

مقاله علمی-پژوهشی

تعیین مناسب‌ترین روش برآورد نسبت تحویل رسوب در حوضه آبریز سد شیرین دره

مریم تاج‌بخشیان^۱، ابوالفضل مساعدی^{۲*}، محمدحسین محمودی قرائی^۳، سید رضا موسوی حرمی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۲

چکیده

در این پژوهش نرخ تولید بار رسوبی مجموع در حوضه آبریز سد شیرین دره به روش‌های هیدرولوژیکی، UNESCO و FSM تخمین زده شد. مقایسه مجموع حجم رسوباتی که از زمان احداث سد تا کنون (سال ۱۴۰۰) در مخزن آن ته‌نشین شده است (17 Mm^3) با نتایج حاصل از این سه روش نشان داد که روش هیدرولوژیکی با برآورد بار رسوبی به میزان $1158000 \text{ m}^3/\text{year}$ مناسب‌ترین و روش FSM با نرخ تخمین زده شده m^3/year به 5565000 نامناسب‌ترین روش تخمین بار رسوبی در این حوضه می‌باشد. شدت فرسایش سالانه بر اساس روش EPM مقدار $1426300 \text{ m}^3/\text{year}$ به دست آمد. بر اساس نرخ تولید رسوبات از زمان احداث سد تا کنون، نسبت تحویل رسوب واقعی برابر با 0.78 محاسبه شد. نسبت تحویل رسوب پیش‌بینی شده بر اساس نتایج حاصل از روش EPM و سه روش تخمین بار مجموع رسوبی، به همراه برخی مدل‌های تجربی تخمین نسبت تحویل رسوب، محاسبه شد. نتایج واسنجی نشان داد روش هیدرولوژیکی و مدل تجربی که در آن از شیب به‌عنوان عامل اصلی در تعیین نسبت تحویل رسوب استفاده می‌شود، با داشتن بیشترین مقدار دقت و کم‌ترین خطا مناسب‌ترین روش‌ها می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: رسوب، سد شیرین دره، شدت فرسایش، مدل تجربی، نسبت تحویل واسنجی

مقدمه

مجموع، می‌توان گفت هر ساله به‌طور متوسط بین 0.1 تا $2/3$ درصد از حجم کل ذخیره مخازن سدهای جهان در اثر رسوب‌گذاری از دست می‌رود (Morris, 2020). در ایران نیز به‌طور سالانه، یک درصد از حجم کل ذخایر مخازن سدها، یعنی در حدود 180 Mm^3 از رسوبات پر می‌شود (امینی و همکاران، ۱۳۹۷). از جمله عوامل طبیعی که در روند فرسایش و تولید رسوب دخالت دارند می‌توان به زمین‌شناسی و جنس واحدهای سنگی موجود در یک منطقه، وضعیت پستی و بلندی، زمین‌ریخت‌شناسی، نحوه توزیع رودخانه‌ها و شبکه آبراهه‌ها، وضعیت آب و هوا و نوسانات دمایی و فعالیت میکروارگانیزم‌ها اشاره نمود. گسترش زمین‌های کشاورزی، چرای بی‌رویه دام‌ها در مراتع، ساخت‌وساز و توسعه شهرنشینی و تولید مواد زائد حاصل از فعالیت‌های مختلف صنعتی نیز از جمله مواردی هستند که دخالت انسان را در تسریع فرآیند فرسایش خاک نشان می‌دهند (Uri, 2001; Nawaz et al., 2020).

در روابط مورد استفاده در برآورد فرسایش و تولید رسوب عاملی به نام نسبت تحویل رسوب از اهمیت فراوانی برخوردار است که بیانگر نسبت میان بار رسوبی و شدت فرسایش در یک حوضه آبریز است و به دو روش مستقیم و غیرمستقیم برآورد می‌شود (Woznicki and Nejadhashemi, 2013; Sanchez et al., 2018) تا کنون

سدها یکی از مهم‌ترین سازه‌های آبی ساخته انسان هستند که جهت مهار سیلاب‌ها و استفاده از آب ذخیره‌شده در پشت آن‌ها برای فعالیت‌هایی از قبیل آبیاری زمین‌های کشاورزی و تولید محصول، مصارف صنعتی مختلف، پرورش آبزیان، کشتی‌رانی و مقاصد تفریحی احداث می‌شوند؛ اما یکی از خطراتی که همواره به‌پینه از آب ذخیره‌شده در مخازن سدها را تهدید می‌کند، مسئله رسوب‌گذاری و ته‌نشینی رسوبات در مخزن سد و کاهش حجم آب ذخیره‌شده در آن می‌باشد (Jabbar and Yadav, 2019). نرخ متوسط رسوب‌گذاری سالانه در مخازن سدهای مناطق مختلف جهان متفاوت است. در

۱- دانشجوی دکترا گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(E-mail: mosaedi@um.ac.ir)

* نویسنده مسئول:

دقیق اشاره‌ای نشده است. با توجه به اینکه کشاورزی یکی از مهم‌ترین فعالیت‌ها و منابع درآمد ساکنین منطقه به شمار می‌رود، مسئله رسوب‌گذاری در مخزن سد شیرین دره و کاهش کمیت و کیفیت آب آن به‌طور مستقیم و غیرمستقیم می‌تواند بر فعالیت‌های کشاورزی تأثیر گذاشته و در نتیجه موجب کاهش کیفیت محصولات کشاورزی شده و خسارات اقتصادی را به بار آورد؛ بنابراین، مهم‌ترین اهدافی که در مطالعه حاضر به آن اشاره می‌شود عبارت‌اند از (۱) برآورد نرخ تولید رسوب بر اساس روش‌های هیدرولوژیکی، UNESCO و روش امتیازدهی فاکتوریل، (۲) برآورد شدت فرسایش بر اساس روش EPM (۳) تعیین نسبت تحویل رسوب واقعی، (۴) محاسبه نسبت تحویل رسوب پیش‌بینی شده بر اساس مدل‌های مبتنی بر مساحت و ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی، (۵) تعیین روش بهینه محاسبه نسبت تحویل رسوب بر اساس شاخص‌های خطا سنجی.

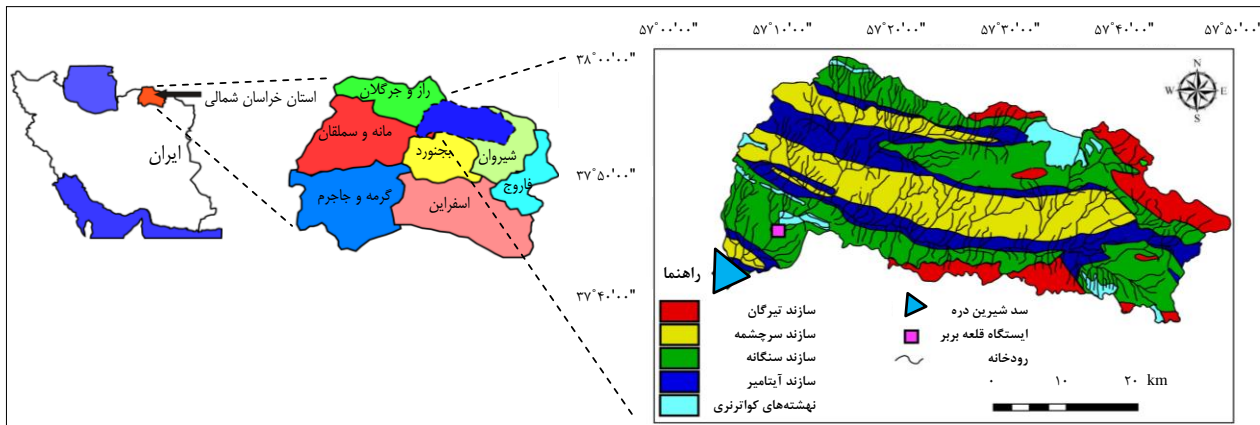
مواد و روش‌ها

رودخانه شیرین دره یکی از پرآب‌ترین سرشاخه‌های شمالی رود اترک به شمار می‌رود. حوضه آبریز این رودخانه بین $57^{\circ} 6' 25''$ تا $57^{\circ} 58' 35''$ طول شرقی و $37^{\circ} 41' 31''$ تا $37^{\circ} 59' 52''$ عرض شمالی و در ۶۵ کیلومتری شمال غربی شهرستان بجنورد در استان خراسان شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). این رودخانه با جهت کلی شمال شرقی-جنوب غربی، آب‌های سطحی و زیرزمینی حوضه آبریز خود را با وسعت تقریبی 1750 km^2 زهکشی کرده و به سمت رودخانه اترک هدایت می‌نماید. بر اساس اطلاعات موجود، میزان رواناب متوسط سالانه رودخانه شیرین دره حدود $77/7 \text{ Mm}^3$ برآورد شده که بخشی از آن از چشمه‌های بالادست و بخشی نیز از آب‌های سطحی حاصل می‌شود. از نظر زمین‌شناسی، قدیمی‌ترین واحدهای سنگی حوضه آبریز مورد مطالعه متعلق به دوران دوم و جدیدترین آن‌ها مربوط به عهد حاضر هستند. از رسوبات دوران دوم تنها بخشی از واحدهای سنگی کرتاسه در این حوضه وجود دارند و رسوبات عهد حاضر شامل تراس‌های رودخانه‌ای، رسوبات بادی، آبرفت‌ها و واریزه‌ها هستند. سازندهای تیرگان، سرچشمه، سنگانه و آیتامیر به ترتیب با سنگ‌شناسی غالب آهک، مارن، شیل و شیل و ماسه‌سنگ سازندهایی با سن کرتاسه در منطقه هستند (شکل ۱). بر اساس رده‌بندی اقلیمی دمارتن، اقلیم این حوضه از نوع خشک و نیمه‌خشک می‌باشد (صدری، ۱۳۹۳).

