستان با ۴ روش ۱-روش پیشنهادی دلیری (۱۳۹۲)، ۲-روش آنالیز دبی-رسوب روزانه، ۳-روش USBR، و ۴-روش FAO-USBR محاسبه و نتایج با رسوبگذاری مخزن سد پس از آبگیری مقایسه شد. نتایج حاکی از آن است که روش شناسی دلیری (۱۳۹۲) با کمترین خطا ۱۰,۶ درصد نسبت به سایر روش ها بار معلق حوضه ای را برآورد می نمایند.

کلمات کلیدی: بار معلق، تعمیم رسوب، رسوب سیل، رسوب ویژه، سد رودبار لرستان.

۱. مقدمه

برآورد نامناسب رسوب ورودی به مخازن سد و تاسیسات رسوبگیر، خسارت هنگفت مالی به همراه خواهد داشت. رسوبدهی حوضه و تولید بار شسته شده (Wash load) یا بار معلق ریز (Fine suspended load) به اختصار (S_L) طی فرایندهای فیزیکی فرسایش آبی شامل جداشدگی خاک-انتقال و رسوبگذاری ایجاد می شود[1]. درصورتیکه رسوبات از نوع چسبنده باشند (رس های ایلیت-کائولینیت-مونت موریلونیت) فرایندهای انتقال توسط نیرو های فیزیکوشیمیایی (ظرفیت تبادل کاتیونی، غلظت یونی) نسبت به نیروی سیال غالب می گردد[2].

غلظت رسوب به شرایط هیدرولوژیکی و اقلیم، توپوگرافی، کاربری و روش های مدیریتی خاک وابسته است. این موضوع توسط [3]، [4] و [5] نیز تایید شده است. بار کل رسوب حوضه در نقطه طراحی شامل جمع بار شسته شده حوضه یا بار معلق ریز (رس و سیلت) (S_L)، بار معلق درشت تر کف بستر عمدتا" شن و بار کف بستر بزرگتر از شن را شامل می شود. دو مورد اخیر بر اساس معادلات انتقال رسوب، و اندازه گیری میدانی رسوبات رودخانه به عنوان درصدی از بار معلق ریز (S_L) که در مقاله حاضر به آن پرداخته می شود بر اساس آنالیز آمار رسوب لحظه ای ایستگاهی و واسنجی مدل های هیدرولیکی یا تجربی فرسایش-رسوب حوضه مانند [6] WEPP، [7] USLE و روش هیدروفیزیکی[8] و یا سایر روش های مناسب برآورد می شوند. [9] متوجه شدند بار معلق حوضه ها (S_L) تنها به خصوصیات سیال و رسوب وابسته نیست، بلکه به میران تامین رسوبدهی حوضه های بالادست نیز وابسته است.

در مناطق دارای آمار رسوب می توان مقدار بار معلق (S_L) را از روش های آنالیز منحنی سنجه رسوب-دبی نیز محاسبه نمود. ولی اغلب، این روش ها خطای بالایی به ویژه برای تعمیم نتایج ناحیه ای خواهند داشت[10,11]. همچنین روش های مختلفی جهت تعمیم نتایج آنالیز رسوب لحظه ای ایستگاهی به مناطق فاقد آمار وجود دارد. برخی از روش ها مانند روش دبی ویژه رسوب به صورت خطی مقدار رسوب مناطق با رفتار خطی مشابه را برآورد می کنند. تعمیم با دبی ویژه رسوب به دلیل اختلاف مشخصات حوضه ایستگاه ها از نظر شیب، سازند، و کاربری نمی تواند نتایج قابل قبولی در

طرح های اجرایی ارائه نماید (۱۲). روش های تجربی مختلفی جهت رفع این مسئله و برآورد فرسایش حوضه ای و تبدیل آن به رسوب به کمک نسبت رسوبدهی (SDR) توسعه داده شده اند [13].

علاوه بر مسائل مذکور، روش های آنالیز منحنی سنجه رسوب-دبی اغلب نمی توانند اثر رسوبات حین سیل های مهم را حتی در صورت اندازه گیری در آمار ایستگاهی به خوبی وارد محاسبات کنند [14].

هدف مقاله حاضر الف-معرفی یک معادله کاربردی به منظور تعمیم و محاسبه بار رسوب معلق (S_L) ب- ارائه روش شناسی محاسبه لحاظ رسوبات حین سیل در منحنی سنجه رسوب و ج-کاهش خطای پراکنش معادله رگرسیون جهت بهبود نتایج آنالیز آمار رسوب ایستگاهی می باشد.

۲. مواد و روش ها

سد و نیروگاه برقابی رودبار لرستان از نوع ECRD با ارتفاع ۱۵۶ متر، شکل باریک (دره ای) در استان لرستان همراه ایستگاه های هیدرومتری سراب سد شامل کاظم آباد، گیلیان و زردفهره مورد مطالعه قرار گرفت. جهت محاسبه بار معلق ریز (S_L) ورودی به مخزن سد رودبار لرستان گام های زیر طی شد:

گام ۱- آنالیز آمار رسوب بار معلق ایستگاه های سراب سد

الف-روش آنالیز دبی-رسوب روزانه. معادله همبستگی دبی - رسوب اغلب به صورت نمایی و مشابه معادله ۱ می باشد [15]:

$$Q_s = a\,Q_w^b \qquad (۱)$$

که در آن Q_s دبی بار رسوب لحظه ای ($Ton\ day^{-1}$)، Q_w دبی جریان روزانه (m^3s^{-1}) و ضرائب a و b پارامترهای ثابت هستند. چنانچه مقدار دبی های روزانه کل آمار هر ایستگاه در معادله بالا قرار داده شود، و مقدار جمع Q_s بر طول دوره آماری روزانه هر ایستگاه تقسیم شود، متوسط بار رسوب معلق سالانه هر ایستگاه محاسبه می شود. جهت افزایش دقت می توان از چندین معادله برازش شده برای دبی های حدی مختلف استفاده نمود. در اینجا باتوجه به شکست داده ها، دبی ۱۰ (m^3s^{-1}) انتخاب شد.