مطالعات متعددی در جهت برآورد بار رسوبی با استفاده از نسبت تحویل رسوب در سطح ایران و جهان انجام شده است. اسدی نلیوان و همکاران (۱۳۹۲) با مقایسه نتایج حاصل از مدل پتانسیل فرسایش و نسبت تحویل رسوب، مدل ارائه‌شده توسط رنفرو (Renfero, 1983) را به‌عنوان بهترین روش تجربی برآورد رسوب در حوضه آبریز قورچای، استان گلستان، پیشنهاد دادند. اصغری سراسکانرود و همکاران (۱۳۹۲) با مقایسه نسبت تحویل رسوب واقعی و پیش‌بینی شده به این نتیجه رسیدند که در چهار زیر حوضه از حوضه آبریز رودخانه جاجرود، مدل مانرو و رنفرو (Renfero and Manero, 1975) مطلوب‌ترین نتیجه را در پی داشت. میزان فرسایش خاک در چندین حوضه آبریز در برزیل با استفاده از رابطه جهانی فرسایش خاک توسط کلمن و همکاران تخمین زده شد و مدل ارائه‌شده توسط ویلیامز و برنندت (Williams and Berndt, 1972) به‌عنوان مناسب‌ترین مدل تجربی در برآورد نسبت تحویل رسوب معرفی شد (Coleman et al., 2018). پنج سری داده‌های هیدرومئتئورولوژیکی توسط وو و ما جهت ارائه مدلی برای محاسبه نسبت تحویل رسوب در Loess Plateau، چین، استفاده شد (Wu and Ma, 2020). این محققان به این نتیجه رسیدند که همبستگی قابل توجهی میان افزایش میزان رسوب برآوردی و عواملی مانند شیب و بارندگی وجود دارد.

سد شیرین دره در سال ۱۳۸۴ با حجم اولیه 91 Mm^3 به‌عنوان بزرگ‌ترین سد استان خراسان شمالی با هدف تأمین آب آشامیدنی شهرستان بجنورد و آب موردنیاز برای مقاصد کشاورزی و صنعتی در منطقه مورد مطالعه افتتاح شد. بیش از ۶۰ درصد از مناطق واقع در بالادست سد شیرین دره با سازندهای حساس به فرسایش سرچشمه و سنگانه پوشیده شده‌اند که فرآیندهای فرسایشی، به‌ویژه فرسایش آبی، صفحه‌ای، شیاری و خندقی را تشدید می‌کنند؛ بنابراین، رسوبات حاصل از فرسایش این سازندها می‌توانند به‌سرعت وارد آب‌های جاری و سپس مخزن سد شده و موجب کاهش حجم اولیه آن شوند. نتایج حاصل از مطالعات عمق‌سنجی مخزن سد و تحلیل نقشه‌های حاصل از آن نشان داد در طی سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۵ در حدود 12 Mm^3 رسوبات وارد مخزن شده است.

تا کنون مطالعاتی در زمینه نرخ تولید رسوب در حوضه آبریز رودخانه شیرین دره انجام شده است. در این مطالعات به روش‌های مختلف میزان رسوب تولیدی در حوضه اشاره شده است (فرهی و همکاران، ۱۳۹۰؛ فریدانی بردسکن، ۱۳۹۱؛ صدری، ۱۳۹۳؛ اکبرزاده، ۱۳۹۴؛ امامقلی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۹)؛ اما در هیچ‌یک از این مطالعات به بررسی مدل‌های تجربی مختلف در محاسبه نسبت تحویل رسوب و مقایسه نتایج آن‌ها با مقادیر رسوب مشاهده‌ای به‌طور



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی حوضه آبریز سد شیرین دره (برگرفته از افشار حرب، ۱۳۷۳)

سد) تا ۱۳۹۷-۱۳۹۶ (دوره آماری ۱۳ ساله) در ایستگاه قلعه بربر استفاده شد (شکل ۱). در جدول ۱ مهم‌ترین خصوصیات هیدرولوژیکی و جغرافیایی برای ایستگاه قلعه بربر و حوضه آبریز سد شیرین دره ارائه شده است.

برآورد بار مجموع رسوبی به روش هیدرولوژیکی، UNESCO و FSM

جهت برآورد بار مجموع رسوبی در حوضه آبریز رودخانه شیرین دره از آمار ثبت‌شده دبی رسوب معلق مشاهده‌ای، غلظت رسوب معلق و دبی روزانه جریان در طی سال‌های آبی ۱۳۸۵-۱۳۸۴ (زمان احداث

جدول ۱- مهم‌ترین مشخصات هیدرولوژیکی و جغرافیایی ایستگاه قلعه بربر و حوضه آبریز سد شیرین دره

مکان	طول جغرافیایی (E)	عرض جغرافیایی (N)	میانگین ارتفاع (m)	میانگین بارش سالانه (mm)	میانگین درجه حرارت سالانه (°C)	مساحت زهکشی (km ²)	میانگین شیب (%)
ایستگاه قلعه بربر	۵۷°۱۱'۰۵"	۳۷°۴۵'۰۵"	۷۷۰	۳۰۲/۱۷	۱۲/۲	۱۵۲۵	۱/۲
کل حوضه آبریز	۵۷°۰۶'۲۵"	۳۷°۴۱'۳۱" تا ۳۷°۵۹'۵۲"	۱۴۵۵	۲۶۶/۱	۱۵/۳	۱۷۵۰	۲۰

حوضه آبریز بر روی مساحت و رواناب جاری در آن قرار دارد که با استفاده از رابطه زیر می‌توان رسوبدهی ویژه را تخمین زد (UNESCO, 1985; Jain and Kothyari, 2000):

$$SSY = 1958 e^{-0.055R} (1.43 - 0.26 \log A) \quad (3)$$

در این رابطه، R میانگین ارتفاع رواناب جاری در حوضه آبریز برحسب A، inch مساحت کل حوضه آبریز بر اساس mile² و SSY رسوبدهی ویژه بر حسب ton/year/mile² می‌باشد. بر اساس آمار دبی اندازه‌گیری شده در محل ایستگاه قلعه بربر متوسط آورد سالانه این رودخانه ۶۷/۸ Mm³ می‌باشد که با توجه به مساحت حوضه آبریز بالادست این ایستگاه، ارتفاع رواناب سالانه معادل با ۱/۷۳ inch به دست می‌آید.

روش FSM جهت تخمین رسوبدهی ویژه برای حوضه‌هایی با مساحت بیش از ۱۰۰ km² و بر اساس رابطه‌ای غیرخطی شامل مساحت حوضه و پنج عامل دیگر از جمله توپوگرافی، پوشش گیاهی، فرسایش رودخانه‌ای، سنگ‌شناسی و شیب ارائه گردید (Verstraeten

برای محاسبه دبی رسوب معلق در روزهایی که این شاخص اندازه‌گیری نشده بود از رابطه ۱ استفاده شد که در آن Q_s دبی رسوب معلق بر حسب ton/day، C غلظت رسوب معلق بر حسب mg/l و Q_w دبی جریان بر حسب m³/s می‌باشد (Porterfield, 1977):

$$Q_s = 0.0864 C Q_w \quad (1)$$

برای برآورد دبی رسوب مجموع در طی دوره آماری مورد مطالعه از نسبت میان دبی بار بستر به بار معلق رسوبی استفاده شد. در این روش با مشخص بودن شیب طولی رودخانه می‌توان بار بستر در حال انتقال را با استفاده از رابطه زیر برآورد نمود (Peterson, 1986):

$$Q_{sb} = K Q_s \quad (2)$$

در این رابطه: Q_{sb} دبی بار بستر رسوبی (ton/year)، Q_s دبی بار معلق رسوبی (ton/year) و K نسبت بار بستر به بار معلق است که با مشخص بودن مقدار شیب طولی رودخانه از روی نمودار مربوطه تعیین می‌شود (Armanini, 2018).

اساس روش UNESCO در برآورد بار مجموع رسوبی در یک

et al., 2003) (جدول ۲). در این مدل، A مساحت حوضه بر حسب km^2 ، I امتیاز به دست آمده (حاصل از ضرب امتیازات کسب شده توسط عوامل مختلف) و SSY رسوبدهی ویژه بر حسب ton/year/km^2 بر حسب

می‌باشد (باقریان کلات و همکاران، ۱۳۹۹):

$$SSY = 4139 A^{-0.43} + 4.55 I + 211 \quad (4)$$

جدول ۲- امتیازات عوامل مختلف در روش FSM (Verstraeten et al., 2003)

عامل	امتیاز	ویژگی
	۱	شیب‌های بسیار ملایم در نزدیکی مخزن و رودخانه‌های اصلی؛ اختلاف ارتفاع در هر ۵ km کم‌تر از ۲۰۰ m
توپوگرافی	۲	شیب‌های متوسط در نزدیکی مخزن و رودخانه‌های اصلی؛ اختلاف ارتفاع در هر ۵ km بین ۲۰۰ و ۵۰۰ m
	۳	شیب‌های بسیار تند در نزدیکی مخزن و رودخانه‌های اصلی؛ اختلاف ارتفاع در هر ۵ km بیشتر از ۵۰۰ m
	۱	تماس خوب پوشش گیاهی با خاک (بیش از ۷۵ درصد از خاک محافظت می‌شود)
پوشش گیاهی	۲	تماس متوسط پوشش گیاهی با خاک (بین ۲۵ تا ۷۵ درصد از خاک محافظت می‌شود)
	۳	تماس ضعیف پوشش گیاهی با خاک (کم‌تر از ۲۵ درصد از خاک محافظت می‌شود)
	۱	سنگ آهک؛ ماسه سنگ؛ کنگلومرا (درجه هوازگی ضعیف)
سنگ‌شناسی	۲	نهنشته‌های رسوبی نئوژن
	۳	مواد به شدت هوازده؛ مارن
	۱	فرسایش رودخانه‌ای بسیار نادر است
فرسایش رودخانه‌ای	۲	فرسایش رودخانه‌ای در نواحی محدودی قابل مشاهده است
	۳	فرسایش رودخانه‌ای در نواحی گسترده‌ای قابل مشاهده است
	۱	شکل کشیده با یک کانال اصلی رودخانه که آب را به سمت مخزن هدایت می‌کند
شکل حوضه	۲	شکل بین کشیده و نیمه دایره‌ای
	۳	شکل نیمه دایره‌ای با کانال‌های اصلی متعدد رودخانه که آب یا میزان رواناب زیادی را از نواحی بالادست به سمت مخزن هدایت می‌کنند

برآورد شدت فرسایش

روش EPM برای اولین بار در کنفرانس بین‌المللی رژیم رودخانه ارائه و جهت تخمین شدت فرسایش خاک مورداستفاده قرار گرفت (Gavrilovic, 1998). از مزیت‌های این روش عوامل محدود مؤثر در نرخ فرسایش بوده که به آسانی قابل ارزیابی می‌باشند (da Silva et al., 2014; Chalis et al., 2019). روابط مورداستفاده در این روش به صورت زیر می‌باشند:

$$Z = YX_a (\Psi + I^{0.5}) \quad (5)$$

$$T = \left(\frac{t}{10} + 0.1 \right)^{0.5} \quad (6)$$

$$W_{sp} = THZ^{0.5} \pi \quad (7)$$

در روابط بالا، Z ضریب فرسایش و رسوبدهی، X_a ضریب استفاده از زمین، Y ضریب حساسیت خاک به فرسایش، Ψ ضریب فرسایش حوضه، I شیب متوسط حوضه بر حسب درصد، T ضریب درجه حرارت، t میانگین درجه حرارت بر حسب $^{\circ}\text{C}$ ، H میانگین بارندگی سالانه بر حسب mm ، W_{sp} نرخ سالانه فرسایش ویژه بر حسب $\text{m}^3/\text{year}/\text{km}^2$ و عدد π نیز مساوی با $3/14$ می‌باشد (قهاری و همکاران، ۱۴۰۰). برای تعیین ضرایب X_a ، Y و Ψ از اطلاعات جدول ۳ استفاده می‌شود (رفاهی، ۱۳۷۵).

محاسبه نسبت تحویل رسوب

رابطه کلی برای محاسبه نسبت تحویل رسوب رابطه‌ای است که در آن نسبت میان بار رسوبی و نرخ فرسایش در یک حوضه آبریز نشان داده شود. بنابراین، شکل کلی این رابطه به صورت زیر است که در آن Y بار رسوبی سالانه و E فرسایش سالانه می‌باشد (Richards, 1993; Dong et al., 2013):

$$SDR = \frac{Y}{E} \quad (8)$$

همان‌گونه که اشاره شد بر اساس مطالعات عمق سنجی، از زمان احداث سد شیرین دره (۱۳۸۴) تا سال ۱۳۹۵ در حدود 12 Mm^3 رسوبات وارد مخزن سد شده‌اند و می‌توان نرخ رسوب‌گذاری در این مدت را برابر با $1/1 \text{ Mm}^3/\text{year}$ در نظر گرفت. اگر نرخ رسوب‌گذاری در طی زمان ثابت فرض شود تا کنون (سال ۱۴۰۰) در حدود 17 Mm^3 از رسوبات وارد مخزن سد شده است.

با توجه به اینکه مخزن سد شیرین دره در منتهی‌الیه خروجی حوضه آبریز خود قرار دارد، می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که مجموع رسوباتی که در اثر انواع مختلف فرسایش از بستر خود جدا شده و توسط آب‌های جاری منتقل می‌شوند، وارد مخزن سد شده و ته‌نشین می‌شوند؛ بنابراین، جهت محاسبه نسبت تحویل رسوب واقعی (SDR_o) از تقسیم نرخ سالانه بار رسوبی ته‌نشین شده در مخزن ($1/1 \text{ Mm}^3/\text{year}$) بر مقدار فرسایش سالانه که به روش EPM برآورد گردید، استفاده شد.

جدول ۳- تعیین ضرایب حساسیت خاک به فرسایش (Y)، استفاده از زمین (X_a) و فرسایش حوزه (Ψ) جهت تعیین ضریب شدت فرسایش و رسوبدهی (Z) در منطقه مورد مطالعه (رفاهی، ۱۳۷۵)

ویژگی	امتیاز	ضریب
در بیش از ۸۰ درصد از سطح منطقه فرسایش خندقی مشاهده شود	۱	حساسیت خاک به فرسایش (Y)
در حدود ۸۰ درصد از سطح منطقه فرسایش خندقی و شیاری مشاهده شود	۰/۹	
در حدود ۵۰ درصد از سطح منطقه فرسایش خندقی و شیاری مشاهده شود	۰/۸	
در سطح وسیعی از منطقه فرسایش سطحی و حرکات توده‌ای و فرسایش خندقی و شیاری و پدیده کارستی شدن مشاهده شود	۰/۷	
در سطح وسیعی از منطقه فرسایش سطحی مشاهده شود	۰/۶	
در ۵۰ درصد از منطقه فرسایش سطحی مشاهده شود	۰/۵	
در ۲۰ درصد از منطقه فرسایش سطحی مشاهده شود	۰/۴	
در منطقه آثاری از فرسایش مشاهده نشود	۰/۳	
در سطح وسیعی از منطقه زمین‌های کشاورزی با آثار فرسایشی ناچیز مشاهده شود	۰/۲	
در سطح وسیعی از منطقه جنگل‌ها و مراتع با آثار فرسایشی ناچیز مشاهده شود	۰/۱	
زمین‌های غیرقابل کشت	۱	استفاده از زمین (X _a)
زمین‌های تپه‌ماهوری شخم‌خورده برای کشاورزی	۰/۹	
باغ‌های میوه و درختان غیر مثمر	۰/۸	
باغ‌های ایجادشده بر روی تراس‌های آبرفتی	۰/۷	
جنگل‌های مخروطیه و بوته‌زارهای روی زمین‌های فرسایش یافته	۰/۶	
مراتع کوهستانی	۰/۵	
جنگل‌های دائمی و گیاهان علوفه‌ای	۰/۴	
مراتع مناطق مرطوب	۰/۳	
جنگل‌های انبوه روی شیب‌های تند	۰/۲	
جنگل‌های انبوه روی شیب‌های متوسط	۰/۱	
ماسه، سنگریزه، شیست، مارن حاوی املاح گچ و نمک	۲	ضریب فرسایش حوزه (Ψ)
لس، توف، خاک شور و قلیایی، خاک استپی	۱/۶	
آهک تخریب‌شده، رس و مارن بدون املاح	۱/۲	
ماسه‌سنگ قرمز و رسوبات فلیشی	۱/۱	
شیست خردشده، میکاشست، گنیس، شیست آرژیلیت‌دار	۱	
سنگ‌آهک سخت، خاک‌های هوموس دار	۰/۹	
خاک‌های قهوه‌ای جنگلی و کوهستانی	۰/۸	
خاک‌های هیدرومورف سیاه یا خاکستری	۰/۶	
خاک‌های چرنوزوم و رسوبات آبرفتی با بافت دانه متوسط	۰/۵	
سنگ‌های آذرین و دگرگونی سخت و متبلور شده	۰/۲۵	

ارتفاع، طول و تراکم آبراهه در یک حوضه آبریز استفاده می‌شود.