ب-روش USBR. در این روش دبی کلاسه احتمالاتی جریان و منحنی سنجه رسوب باتوجه با توجه به بهترین برازش همبستگی دبی-رسوب، اقدام به برآورد بار رسوب روزانه متوسط دسته های احتمالاتی و سپس بار معلق سالانه می کند.

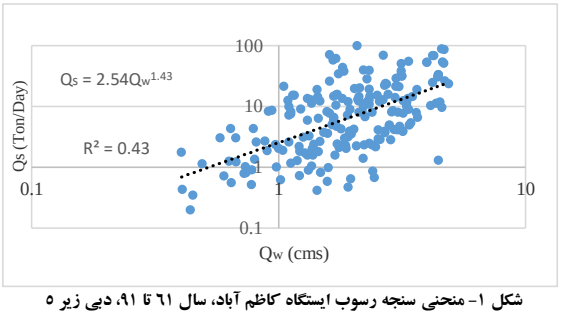
ج-روش FAO-USBR. باتوجه به اینکه در روش USBR و روش دبی-رسوب روزانه اساسا" منحنی معادله از میانه ابر نقاط عبور می کند لذا مقدار رسوب اغلب کمتر برآورد می شود. لذا نیاز به اصلاح شیب رابطه (ضریب a) در معادله ۱ می شود. در روش FAO ضریب تعدیل افزایشی a' به جای ضریب a در معادله ۱ قرار می گیرد.

$$a' = \frac{\overline{Q_s}}{Q_w^b} \qquad (۲)$$

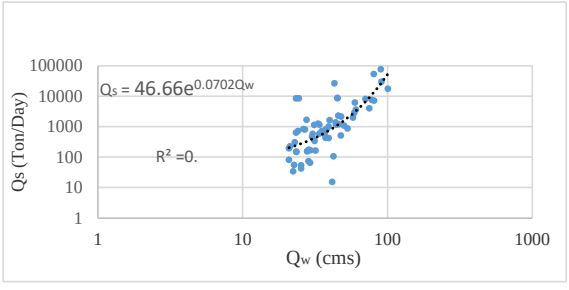
که $\overline{Q_s}$ متوسط بار رسوب روزانه ($Ton\ day^{-1}$)، و Q_w متوسط دبی جریان روزانه متناظر (m^3s^{-1}) می باشد. سپس مقدار a' در رابطه ۱ قرار گرفته و مجددا" محاسبات تکرار می شود.

د-روش پیشنهادی دلیری (۱۳۹۲).

در روش پیشنهادی دلیری ابتدا دبی های حد بالا و پایین برای هر سری آماری ایستگاه ها به کمک منحنی دبی-رسوب مشخص شد. به عنوان نمونه برای ایستگاه زردفهره و کاظم آباد و قلیان دبی های به ترتیب بیش از ۲۰ و کمتر از ۵ (m^3s^{-1}) جهت ترسیم منحنی سنجه دبی –رسوب انتخاب شد (شکل ۱ و ۲).



شکل ۱- منحنی سنجه رسوب ایستگاه کاظم آباد، سال ۶۱ تا ۹۱، دبی زیر ۵



شکل۲- منحنی سنجه رسوب ایستگاه زردفهره، سال ۶۱ تا ۹۱، دبی بیش از ۲۰

سپس بهترین توزیع همبستگی معادله ۱ برازش داده شد. باتوجه به دبی های روزانه از سال آبی ۱۳۶۱ الی ۱۳۹۱ مقدار سالانه تناژ و دبی ویژه بار معلق با لحاظ رسوبات حین سیل (گام ۲) و اصلاح تناژ بار معلق به دلیل خطای توزیع معادله (گام ۳) محاسبه و نتایج همراه نتایج سایر روش های آنالیز آماری USBR، FAO-USBR و روش آنالیز آمار دبی–رسوب مقایسه شد.

گام ۲– روش شناسی دلیری (۱۳۹۲) جهت لحاظ رسوبات حین سیل

ابتدا مقدار متوسط سری دبی حداکثر سالانه هر ایستگاه در سری آماری موجود به عنوان دبی شاخص (I_{Qmax}) انتخاب شد. سپس با کنترل دبی های روزانه هر ایستگاه، تعداد دبی هایی که بیشتر از (I_{Qmax}) هستند معادل n_i به عنوان رخداد سیل مهم رسوبدار برای هر سال y_i، شمارش گردید. لذا متوسط تعداد رخداد سالانه سیلاب های مهم رسوبدار در طول سری آماری معادل ($\bar{e}$) رخداد برای هر ایستگاه از رابطه ۳ محاسبه شد:

$$\bar{e} = \frac{\sum n_i}{\sum y_i} \quad (۳)$$

متوسط دبی لحظه ای سری آماری هر ایستگاه، معادل دبی سیلاب مهم رسوبدار ($Q_{highflow}$) لحاظ شد. مقدار دبی رسوب سیلاب مهم (Q_s) متناظر با ($Q_{highflow}$) از منحنی سنجه رسوب مشخص شد. سپس باتوجه به هیدروگراف سیل مربوطه و منحنی تدام جریان رسوب، سدیگراف رسوب مربوط به سیل مهم ترسیم و انتگرال آن، معادل حجم رسوب سیل مهم می باشد. بدیهی است با ضرب عرض های این سدیگراف در ($\bar{e}$)، حجم متوسط سالانه رسوب های سیلاب های مهم هر ایستگاه محاسبه می شود. در صورت عدم وجود ایستگاه می توان مراحل فوق را بر اساس شواهد محلی، داغاب و هیدروگراف مصنوعی سیل حوضه و منحنی تدام رسوب حوضه های معرف نیز با خطای بیشتر انجام داد.

گام ۳–ضریب تعدیل دلیری (۱۳۹۲) جهت اصلاح خطای همبستگی منحنی سنجه – رسوب

[Ferguson,1986] [16] فرض کرد مقدار کاهش پیش بینی بار معلق منحنی سنجه رسوب با C_f متناسب است. مقدار C_f برابر حاصلضرب عدد ۲,۶۵۱ در اندازه متوسط مربعات خطای رگرسیون لگاریتمی داده های با پایه ۱۰ (S^2) بوده که ضریب فرگوسن معادل $C_f = 2.651\ S^2 \times a$ در معادله ۱ می باشد. در تحقیق حاضر ضریب اصلاح دلیری (۱۳۹۲) (C_f) با مقدار متوسط خطای ضریب همبستگی منحنی های سنجه رسوب $1-\overline{R^2}$ مرتبط می شود:

$$C_f = \left(\frac{1-\overline{R^2}}{2} + 1\right) \quad (۴)$$

$$M_{SL} = C_f\, S_L \quad (۵)$$

سرانجام مقدار توناژ رسوب سالانه هر ایستگاه اصلاح (M_{SL}) و بار معلق نهایی هر ایستگاه محاسبه شد.

گام ۴–محاسبه بار رسوب معلق حوضه ایستگاه ها با معادله تجربی رسوب معلق دلیری (۱۳۹۲) قبل از واسنجی

دلیری (۱۳۹۲) جهت تعمیم رسوب در یک سیستم آبخیز از حداقل ۶ پارامتر اصلی مساحت، دبی سالانه، شیب رودخانه اصلی، شیب حوضه، پتانسیل فرسایش (شامل حساسیت سنگ ها–رخساره ژئومورفولوژی–کاربری) و تراکم تاج پوشش گیاهی استفاده کرد. [17] ذکر کردند ۸۲,۶٪ پارامترهای مهم در تولید بار معلق حوضه های جنگلی هیرکانی شمال ایران شامل طول روخانه اصلی (۴۵,۷٪)، دبی سالانه با دوره بازگشت دو ساله (۱۲٪)، ارتفاع وزنی حوضه (۹,۸٪)، مساحت حوضه (۷,۶٪)، و بارش سالانه (۷,۳٪) بوده و مدل همبستگی با روش شبکه مصنوعی عصبی (ANN) را با این پارامترها با خطای نسبی ۲۶٪ توسعه دادند. در این خصوص دلیری (۱۳۹۲) با تلفیق رابطه تجربی رسوب [18]، پارامترهای مدل هیدروفیزیکی فرسایش (احمدی، ۱۳۷۴) و رابطه تجربی سیل کریگر [Creager et al., 1945] [19] معادله زیر را برای اولین بار در پروژه سد رودبار لرستان (۱۳۹۲) توسعه و سپس ضرایب رابطه مذکور را باتوجه به نتایج آنالیز سه ایستگاه مذکور به صورت گرده ای (Lump) در حوضه سد رودبار لرستان به شرح زیر اصلاح نمود:

$$SY = C(SY') \pm B$$
$$SY = S_L = C(A^s SE[\alpha Q^n]) \pm B \quad (۶)$$

SY' معادله ترکیبی رسوب معلق (S_L) پیش از واسنجی($Ton\ y^{-1}$).

S_L معادله ترکیبی رسوب معلق (S_L) پس از واسنجی($Ton\ y^{-1}$). این رابطه صرفاً جهت تعمیم بار معلق ایستگاهی پس از تعیین ضرائب واسنجی C و B بر اساس آنالیز رسوب ایستگاه های منطقه معرف معتبر است.

A عامل کمی مساحت (km^2) و نمایه آن s که بین ۰,۶ تا ۰,۸ تغییر می کند. مقدار آن با توجه به رابطه کریگر برای هر حوضه از رابطه زیر محاسبه می شود. این عامل روی رسوبدهی و تبدیل فرسایش به رسوب موثر است.

$$A^s = A^{(0.894A^{-0.048})} \quad (۷)$$

S عامل کمی شیب که به شیب خالص رودخانه (S') و شیب حوضه یا پستی و بلندی (S'') که با رابطه $S = S' + S''$ به یکدیگر مرتبط می شوند (٪).