واسنجی روش‌های برآورد نسبت تحویل رسوب

جهت واسنجی روش‌های مختلف برآورد نسبت تحویل رسوب و میزان دقت آن‌ها از سه شاخص مختلف استفاده شد که روابط محاسبه آن‌ها به صورت زیر می‌باشد (Ngaruye et al., 2018; Jordan and Messner, 2020):

$$\text{Bias} = \text{SDR}_p - \text{SDR}_o \quad (9)$$

برای محاسبه نسبت تحویل رسوب پیش‌بینی‌شده (SDR_p) نیز از نتایج حاصل از سه روش هیدرولوژیکی، UNESCO و FSM برای مقدار بار رسوبی سالانه و از عدد حاصل از روش EPM جهت مقدار فرسایش سالانه در رابطه ۸ استفاده شد و نسبت تحویل رسوب پیش‌بینی‌شده به دست آمد. علاوه بر این، از روابط ارائه‌شده در جدول ۴ نیز جهت محاسبه نسبت تحویل رسوب پیش‌بینی‌شده استفاده گردید. در این روابط، از عواملی مانند مساحت، شیب آبراهه، اختلاف

مطلق خطای نسبی، DR نسبت اختلاف، SDR_o نسبت تحویل رسوب واقعی و SDR_p نسبت تحویل رسوب پیش‌بینی شده می‌باشد. هر چه میزان Bias و MARE به صفر نزدیک‌تر و هر چه میزان DR به یک نزدیک‌تر باشد دقت برآورد بیشتر خواهد بود.

$$MARE = \left| \frac{SDR_p - SDR_o}{SDR_o} \right| \times 100 \quad (10)$$

$$DR = \frac{SDR_p}{SDR_o} \quad (11)$$

در این روابط، Bias میزان انحراف برآورد، MARE میانگین قدر

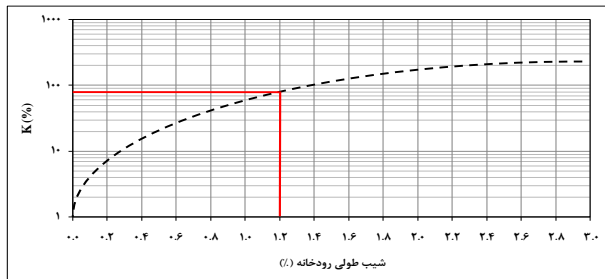
جدول ۴- مدل‌های تجربی مورداستفاده در محاسبه نسبت تحویل رسوب

منبع	واحد اندازه‌گیری	رابطه	مدل
Maner (1958)	A بر حسب mile ²	$\log SDR = 1.8768 - 0.4191 \log(10A)$	مدل‌های مبتنی بر مساحت
Boyce (1975)	A بر حسب km ²	$SDR = 0.375 A^{-0.2383}$	
Vonani (1975)	A بر حسب mile ²	$SDR = 0.42 A^{-0.25}$	
USDA (1975)	A بر حسب km ²	$SDR = 0.5656 A^{-0.11}$	
Renfero (1975)	A بر حسب km ²	$\log SDR = 1.7395 - 0.4191 \log(A)$	
USDA-SCS (1979)	A بر حسب mile ²	$SDR = 0.51 A^{-0.11}$	
USDA-SCS (1983)	A بر حسب mile ²	$SDR = 0.417762 A^{-0.134958} - 0.127097$	
Roel (1962)	A بر حسب km ²	$\log SDR = 4.5 - 0.23 \log 10A - 0.51 \operatorname{colog} \left(\frac{R}{L} \right) - 2.888$	مدل‌های مبتنی بر ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی
Williams and Brendt (1972)		$SDR = 0.627 SLP^{0.403}$	
Renfero (1975)		$\log SDR = 0.294259 + 0.82362 \log \left(\frac{R}{L} \right)$	
Mou and Meng (1980)		$SDR = 1.29 + 1.37 \ln RC - 0.025 \ln A$	

با توجه به شرایط حوضه، مقدار A در این روابط برابر با ۱۷۵۰ km²؛ مقدار SLP برابر با ۱/۲ درصد؛ مقدار R برابر با ۱/۷۶ km؛ مقدار L برابر با ۶۰ km و RC برابر با ۵۲ km/km² تعیین شد.

رسوبی بر اساس این روش برابر با ۸۴۲۵۶۰ ton/year یا m³/year ۶۲۴۱۰۰ برآورد می‌شود.

نتایج و بحث



شکل ۲- نمودار تجربی نسبت بار بستر به بار معلق در رودخانه‌ها (برگرفته از Peterson, 1986)

با توجه به نقشه مقدار شیب و رده‌های مختلف آن در حوضه آبریز مورد مطالعه (شکل ۳-الف و ۳-ب) مشخص می‌شود در بخش عمده‌ای از این منطقه شیب‌های متوسطی مشاهده می‌شود که بین ۵ تا ۴۵° هستند و در نزدیکی مخزن سد و رودخانه‌های اصلی مقدار شیب کم‌تر می‌شود. همچنین، زمین‌هایی با شیب زیاد و بیشتر از ۴۵° در منطقه مشاهده نمی‌شود. از طرفی بر اساس نقشه توزیع ارتفاعات و رده‌های مختلف آن (شکل ۳-ج و ۳-د)، به‌طور عمده اختلاف ارتفاع در هر ۵ km بین ۲۰۰ تا ۵۰۰ m می‌باشد؛ بنابراین، امتیاز عامل

بر اساس آمار ثبت‌شده در ایستگاه قلعه بربر، دبی بار معلق رسوبی در طی دوره آماری بین سال‌های ۱۳۸۵-۱۳۸۴ تا ۱۳۹۷-۱۳۹۶ برابر با ۸۶۸۲۴۸ ton/year به دست آمد. در شکل ۲، نمودار تجربی به‌منظور تعیین نسبت میان دبی بار معلق و بار بستر رسوبی نشان داده شده است. شیب رودخانه شیرین دره در محل ایستگاه قلعه بربر در حدود ۱/۲ درصد می‌باشد؛ بنابراین، نسبت K در رابطه ۲ برابر با ۸۰ درصد یا ۰/۸ به دست می‌آید. این موضوع به این معنی است که نسبت میان بار بستر به بار معلق رسوبی ۰/۸ می‌باشد. از این‌رو با توجه به مقدار بار معلق رسوبی، نرخ بار بستر رسوبی در حدود ton/year ۶۹۴۵۹۸ تخمین زده شد و با جمع مقادیر نرخ بار بستر و بار معلق رسوبی، نرخ بار مجموع رسوبی برابر با ton/year ۱۵۶۲۸۴۶ به دست می‌آید که با در نظر گرفتن چگالی رسوبات در حدود ton/m³ ۱/۳۵ (Ongley, 1996)، این عدد برابر با m³/year ۱۱۵۸۰۰۰ به دست می‌آید.

همان‌گونه که اشاره شد، ارتفاع رواناب جاری در حوضه آبریز مورد مطالعه برابر با ۱/۷۳ inch تخمین زده شد. مساحت کل حوضه آبریز نیز برابر با ۶۷۵/۶۷ mile² است که با قرار دادن این اعداد در رابطه محاسبه رسوب‌دهی ویژه به روش UNESCO (رابطه ۳)، مقدار ۱۲۴۷ ton/mile²/year به دست می‌آید؛ بنابراین، نرخ بار مجموع