E عامل توصیفی فرسایش پذیری متوسط حوضه که بین ۱ تا ۲۵ در نوسان است. این عامل در روش مذکور معادل جمع ارزش توصیفی از ۳ شاخص شامل الف- پتانسیل یا حساسیت فرسایش سازندها، ب-رخساره ژئومورفولوژی و ج-مدیریت کاربری اراضی می باشد. جهت تعیین ارزش توصیفی حساسیت سازندها می بایست بر اساس جدول مقاومت سنگهای تهیه شده در ایران توسط (فیض نیا، ۱۳۷۴) [20] مقادیر ۱ را برای سازندهای با حساسیت ناچیز و ارزش حدکثر ۱۷ را برای سازندهای با حساسیت بالا نسبت به فرسایش تعیین نمود. سپس هر یک از مقادیر توصیفی سازند می بایست در واحدهای همگن کاری (احمدی، ۱۳۷۴) باتوجه به رخساره ژئومورفولوژی [21] و کاربری اراضی (به کمک تصاویر ماهواره ای به صورت تجربی) حداکثر تا جمع ارزش ۲۵ با قضاوت کارشناسی به صورت نسبی تعیین گردد. در این خصوص با توجه به جدول مقاومت سنگها (فیض نیا، ۱۳۷۴) و رخساره های فرسایش (احمدی،۱۳۷۴) به همراه کاربری ارضای وضع موجود (تصاویر ماهواره) در حوضه ایستگاه های سد رودبار، ارزش عامل E بین ۱ الی ۲۵ محاسبه شد.

Q عامل کمی رواناب که در این جا به صورت سالانه لحاظ شد (m^3s^{-1}). همچنین ضرایب این عامل معادل ضرایب رابطه فلمینگ که معرف وضعیت پوشش گیاهی حوضه نیز می باشند از جدول ۱ انتخاب شد.

جدول ۱- مقادیر ضرائیب Q در معادله تجربی رسوب معلق دلیری(۱۳۹۲)، [Flemimg,1969]

نوع پوشش گیاهی	n	α
جنگل مخلوط پهن برگ و سوزنی برگ	۱,۰۲	۴۰۰۰
جنگل سوزنی برگ با مراتع انبوه	۰,۸۲	۵۹۰۰۰
مراتع تنک همراه با بوته های خار	۰,۶۵	۱۷۷۰۰۰
مناطق بیابانی و فقیر از پوشش	۰,۷۲	۴۴۶۰۰۰

گام ۵- واسنجی ضرائب معادله تجربی رسوب معلق دلیری (۱۳۹۲)

ابتدا ارزش مجهولات معادله مذکور در حوضه ایستگاه های هیدرومتری محاسبه (گام ۴) و مقدار SY' برای حوضه سه ایستگاه محاسبه می گردد. سپس باتوجه به مقدار تناژ رسوب ایستگاه های معرف منطقه (M_{SL})، ضرایب اصلاحی معادله ۶ تعیین و به شکل معادله ۸ برای برآورد رسوب حوضه میانی استفاده شد. خطای این معادله در منطقه حاضر ±۲۴ درصد است.

S_L معادله رسوب معلق واسنجی شده حوضه سد رودبار ($Ton\ y^{-1}$)

$$S_L = [0.0002(SY')^{0.9607}] \times 1.12 \quad error: \pm \%24 \qquad (۸)$$

گام ۶- برآورد رسوب معلق حوضه میانی با معادله دلیری (۱۳۹۲)

در این خصوص با توجه به رابطه ۶ و ۸ و پارامترهای حوضه میانی، مقدار رسوب معلق حوضه میانی معادل ۸۸۷۹۷ تن در سال با رسوب معلق ویژه ۱۳۵ تن در سال در کیلومتر مربع محاسبه شد.

گام ۷-محاسبه بار معلق سد رودبار لرستان

تناژ رسوب درازمدت معلق آورد سه ایستگاه با تناژ رسوب حوضه میانی جمع شد. لذا مقدار تناژ متوسط درازمدت رسوب معلق ورودی به مخزن سد معادل ۸۰۲۷۳۹ تن بر سال و بار ویژه معلق کل حوضه معادل ۳۵۶ تن بر کیلومتر مربع در سال گزارش می گردد.

گام ۸- صحت نتایج پس از آبگیری در ۶ خرداد سال ۱۳۹۵ و مقایسه روش ها

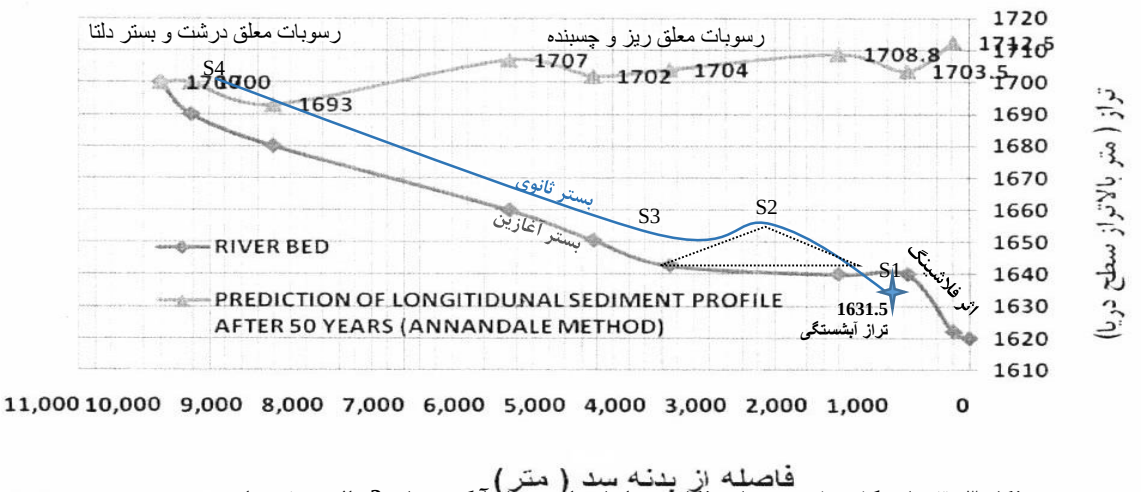
جهت کنترل و مقایسه روش ها، چهار نقطه داخل مخزن که عمدتا" رسوبات ریز در آنجا ته نشست می کنند با دستگاه سونار طی سال های ۱۳۹۷ و سپس جهت کنترل در سال ۱۴۰۱ عمق یابی شد. عمق رسوبگذاری در نقاط مذکور روی منحنی شکل ۳ جهت آنالیز داده های مخزن استفاده شد [22,23,24]. باتوجه به تغییر ضخامت رسوب داخل مخزن (Δx) و وزن مخصوص رسوبات معادل ۱,۱ تن بر مترمکعب از داده های اندازه گیری شده رودخانه (ترکیب غالب رس و لای) برای ته نشست با بهره برداری متوسط تراز آب از روش [Lane et al,1958][25]، و درصد تله اندازی متوسط محاسبه شده پروژه باتوجه به نسبت حجم تراز نرمال مخزن (mcm۲۲۸) به حجم جریان ورودی سالانه (mcm۹۰۱) از روش بران [Brune,1953][26] معادل ۹۴٪، لحاظ تعداد فلاشینگ و ساعت بازگشایی دریچه تحتانی با غلظت های ۷۰٪، ۶۰٪ و ۵۰٪ به ترتیب سه دوره ۲۰ دقیقه معادل یک ساعت تخلیه سالانه (کارگاه سد رودبار لرستان، ۱۴۰۱)، و نتایج جدول ۲، شکل ۳ و منحنی سطح-حجم -ارتفاع مخزن، مقدار تناژ رسوب معلق متوسط سالانه ورودی به مخزن محاسبه شد.

درصد خطای روش ها (%E) و ضریب برآورد (E) نسبت به رسوب ورودی مخزن به کمک رابطه ۹ و ۱۰ محاسبه شد.

$$\%E = \frac{S_{Lobs} - S_{Lest}}{S_{Lobs}} \times 100 \qquad (۹)$$

$$E = \frac{S_{L_{est}}}{S_{L_{obs}}} \quad (۱۰)$$

که در آن $S_{L_{obs}}$ بار معلق از باتیمتری مخزن، و $S_{L_{est}}$ مقدار بار معلق برآورد شده از روش های مختلف می باشد.



شکل ۳- تغییرات کف مخزن دره ای شکل رودبار لرستان پس از آبگیری طی 2 سال و هفت ماه

جدول ۲- تغییرات ارتفاع رسوب بار معلق مخزن سد رودبار لرستان بر اساس باتیمتری نقطه ای (دی ۱۳۹۷)

شماره نمونه	Lat.	Lon.	Dis. of dam(m)	[1]Depth(m)	Δx (m)
S1	۳۷۶۸۸۳	۳۶۴۱۹۳۳	۵۳۷	۱۰۲	[2]-۸,۵
S2	۳۷۶۰۷۱	۳۶۴۳۰۳۱	۱۸۵۰	۷۶,۳	۱۶
S3	۳۷۴۹۵۰	۳۶۴۴۰۵۶	۳۳۵۹	۸۵	۴,۳۵
S4	۳۷۲۶۱۴	۳۶۴۸۹۸۰	۸۷۶۴	۳۱,۵	۱۴,۸

[1] تراز آب مخزن در زمان اندازه گیری عمق آب، معادل ۱۷۳۳,۳۵ متر بوده است. [2] اثر کنش بستر در اثر فلاشینگ.

۳. نتایج و بحث

نتایج رسوب مربوط به سیلاب سه ایستگاه همراه متوسط خطای همبستگی معادلات رگرسیون و مقدار بار معلق ریز ایستگاهی (M_{SL}) بر اساس روش شناسی دلیری (۱۳۹۲) برای ایستگاه های قلیان، زردفهره و کاظم آباد به ترتیب معادل ۸۳۱۰۴، ۵۵۸۴۹۶ و ۷۲۳۴۲ تن در سال در جدول ۳ و بار ویژه معلق همراه سایر روش ها در جدول ۴ ارائه شد.

نتایج تعمیم رسوب ایستگاهی به حوضه میانی بدون آمار به کمک معادله تجربی دلیری(۱۳۹۲) همراه خطای معادله حدود ۲۴ درصد و ارزش پارامترهای معادله در جدول ۵ و مقدار کل بار معلق حوضه سد با روش شناسی دلیری (۱۳۹۲) در جدول ۶ و جهت مقایسه با روش های دیگر نتایج سایر روش ها در جدول ۷ ارائه شد.

مقایسه نتایج بار رسوب معلق حوضه سد رودبار لرستان با روش های مختلف در جدول ۷ حاکی از آن است که روش FAO-USBR مقدار رسوب را بسیار بیشتر (۱,۸۷) و روش آنالیز دبی-روزانه (روش کنترل) بسیار کمتر (۰,۴۹) از سایر روش ها برآورد کرده اند. روش USBR و روش پیشنهادی دلیری (۱۳۹۲) به ترتیب با ضریب برآورد ۰,۷۴ و ۰,۸۹ نتایج نسبتا" نزدیک و مناسبی را ارائه کرده اند.