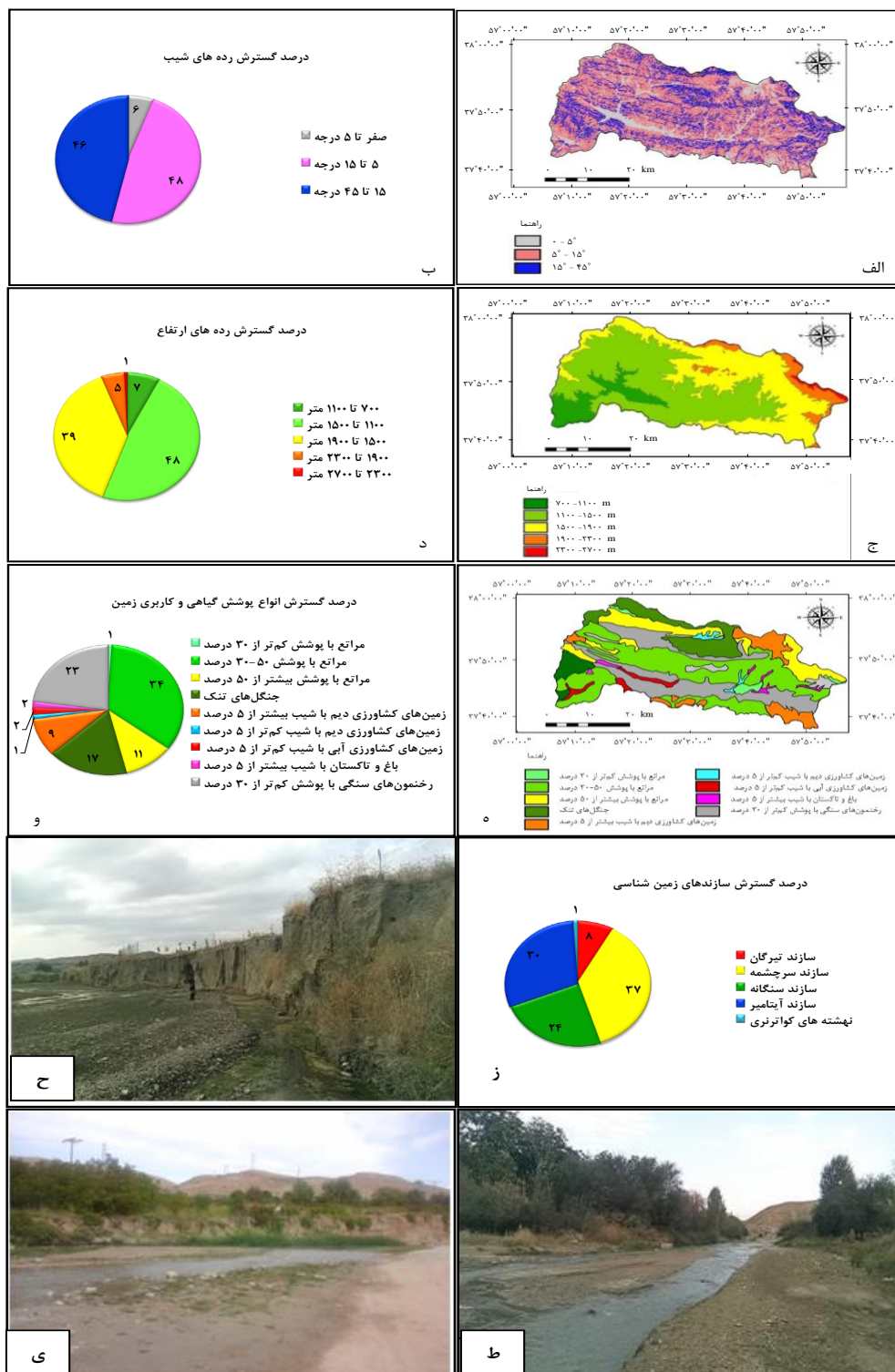
سنگ‌های منطقه به‌طور عمده شامل مارن، شیل و ماسه‌سنگ موجود در سازندهای سرچشمه، سنگانه و آیتامیر و مقدار محدودی از آهک سازند تیرگان می‌باشد؛ بنابراین، مقدار $1/2$ از جدول ۳ نیز به‌عنوان مقدار ضریب Ψ در نظر گرفته شد و ضریب Z برای منطقه برابر با $0/6$ به دست آمد. T نیز مقداری برابر با $1/18$ داشت که با جایگزینی این اعداد در رابطه ۷، فرسایش ویژه سالانه در منطقه $m^3/year/km^2$ برابر با 1426300 تخمین زده می‌شود. در شکل ۴ نتایج حاصل از سه روش فوق با یکدیگر و همچنین با مجموع حجم رسوباتی که از زمان ساخت سد در مخزن آن ته‌نشین شده‌اند مقایسه گردیده‌اند. بر این اساس، روش FSM نسبت به دو روش دیگر مقدار بسیار بیشتری را تخمین زده است و همچنین اختلاف زیادی با مجموع حجم رسوبات مخزن سد نشان می‌دهد. در مقابل، روش UNESCO کم‌ترین حجم رسوبات را برآورد نموده است. از میان این سه روش، روش هیدرولوژیکی اختلاف بسیار کمی را با مجموع رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد نشان می‌دهد. با توجه به مجموع رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد شیرین دره در طی ۱۶ سال ($17 Mm^3$) و نرخ سالانه تولید آن ($1/1 Mm^3/year$) و همچنین نرخ فرسایش سالانه حاصل از روش EPM که در بخش پیشین به آن اشاره شد ($1426300 m^3/year$)، نسبت تحویل رسوب واقعی برابر با $0/78$ به دست می‌آید.

در جدول ۵ نسبت‌های تحویل رسوب محاسبه‌شده بر اساس روش‌های هیدرولوژیکی، UNESCO و FSM به همراه روش‌های تجربی که رابطه آن‌ها در جدول ۴ آورده شده است و مقادیر شاخص‌های خطا سنجی محاسبه‌شده برای آن‌ها، نشان داده شده است.

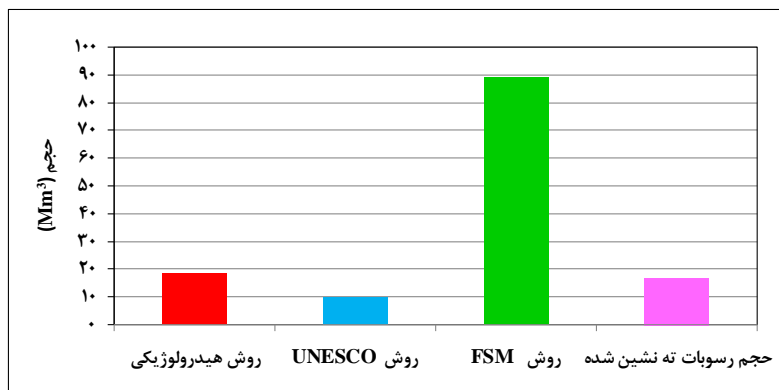
همان‌گونه که مشاهده می‌شود از میان روش‌های تجربی مورد استفاده در تخمین نسبت تحویل رسوب، روش هیدرولوژیکی نسبت به دو روش دیگر توانسته است نسبت تحویل رسوب را به مقداری نزدیک‌تر به نسبت تحویل رسوب واقعی برآورد نماید. پیش از این، در شکل ۴ نشان داده شد که این روش نزدیک‌ترین مقدار را به حجم رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد برآورد نموده است. در مقابل، بر اساس شاخص‌های خطا سنجی، روش FSM به‌عنوان نامناسب‌ترین روش تخمین نسبت تحویل رسوب انتخاب می‌شود. در شکل ۴ نیز نشان داده شد که حجم رسوبات برآوردی به این روش بیشترین اختلاف را با حجم رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد دارا می‌باشد. از میان مدل‌های مبتنی بر مساحت و ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی، مدل‌های ارائه‌شده توسط Renfero (1975) و Williams and Berndt (1972) بر اساس مقادیر شاخص‌های خطا سنجی به ترتیب به‌عنوان نامناسب‌ترین و مناسب‌ترین مدل تجربی برآورد نسبت تحویل رسوب انتخاب شدند.

توپوگرافی در مدل FSM برابر با ۲ در نظر گرفته می‌شود. بر اساس نقشه پوشش گیاهی و کاربری زمین در حوضه آبریز مورد مطالعه و درصد گسترش انواع مختلف آن در منطقه (شکل ۳-۵ و ۳-۶)، این نکته مشخص می‌شود که بخش عمده پوشش گیاهی در این حوضه مراتعی با پوشش ۳۰ تا ۵۰ درصد و رخنمون‌های سنگی با پوشش گیاهی کم‌تر از ۳۰ درصد می‌باشد؛ بنابراین، این منطقه پوشش گیاهی متراکمی نداشته و در نتیجه تماس خاک با پوشش گیاهی را می‌توان بین ۲۵ تا ۷۵ درصد در نظر گرفت. در نهایت، امتیاز عامل پوشش گیاهی در مدل FSM برابر با ۲ در نظر گرفته می‌شود. بر اساس نقشه زمین‌شناسی و نوع سازندهای رخنمون یافته در حوضه آبریز مورد مطالعه و درصد گسترش آن‌ها (شکل ۱ و شکل ۳-۳)، مشخص می‌شود بخش عمده‌ای از این سازندها متشکل از مارن (سازند سرچشمه)، ماسه‌سنگ (سازند آیتامیر)، شیل (سازند سنگانه) و بخش کم‌تری آهک (سازند تیرگان) و رسوبات کواترنری هستند. در روش FSM به ماسه‌سنگ امتیاز ۱ و به مارن امتیاز ۳ اختصاص داده شده است. به دلیل اینکه سنگ‌شناسی غالب حوضه آبریز مورد مطالعه ترکیبی از این سازندهای مارنی و ماسه‌سنگی بوده و وسعت هر یک از این سازندها با یکدیگر تقریباً برابر است، می‌توان میانگین اعداد ۱ و ۳ را به‌عنوان امتیاز عامل سنگ‌شناسی در نظر گرفت. در نتیجه، امتیاز این عامل در مدل FSM برابر با ۲ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به بازدهی‌های صحرایی از منطقه مورد مطالعه مشخص شد عامل فرسایش رودخانه‌ای یکی از مهم‌ترین عوامل فرساینده در این منطقه محسوب شده و در مناطق بسیاری از این حوضه می‌توان فرسایش رودخانه‌ای و آثار ناشی از آن را مشاهده نمود (شکل ۳-ح، ۳-ط، ۳-ی)؛ بنابراین، امتیاز عامل فرسایش رودخانه‌ای در مدل FSM برابر با ۳ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به شکل مشخص می‌شود که شکل حوضه کشیده است (ضریب Gravelius برابر با $1/6$) کشیدگی برخوردار بوده و از این رو می‌توان امتیاز ۱ را برای عامل شکل در مدل FSM در نظر گرفت. در نهایت، با استفاده از امتیازات به‌دست‌آمده، عدد $4293 ton/year/km^2$ به‌عنوان رسوب‌دهی ویژه حاصل از روش FSM به دست می‌آید. با در نظر گرفتن مساحت حوضه آبریز، مقدار رسوبی حاصل از این روش می‌باشد.

همان‌گونه که اشاره شد در مطالعه حاضر شدت فرسایش سالانه در حوضه آبریز رودخانه شیرین دره به روش EPM برآورد گردید. با مطالعه نقشه‌ها و همچنین بازدهی‌های میدانی از منطقه مشخص شد که فرسایش سطحی در سطح وسیعی از این حوضه مشاهده می‌شود؛ بنابراین ضریب Y را می‌توان $0/6$ در نظر گرفت. همچنین، پیشروی مزارع کشاورزی در داخل جنگل‌های منطقه مشاهده شد که نشان‌دهنده کاهش مساحت جنگل‌ها نسبت به زمین‌های کشاورزی می‌باشد. از این رو، عدد $0/6$ برای ضریب X_a به دست آمد. جنس



شکل ۳- (الف) نقشه مقدار شیب (برگرفته از احمدیان مقدم، ۱۳۹۱)؛ (ب) نمودار دایره ای درصد رده های مختلف شیب؛ (ج) نقشه توزیع ارتفاعات (برگرفته از احمدیان مقدم، ۱۳۹۱)؛ (د) نمودار دایره ای درصد رده های مختلف ارتفاع؛ (ه) نقشه پوشش گیاهی و کاربری زمین (برگرفته از الهی، ۱۳۹۱)؛ (و) نمودار دایره ای درصد انواع پوشش گیاهی و کاربری زمین؛ (ز) نمودار دایره ای درصد گسترش سازندهای مختلف زمین شناسی؛ (ح) دیواره فرسایشی ایجادشده در اثر عمل فرسایشی رودخانه شیرین دره؛ (ط) کانال عریض رودخانه شیرین دره در محل روستای قلعه بربر؛ (ی) رسوبات به جامانده از فرسایش در حاشیه رودخانه شیرین دره



شکل ۴- حجم برآوردی رسوبات تولیدشده در حوضه آبریز مورد مطالعه بر اساس سه روش مورد استفاده و مقایسه آن‌ها با حجم رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد

جدول ۵- نتایج حاصل از محاسبه نسبت تحویل رسوب واقعی و نسبت‌های تحویل رسوب پیش‌بینی شده و مقادیر شاخص‌های خطا سنجی آن‌ها

مقادیر شاخص‌های خطا				برآورد نسبت تحویل رسوب با استفاده از مدل‌های تجربی ارائه‌شده در جدول ۴				برآورد نسبت تحویل رسوب با استفاده از روش‌های تجربی		
سنجی		SDR _p	منبع	مدل	مقادیر شاخص‌های خطا سنجی			SDR _p	روش	
Bias	MARE	DR			Bias	MARE	DR			
۱/۰۹	۱۳۹/۷۴	۲/۳۹	۱/۸۷	Maner (1958)	۰/۰۳	۳/۸۴	۱/۰۳	۰/۸۱	هیدرولوژیکی	
-۰/۷۲	۹۲/۳۰	-۰/۰۷	-۰/۰۶	Boyce (1975)	-۰/۳۵	۴۴/۸۷	۱/۵۵	-۰/۴۳	UNESCO	
-۰/۷۰	۸۹/۷۴	-۰/۱۰	-۰/۰۸	Vonani (1975)	۳/۱۲	۴۰۰	۵/۰۰	۳/۹	FSM	
-۰/۵۴	۶۹/۲۳	-۰/۳۰	-۰/۲۴	USDA (1975)						
۱/۹۳	۲۴۷/۴۳	۳/۴۷	۲/۷۱	Renfero (1975)					مدل‌های مبتنی بر مساحت	
-۰/۵۴	۶۹/۲۳	-۰/۳۰	-۰/۲۴	USDA-SCS (1979)						
-۰/۷۴	۹۴/۸۷	-۰/۰۵	-۰/۰۴	USDA-SCS (1983)						
-۰/۰۹	۱۱/۵۳	-۰/۸۸	-۰/۶۹	Roel (1962)						
-۰/۰۷	۸/۹۷	-۰/۹۱	-۰/۷۱	Williams and Brendt (1972)					مدل‌های مبتنی بر ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی	
-۰/۶۸	۸۷/۱۷	-۰/۱۲	-۰/۱	Renfero (1975)						
-۰/۵۸	۷۴/۳۵	-۰/۲۵	-۰/۲	Mou and Meng (1980)						

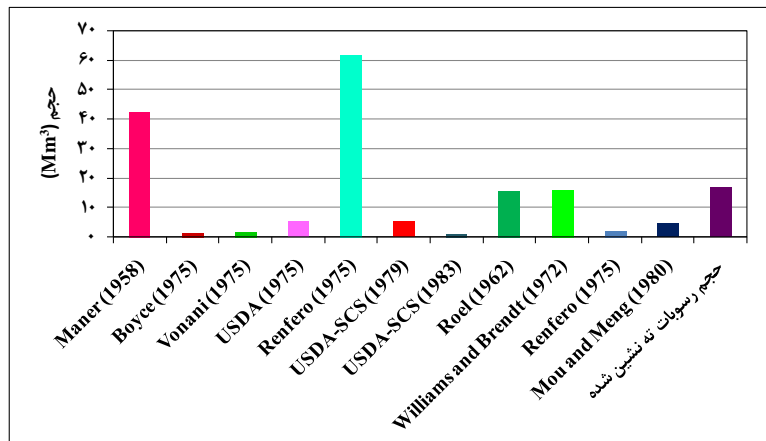
می‌دهد. در مقابل، مدل ارائه‌شده توسط Renfero (1975) بیشترین اختلاف را در این مورد نشان می‌دهد. همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد بر اساس شاخص‌های خطا سنجی این دو روش به ترتیب کم‌ترین و بیشترین خطا را در تخمین حجم رسوبات نشان دادند.

در مطالعه حاضر، بخشی از روش تجربی بهینه در تخمین نسبت تحویل رسوب مربوط به جمع‌آوری داده‌های بار رسوب معلق می‌باشد. از این رو، می‌توان به اهمیت داده‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌های هیدرومتری و استفاده از آن‌ها جهت محاسبات مختلف پی برد. در مطالعات مختلفی از داده‌های رسوب معلق جهت برآورد نرخ رسوب‌گذاری استفاده شده است، مانند مطالعه انجام‌شده توسط حیات

با داشتن شدت فرسایش سالانه و نسبت تحویل رسوب سالانه می‌توان حجم رسوبات را برآورد نمود. از این رو، با استفاده از شدت فرسایش سالانه که بر اساس روش EPM به دست آمد و نتایج مندرج در جدول ۵، مجموع رسوبات تولیدشده در حوضه آبریز مورد مطالعه بر اساس مدل‌های مبتنی بر مساحت و همچنین ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی تخمین زده شد. نتایج حاصل از این برآورد به همراه مجموع حجم رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد در شکل ۵ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مدل ارائه‌شده توسط Williams and Berndt (1972) کم‌ترین اختلاف را با مجموع حجم رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد نشان

این مورد می‌تواند شامل آلودگی نمونه رسوب برداشت‌شده توسط مواد کنده‌شده از بستر رودخانه، ایجاد فشار به داخل ظرف نمونه‌گیری، تعداد نامناسب نمونه‌های برداشت‌شده از عمق کانال و زمان ناکافی باشند (Gitto et al., 2017).