جدول ۳- نتایج آنالیز رسوب معلق ایستگاه ها با روش شناسی دلیری (۱۳۹۲)

عنوان	ایستگاه قلیان	ایستگاه زردفهره	ایستگاه کاظم آباد
بار معلق	۶۵۱۵۴ بدون اثر سیل	۵۳۰۹۹ بدون اثر سیل	۱۰۳۳۸ بدون اثر سیل
(Ton y^{-1})	۷۵۵۴۹ با اثر سیل(S_L)	۴۸۷۲۸۵ با اثر سیل(S_L)	۶۰۲۸۵ با اثر سیل(S_L)
بار معلق ویژه	۱۵۷ بدون اثر سیل	۷۱ بدون اثر سیل	۲۴ بدون اثر سیل
(Ton km^{-2} y^{-1})	۱۸۳ با اثر سیل	۶۵۵ با اثر سیل	۱۲۵ با اثر سیل
دوره آماری	۱۳۶۱ تا ۱۳۹۱	۱۳۶۱ تا ۱۳۹۱	۱۳۶۱ تا ۱۳۹۱
ضریب C_f دلیری ۱۳۹۲	۱,۱	۱,۱۵	۱,۲
نوع همبستگی	چند جمله ای	خطی و نمایی	نمایی، توانی و خطی
اصلاح ضریب C_f پس از اصلاح اثر رسوب سیل			
بار معلق (M_{SL}) (Ton y^{-1})	۸۳۱۰۴	۵۵۸۴۹۶	۷۲۳۴۲
بار معلق ویژه (Ton km^{-2} y^{-1})	۲۰۱	۷۵۰	۱۶۵

جدول ٤- بار رسوب معلق ویژه حوضه ایستگاه ها با روش های مختلف (Ton km^{-2} y^{-1})

عنوان	ایستگاه قلیان	ایستگاه زردفهره	ایستگاه کاظم آباد
۱-روش شناسی دلیری(۱۳۹۲)			
(لحاظ اثر رسوب سیل و تعدیل C_f)	۲۰۱	۷۵۰	۱۶۵
۲-آنالیز دبی – رسوب روزانه (روش کنترل)	۱۵۸	۲۹۷	۵۵
۳-روش USBR	۱۹۳	۴۲۱	۱۷۹
٤-روش FAO-USBR	۸۲۶	۹۰۵	۴۰۴
مساحت ایستگاه ها (km^2)	۴۱۴	۷۴۴	۴۳۸
شیب رودخانه ٪	۱,۳	۱,۴	۰,۷
رواناب سالانه(m^3s^{-1})	۹,۸۲	۱۱,۰۶	۳,۹۱

همچنین با توجه به مقایسه بار ویژه رسوب روش های مختلف (جدول ۷) با ایستگاه های محدوده (جداول ۳ و ۴)، مشخص می شود بار ویژه روش FAO-USBR به نظر نسبت به سایر روش ها دست بالا برآورد کرده و لذا ضریب تعدیل این روش منطقی نیست. نتایج روش آنالیز دبی–روزانه باتوجه به اینکه نمی تواند مقدار رسوب سیلاب های مهم را لحاظ کند نیز قابل استناد نبوده و مقدار رسوب را بسیار دست پایین برآورد می کند.

ارزیابی کلی روش شناسی پیشنهادی دلیری (۱۳۹۲)

در این تحقیق یک معادله تجربی برآورد و تعمیم بار معلق رسوب حوضه ای و روش شناسی مفهومی بهبود منحنی سنجه رسوب به کمک لحاظ رسوبات حین سیل و استفاده از ضریب خطای همبستگی ارائه شد.

ارزیابی معادله بار معلق دلیری (۱۳۹۲)

شرایط سازند و کاربری اراضی و دبی جریان حوضه میانی عمدتا" شامل سازند سخت آهکی با لایه های نازک رسی عمدتا" توده سنگی و کاربری طبیعی بدون کشاورزی می باشد. لذا روش دبی ویژه رسوب که تنها عامل سطح را به صورت خطی وارد محاسبات می کند نمی تواند نتایج آنالیز رسوب ایستگاهی را به حوضه میانی به طور مناسب تعمیم دهد. اما معادله تجربی رسوب معلق دلیری (۱۳۹۲) مقدار بار ویژه و تناژ حوضه میانی را باتوجه به لحاظ شرایط هیدرولوژی حاکم بین حوضه ایستگاه ها و مناطق فاقد آمار به صورت غیرخطی پس از واسنجی ارتباط می دهد (جداول۴، ۵ و ۶).