زاده و همکاران (۱۳۹۶)، آقاییگی و همکاران (۱۳۹۹)، ونگ و لو و سیستی و همکاران (Wang and Lu, 2010; Cisty et al., 2021). البته، ناپستی دقت اندازه‌گیری و ایجاد خطا در ثبت داده‌های هیدرومتری را در افزایش دقت محاسبات نادیده گرفت. منابع خطا در



شکل ۵- حجم برآوردی رسوبات تولیدشده در حوضه آبریز مورد مطالعه بر اساس مدل‌های تجربی مبتنی بر مساحت و ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی و مقایسه آن‌ها با حجم رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد

(۱۳۹۹) نیز به این نتیجه رسیدند که کارایی روش FSM در مقایسه با سایر روش‌های تجربی از دقت پایین‌تری جهت تخمین بار رسوبی برخوردار می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه نرخ تولید بار رسوبی در حوضه آبریز سد شیرین دره با استفاده از سه روش هیدرولوژیکی، UNESCO و FSM تخمین زده شد. بر اساس مقایسه با مجموع حجم رسوباتی که از زمان احداث سد تا کنون در مخزن آن ته‌نشین شده است (Mm³) (۱۷)، مشخص شد که نرخ تولید بار رسوبی مجموع، بر اساس روش هیدرولوژیکی در مقایسه با دو روش ذکرشده دیگر به مقدار واقعی نزدیک‌تر است. شدت فرسایش سالانه بر طبق روش EPM مقدار $1426300 \text{ m}^3/\text{year}$ به دست آمد و بر اساس نرخ تولید رسوبات از زمان احداث سد تا کنون، نسبت تحویل رسوب واقعی برابر با $0/78$ محاسبه شد. نسبت تحویل رسوب پیش‌بینی‌شده بر اساس نتایج حاصل از روش EPM و سه روش تخمین بار رسوبی، به همراه برخی مدل‌های تجربی تخمین نسبت تحویل رسوب محاسبه شد. نتایج حاصل از واسنجی روش‌ها و مدل‌ها نشان داد که روش هیدرولوژیکی و مدل تجربی که در آن از شیب به‌عنوان عامل اصلی در تعیین نسبت تحویل رسوب استفاده می‌شود، با داشتن بیشترین مقدار دقت برآورد و کم‌ترین خطا مناسب‌ترین روش‌ها می‌باشند. با توجه به اینکه نسبت تحویل رسوب در منطقه از مقدار بالایی برخوردار می‌باشد، می‌توان

هم‌چنین، برآورد بار بستر با استفاده از روش تجربی و نسبت میان بار بستر به بار معلق رسوبی نیز می‌تواند همراه با خطاهایی باشد، زیرا در نمودار تعیین نسبت میان بار بستر به بار معلق رسوبی عامل شیب کانال اصلی به‌عنوان مهم‌ترین عامل در تعیین این نسبت در نظر گرفته شده است. این در حالی است که این نسبت می‌تواند به عوامل مختلفی مانند جنس مواد تشکیل‌دهنده بستر کانال، حجم آب جاری در کانال اصلی، خصوصیات فیزیکی بار بستر و بار معلق و هم‌چنین فعالیت‌های انسانی که موجب تغییر در هیدرولیک رودخانه می‌شوند بستگی داشته باشد. با این حال، در این مطالعه روش بهینه تخمین نسبت تحویل رسوب در مقایسه با دو روش UNESCO و FSM نتایج دقیق‌تری را در پی داشت. از طرف دیگر، در روش UNESCO تنها از تأثیر میانگین ارتفاع رواناب و مساحت حوضه در تعیین بار رسوبی استفاده می‌شود. در روش FSM نیز اگرچه تعداد عوامل مؤثر بر تولید بار رسوبی بیشتر است اما عواملی که می‌توانند موجب کاهش دقت این روش باشند شامل درجه‌بندی کلی عوامل و تعداد کم آن‌ها می‌باشند. میزان رسوب‌دهی یک حوضه علاوه بر عوامل مورد استفاده در روش FSM می‌تواند تحت تأثیر عوامل دیگری مانند اقلیم (دما، بارندگی، روزهای یخبندان و غیره)، نوع خاک، میزان رواناب سالانه و هم‌چنین فعالیت‌های انسانی مانند توسعه زمین‌های کشاورزی و تغییرات کاربری زمین باشد؛ بنابراین، روش FSM در طی این مطالعه به‌عنوان روشی با کم‌ترین دقت در برآورد نسبت تحویل رسوب انتخاب شد. کاویان و همکاران (۱۳۹۳) و باقریان کلات و همکاران

احمدیان مقدم، ر. ۱۳۹۱. بررسی و پهنه‌بندی پتانسیل خطر زمین‌لغزش در حوضه آبریز سد شیرین دره. پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد.

اصغری سراسکانرود، س.، فیض‌الله پور، م. و محمد نژاد آروق، و. ۱۳۹۲. مطالعه نسبت تحویل رسوب در حوضه آبریز رودخانه جاجرود. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. ۳(۳): ۶۷-۷۸.

افشار حرب، ع. ۱۳۷۳. زمین‌شناسی کپه داغ. انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، تهران.

آقایی، ن.، اسمعیلی عوری، ا.، مصطفی‌زاده، ر. و گلشن، م. ۱۳۹۹. ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر مقادیر رسوب معلق در تعدادی از حوضه‌های آبخیز استان اردبیل. جغرافیا و برنامه‌ریزی. ۳۴(۷۳): ۴۷-۶۶.

اکبر زاده، م.ر. ۱۳۹۴. برآورد بار رسوب معلق رودخانه‌ها به کمک تعدیل منحنی سنج به اساس مدل‌های چند متغیره وداده‌های آب و هوایی حوضه (مطالعه موردی رودخانه اترک بالایی و میانی). رساله دکترا سازه‌های آبی، پردیس بین‌الملل، دانشگاه فردوسی مشهد.

الهی، ف. ۱۳۹۱. نقش کاربری اراضی بالادست بر کیفیت آب‌های سطحی حوضه آبخیز سد شیرین دره. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

امامقلی زاده، ص.، خادمی، ن. و حسینی، س.ح. ۱۳۹۹. پیش‌بینی رسوب ورودی به مخزن سد شیرین دره با استفاده از مدل عددی HEC-RAS. مجله تحقیقات مدیریت حوضه آبریز. ۱۱(۹): ۲۲۲-۲۰۸.

امینی، ک.، ویسی، ف. و محمدی، س. ۱۳۹۷. تحلیل و تبیین اثرات احداث سدها بر معیشت پایدار نواحی روستایی (مطالعه موردی سد داریان هورامان). فصلنامه مطالعات راهبردی سیاست‌گذاری عمومی. ۸(۲۷): ۱۷۶-۱۵۵.

باقریان کلات، ع.، عباسی، ع.ا. و سلیمانپور، م. ۱۳۹۹. ارزیابی کارایی مدل‌های تجربی در برآورد رسوب‌دهی آبخیزهای کوچک مناطق نیمه‌خشک با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست. ۲۲(۸): ۱۶۷-۱۵۵.

حیات زاده، م.، اختصاصی، م.ر.، ملکی نژاد، ح.، فتح زاده، ع. و عظیم زاده، ح.ر. ۱۳۹۶. بهینه‌یابی برآورد میزان رسوب معلق در مناطق خشک؛ مطالعه موردی: حوضه فخرآباد مهریز (یزد). مجله علوم آب و خاک. ۲۱(۱): ۱۲۵-۱۱۳.

نوع آب و هوای منطقه که به‌طور غالب خشک و نیمه‌خشک بوده و همچنین نوع سازندهای گسترش‌یافته که در رده سنگ‌هایی با فرسایش‌پذیری بالا هستند را از جمله عوامل طبیعی مؤثر بر رسوب‌دهی و در نتیجه نسبت تحویل رسوب دانست. علت این موضوع که برخی از مدل‌ها و روش‌های تجربی برای برآورد نسبت تحویل رسوب در منطقه‌ای عملکرد بهتری دارند این است که در حوضه‌های آبریز مختلف نقش عوامل دخیل در فرسایش در رده‌های اهمیتی مختلفی قرار دارند. در نتیجه عاملی که در یک منطقه در درجه اول اهمیت برای تولید رسوب و فرسایش قرار دارد ممکن است در منطقه‌ای دیگر اهمیت چندانی نداشته باشد؛ بنابراین، ارزیابی دقت روش‌ها و مدل‌های تجربی درجه مناسب بودن آن‌ها را تعیین خواهد کرد و عوامل مؤثر در فرآیندهای فرسایش و رسوب‌گذاری در یک منطقه را شناسایی و رده‌بندی خواهد نمود. آنچه مسلم است این است که این قبیل مطالعات نیازمند اطلاعات دقیق‌تری در مورد عوامل مؤثر در تغییر روند فرسایش و رسوب‌دهی می‌باشند. از این رو، پیشنهاد می‌شود به‌منظور برآورد مناسب‌تر نسبت تحویل رسوب و تغییرات مکانی و زمانی آن، مطالعاتی شامل پایش تغییرات پوشش گیاهی و کاربری اراضی، تغییرات دمایی و الگوی بارندگی، نحوه توسعه زمین‌های کشاورزی و الگوی کشت و کار، جمعیت‌های انسانی، جانوری و گیاهی به انجام رسد. با توجه به اینکه در حوضه آبریز رودخانه شیرین دره سد مخزنی شیرین دره با هدف تأمین آب آشامیدنی بهداشتی و سالم و همچنین آب موردنیاز برای زمین‌های کشاورزی و فعالیت‌های صنعتی مختلف احداث شده است ضرورت انجام چنین مطالعاتی دو چندان می‌شود.

سیاس‌گذاری

این پژوهش بر اساس طرح پژوهشی شماره ۳/۴۷۹۸۴ (رساله دکتری) مصوب تاریخ ۱۳۹۷/۴/۲۰ به انجام رسیده است که بدین‌وسیله از حمایت معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین از شرکت آب منطقه‌ای خراسان شمالی که داده‌های مورد استفاده در این پژوهش را فراهم نمودند، صمیمانه سپاس‌گزاری می‌شود.