جدول ۵- محاسبه رسوب معلق (S_L) میان حوضه با روش تجربی دلیری، ۱۳۹۲

پارامتر	ارزش
عامل مساحت	۶۹,۷
شیب مسیر ٪	۱,۰۳
شیب حوضه ٪	۵,۴
رواناب سالانه(m^3s^{-1})	۳,۷۹
پوشش گیاهی (n)	۰,۷۳
پوشش گیاهی (α)	۱۱۸۰۰۰
پتانسیل فرسایش (حساسیت سنگ- رخساره-مدیریت کاربری)	۶,۴
بار معلق ویژه ($Ton\ km^{-2}y^{-1}$)	۱۳۵
بار معلق ($Ton\ y^{-1}$)	۸۸۷۹۷
احتمال خطای همبستگی٪	± 24

جدول ٦- برآورد بار رسوب معلق (S_L) حوضه سد روبار لرستان با روش شناسی دلیری (۱۳۹۲)

پارامتر	ارزش
مساحت حوضه سد (km^2)	۲۲۵۵
رواناب سالانه(m^3s^{-1})	۲۸,۵۸
جمع بار معلق حوضه ایستگاه ها ($Ton\ y^{-1}$)	۷۱۳۹۴۲
بار معلق حوضه میانی(معادله دلیری،۱۳۹۲) ($Ton\ y^{-1}$)	۸۸۷۹۷
بار معلق حوضه سد ($Ton\ y^{-1}$)	۸۰۲۷۳۹
بار معلق ویژه حوضه سد ($Ton\ km^{-2}\ y^{-1}$)	۳۵۶

جدول ۷- مقایسه و صحت سنجی نتایج روش های مختلف محاسبه بار معلق (S_L) حوضه سد رودبار لرستان

روش محاسبه	روش تعمیم رسوب میان حوضه	بار معلق ویژه $Ton\ km^{-2}\ y^{-1}$	بار معلق $Ton\ y^{-1}$	بار معلق مخزن (روش مبنا) $Ton\ y^{-1}$	درصد خطا مبنا %E	ضریب برآورد E
روش شناسی دلیری (۱۳۹۲)	معادله تجربی دلیری (۱۳۹۲)	۳۵۶	۸۰۲۷۳۹	۸۹۸۰۰۰	۱۰,۶	۰,۸۹
آنالیز دبی-رسوب (روش کنترل)	میانگین وزنی دبی ویژه رسوب نسبت به سطح	۱۹۴,۵	۴۳۸۶۶۵	۸۹۸۰۰۰	۵۱,۱	۰,۴۹
روش USBR	میانگین وزنی دبی ویژه رسوب نسبت به سطح	۲۹۵,۴	۶۶۶۲۲۵	۸۹۸۰۰۰	۲۵,۸	۰,۷۴
روش FAO-USBR	میانگین وزنی دبی ویژه رسوب نسبت به سطح	۷۴۷	۱۶۸۴۵۱۹	۸۹۸۰۰۰	-۸۷,۶	۱,۸۷

برآورد بار معلق (S_L) حوضه سد با توجه به رابطه ۹، ۱۰ در جدول ۷ حاکی از آن است که روش شناسی دلیری (۱۳۹۲) با ۱۰,۶ درصد خطا نسبت به مبنا و ضریب برآورد ۰,۸۹ از سایر روش ها مناسب تر می باشد.

ارزیابی روش شناسی بهبود آنالیز منحنی-سنجه رسوب دلیری (۱۳۹۲)

جهت مقایسه، شرایط هیدرولوژیکی حوضه ایستگاه ها و حوضه میانی از نظر تاثیر رخساره ژئومورفولوژی، کاربری اراضی، سازند زمین شناسی، و شیب در رسوبدهی حوضه ها بررسی شد [8,21,23]. حوضه ایستگاه زردفهره با شیب بیشتر از دو ایستگاه دیگر و جریان سیلابی زیاد همراه سازندهای نرم رسی و کاربری کشاورزی و رخساره های فرسایشی بیشتر نسبت به دو حوضه ایستگاه کاظم آباد و قلیان حاکی از شرایط مستعد رسوبدهی و فرسایش می باشد. لذا نسبت اختلاف نتایج آنالیز رسوبدهی حوضه ها با روش شناسی دلیری (۱۳۹۲) منطقی است.

۳. نتیجه گیری

الف- باتوجه به نتایج ارائه شده در تحقیق حاضر، معادله تجربی تعمیم رسوب معلق دلیری (۱۳۹۲) پس از واسنجی با نتایج آمار رسوب معرف و مناسب می تواند مقدار رسوبدهی بار معلق ریز (Wash load) مناطق فاقد آمار را با دقت بیشتری نسبت به روش رسوب ویژه، توزیع و نسبت دهد.

ب- به طور کلی ضریب تعدیل FAO برای اصلاح منحنی سنجی –رسوب زیاد است. این نتیجه توسط محققان دیگر مانند کالوندی و همکارن (۱۳۸۹) نیز تایید شده است. تعدیل ضریب دلیری (۱۳۹۲) که با مفهوم ضریب Ferguson, 1986 تشابه دارد، افزایش منطقی تری را در محاسبات تناژ رسوب معلق منحنی سنجه رسوب پس از اصلاح اثر رسوب سیل با روش شناسی دلیری (۱۳۹۲) ارائه داد. کالوندی و همکاران (۱۳۸۹) نیز نتایج ناشی از تعدیل مناسب فرگوسن را تایید کردند. لذا روش شناسی دلیری (۱۳۹۲) جهت اصلاح اثر رسوب سیل و بهبود پراکنش خطای منحنی سنجه رسوب نسبت به ضریب تعدیل FAO به نظر منطقی تر می باشد.

۴. تقدیر و تشکر

تقدیر و تشکر از همکاران کارگاه سد رودبار لرستان و شرکت آب و نیرو ایران جهت در اختیار گذاشتن اطلاعات.

۵. مراجع

1. Yang, H.B., Li, E.C., Zhao, Y., Liang, Q.H., (2017). “Effect of water-sediment regulation and its impact on coastline and suspended sediment concentration in Yellow River Estuary”, Water Sci. Eng. 10(4), 287-294. https:// doi.org/10.1016/j.wse.2017.12.009.

2. Maidment, David. R. (1993). “Handbook of Hydrology. McGraw Hill”; 1424p.

3. Melesse, A.M., Ahmad, S., McClain, M.E., Wang, X., Lim, Y.H.. (2011). “Suspended sediment load prediction of river systems”: An artificial neural network approach. Agric. Water Manag. 98(5), 855-866. https://doi.org/ 10.1016/j.agwat.2010.12.012.

4. Cho, J., Her, Y., Bosch, D., (2016). “Sensitivity of simulated conservation practice effectiveness to representation of field and in-stream processes in the Little River Watershed”, Environ. Model. Assess. 22(2), 159-173. https://doi.org/10.1007/s10666-016-9530-6.

5. Swarnkar, S., Malini, A., Tripathi, S., Sinha, R., (2018). “Assessment of uncertainties in soil erosion and sediment yield estimates at ungauged basins”: An application to the Garra River basin, India. Hydrol. Earth Syst. Sci. 22(4), 2471-2485. https://doi.org/10.5194/hess-22-2471-2018.

6. Flanagan, D.C., and M.A. Nearing (eds.). (1995). “USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP) Hillslope Profile and Watershed Model Documentation”. NSERL Report No. 10, National Soil Erosion Research Laboratory, USDA-Agricultural Research Service, West Lafayette, Indiana

7. Wischmeier, W. H., and D. D. Smith. (1960). “A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning”, Trans. Int. Congr. Soil Sci., 7th, p. 418-425.

۸. احمدی، ح. (۱۳۷۴). "ژئوفورفولوژی کاربردی- فرسایش آبی" جلد اول، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ سوم.

9. Einstein, H. A. and N. Chien, (1953). “Transport of Sediment Mixtures with Large Range of Grain Size, United States Army Engineer Division, Missouri River.

10. Chien, Ning and Zhaohui Wan. (1999). “Mechanics of sediment transport”. ASCE Press ISBN (print): 978-0-7844-0400-3ISBN. https://doi.org/10.1061/9780784404003.

11. Tramblay, Y., Ouarda, T.B.M.J., St-Hilaire, A., Poulin, J.(2010). “Regional estimation of extreme suspended sediment concentrations using watershed characteristics”. J. Hydrol. 380(3-4), 305-317. https://doi.org/10.1016/j. jhydrol.2009.11.006.

۱۲. دلیری، ف. (۱۳۹۲). "نظارت عالیه پروژه سد رودبار لرستان" (هیدرولوژی و هیدرولیک). (www.absam.ir).

13. Daliri, F., Seraji, H.S., Kholghi, M., & Dehghanipour, A.H. (2013)." Prioritizing sub-watersheds flooding intensity for structural Damaging Flood control and managing”. Desert. 18 (2): 153-162.

۱٤. کالوندی، م.، خداشناس، س.ر.، قهرمان، ب.، (۱۳۸۹). "آنالیز روش های مختلف منحنی سنجه در برآورد رسوب ورودی به سدها" (مطالعه موردی: سد دوستی). مجله تحقیقات علمی مهندسی آب و آبیاری. سال اول، شماره ۱.

15. Harrison, C. G. A. (2000). “What factor control mechanical erosion rates”. Int. J. Earth Sci. (531):78-92.

16. Ferguson, R. I. 1986. River loads underestimated by rating curves. Water Resources Research (22).74-76.

17. Kheirfam, H., Kashtiban, S.M. (2018). “A regional suspended load yield estimation model for ungauged watersheds”. Water Sci. Eng. 11 (4), 328-337.

18. Fleming G. (1969). “Design Curves for Suspended Load Estimation. Proc. Inst. of Civil Eng. 43, pp.

19. Creager, W.P., J.D. Justin, and Hinds, J. (1945). “Eng. for Dams”, Vol. 1, General Design., John Wiley, New York.

۲۰. فیض نیا، س. (۱۳۷۴). "مقاومت سنگ ها در مقابل فرسایش در اقالیم مختلف ایران"، مجله منابع طبیعی، شماره ۴۷.

21. Verstraeten, G. and J. Poesen. (2001). “Factors controlling sediment yield from small intensively cultivated catchments intemperate humid climate”. Geomorphology (40): 123-144.

۲۲. دلیری، ف. و سراجی، س.ح. (۱۴۰۱). "تخلیه رسوب سد"، چاپ اول. (www.Absam.ir). ۱۳۰ ص.

23. Verstraeten, G. and J., Poesen, J. D. Vente and Koninckx, X. (2003). “Sediment yield variability in Spain: a quantitative and semi qualitative analysis using reservoir sedimentation rates”, Geomorphology (50): 327-348.

24. Churchill, M.A. (1948). “Discussion of analysis use of reservoir sedimentation data”, by L. C. Gottschalk. Proc., Fed. Interagency sedimentation Conf. 139-140.

25. Lane, E. W. and Koelzer, V. A. (1958). “Density of sediments deposited in reservoirs”. A study of methods used in measurement and analysis of sediment load in streams. Rep. No.9. Hydraulic lab. Univ of Iowa.

26. Brune, G. M. (1953). “Trap efficiency of reservoirs”, Trans: AGU. 34(3): 407-418.