منابع

اسدی نلیوان، ا.، محسنی ساروی، م.، سور، ا.، دسترنج، ا. و طاعی، س. ۱۳۹۲. تعیین مناسب‌ترین روش تجربی برای تخمین نسبت تحویل رسوب با استفاده از EPM و ویژگی‌های فیزیکی حوضه: مطالعه موردی، حوضه آبریز قورچای، استان گلستان. مجله آبیاری و مهندسی آب. ۳(۱): ۲۹-۱۸.

- Dong, Y., Wu, Y.Q., Zhang, T.U. and Yang, W. 2013. The sediment delivery ratio in a small catchment in the black soil region of Northeast China. *International Journal of Sediment Research*. 28(2):111-117.
- Gavrilovic, S. 1998. The use of an empirical method (erosion potential method), for calculating sediment production and transportation in unstudied or torrential streams. *International Conference on River Regime*. May, Russia.
- Gitto, A.B., Venditti, J.G. and Kostaschuk, R. 2017. Representative point-integrated suspended sediment sampling in rivers. *Water Resources Research*. 53(26): 2956–2971.
- Jabbar, Y.C. and Yadav, S.M. 2019. Development of reservoir capacity loss model using bootstrapping of sediment rating curves. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 8(1): 216-230.
- Jain, M.K. and Kothiyari, U.C. 2000. Estimation of soil erosion and sediment yield using GIS. *Hydrological Sciences Journal*. 45(5): 771-786.
- Jordan, S. and Messner, M. 2020. The use of forecast accuracy indicators to improve planning quality: insights from a case study. *European Accounting Review*. 29 (31): 337-359.
- Maner, S.B. 1958. Factors affecting sediment delivery rates in the Red Hills physiographic area. *Transaction of American Geophysics*. 39(2): 669-675.
- Morris, G. 2020. Classification of management alternatives to Combat Reservoir sedimentation. *Water*. 12(3): 189-201.
- Mou, J. and Meng, Q. 1980. Sediment delivery ratio as used in the computation of watershed sediment yield. *Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Beijing, Peoples Republic of China*. 27(2): 27-38.
- Nawaz, A., Farooq, M., UI-Allah, A., Gogoi, N., Lal, R. and Siddique, H.M. 2020. Sustainable soil management for food security in South Asia. *Journal of Soil Science and Plant*. 25(3): 163-182.
- Ngaruye, I., Von Rosen, D. and Singull, M. 2018. Mean squared errors of small area estimators under a multivariate linear model for repeated measures data. *Communications in Statistics-Theory and Methods*. 48(8): 2060-2073.
- Ongley, E. 1996. Sediment Measurements. In: Bartram J, Ballance R (eds), *Water Quality Monitoring- A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes*. UNEP/WHO. London.
- Petersen, M.S. 1986. *River Engineering*. Prentice Hall, New Jersey.
- رفاهی، ح. ۱۳۷۵. فرسایش آبی و کنترل آن. انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- صدری، ب. ۱۳۹۳. بررسی کمی و کیفی منابع آبی و رسوبات حوضه آبریز سد شیرین دره (استان خراسان شمالی). پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی زیست محیطی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد.
- فرهی، گ.، خدشناس، س.ر. و علیزاده، ا. ۱۳۹۰. برآورد رسوب در استان خراسان شمالی با استفاده از مدل رگرسیون فازی. *مجله علوم مدیریت حوضه آبریز ایران*. ۵(۳): ۲۴-۱۱.
- فریدانی بردسکن، ف. ۱۳۹۱. مقایسه روش های EPM و CSY در برآورد فرسایش و رسوب دهی در حوضه های آبریز با استفاده از GIS، (مطالعه موردی: حوضه آبریز شیرین دره). پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.
- قهاری، غ.ر.، شادفر، س. و حسینی مرندی، ح. ۱۴۰۰. مطالعه کارایی مدل EPM جهت ارزیابی رسوب گذاری مخازن سدهای کوچک. *مجله مدیریت و مهندسی حوضه آبریز*. ۱۲(۲): ۱۱۴۵-۱۱۳۳.
- کاویان، ع.، عسگریان، ر.، ناطقی، ت.، جعفریان جلودار، م. و صفری، ع. ۱۳۹۳. ارزیابی کارایی مدل های PSIAC، FSM و EPM در برآورد تولید رسوب اراضی مرتعی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سرخ آباد، استان مازندران). *نشریه فضای جغرافیایی*. ۱۴(۴۸): ۷۹-۵۷.
- Armanini, A. 2018. *Principles of River Hydraulics*. Springer, New York.
- Boyce, R.C. 1975. *Sediment routing with sediment delivery ratios*. United States Department of agriculture Publication, Washington DC.
- Chalis, D., Kumar, L., Spalevic, V. and Skataric, G. 2019. Estimation of sediment yield and maximum outflow using the IntErO Model in the Sarada River Basin of Nepal. *Water*. 11(5): 102-119.
- Cisty, M., Soldanova, V., Cyprich, F., Holubova, K. and Simor, V. 2021. Suspended sediment modeling with hydrological and climate input data. *Journal of hydroinformatics*. 23(1):192-210.
- Colman, C.B., Garcia, K.M.P., Pereira, R.B., Shinma, E.A., Lima, F.E., Gomes, A.O. and Oliveira. P.T.S. 2018. Different approaches to estimate the sediment yield in a tropical watershed. *Soil Ecology*. 23(10): 123-135.
- da Silva, R.M., Santos, C.A.G. and Silva, A.M. 2014. Predicting soil erosion and sediment yield in the Tapacura catchment, Brazil. *Journal of Urban and Environmental Engineering*. 81(21):75-82.

- in Lakes and Reservoirs: A contribution to the International Hydrological Programme (IHP) -II Project A.2.6.1. UNESCO, Paris.
- Uri, N.D. 2001. A note on soil erosion and its environmental consequences in the United States. *Water, Air, and Soil Pollution*. 129(27):181-197.
- Verstraeten, G., Poesen, J., de Vente, J. and Koninckx, X. 2003. Sediment yield variability in Spain: a quantitative and semiquantitative analysis using reservoir sedimentation rates. *Geomorphology*. 50(23): 327-348.
- Vonani, J. 1975. *Soil Erosion Prediction*. New York University Publication, New York.
- Wang, J.J. and Lu, X.X. 2010. Estimation of suspended sediment concentration using Terra MODIS: An example from the lower Yangtze Rivr, China. *Science of the Total Environment*. 408(32): 1131-1138.
- Williams, J.R. and Brendt, A.D. 1972. Sediment yield computed with the universal equation. *Journal of Hydraulic Engineering*. 98(32): 2087-2098.
- Woznicki, S.A. and A.P. Nejadhashemi. 2013. Spatial and temporal variabilities of sediment delivery ratio. *Water Resources Management*. 27(2): 2483-2499.
- Wu, L. and Ma, X. 2020. Using five long time series hydrometeorological data to calibrate a dynamic sediment delivery ratio algorithm for multi-scale sediment yield predictions. *Environmental Science and Pollution*. 27(11): 16377-16392.
- Porterfield, G. 1977. *Computation of Fluvial-Sediment Discharge: Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey*. United States Geological Survey (USGS), Washington DC.
- Renfero, G.W. 1975. Use of erosion equation and sediment delivery ratio for predicting sediment yield. United States Department of agriculture Publication, Washington DC.
- Richards, K. 1993. *Sediment Delivery and the Drainage Network*. John Wiley and Sons, Chichester.
- Roehl, J.E. 1962. Sediment source areas, delivery ratios and influencing morphological factors. Commission of Land Erosion, October. New York University.
- Sanchez, Y., Martinez-Grana, A., Santos-Frances, F. and Yenes, M. 2018. Influence of the sediment delivery ratio index on the analysis of silting and break risk in the Plasencia reservoir (Central System, Spain). 91(2): 1407-121.
- United States Department of Agriculture (USDA). 1975. *Sediment Sources, Yields, and Delivery Ratios*. National Engineering Handbook. USDA Publication, Utah.
- United States Department of Agriculture - Soil Conservation Service (USDA-SCS). 1979. *Sediment sources, yields, and delivery ratios*. National Engineering Handbook. . USDA Publication, Utah.
- United States Department of Agriculture - Soil Conservation Service (USDA-SCS). 1983. *Sediment sources, yields, and delivery ratios*. National Engineering Handbook. . USDA Publication, Utah.
- UNESCO. 1985. *Methods of Computing Sedimentation*

Determining the Most Appropriate Method to Estimate Sediment Delivery Ratio in Shirin Darreh Dam Basin

M. Tajbakhshian¹, A. Mosaedi^{*2}, M.H. Mahmudy Gharaie³, S.R. Moussavi Harami³

Received: Sep.07, 2021

Accepted: Oct.14, 2021

Abstract

In this study, sediment load in Shirin Darreh Dam basin was estimated based on hydrological, UNESCO and FSM methods. Comparison between the total deposited sediments in the reservoir (17 Mm^3) and results of the three methods showed the hydrological and FSM methods, with the estimated value of 1158000 and 5565000 m^3/year were the most proper and the most improper ways to sediment load estimation, respectively. Based on EPM, annual erosion intensity was obtained about 1426300 m^3/year , and the actual sediment delivery ratio was calculated about 0.78. The predicted sediment delivery ratio based on the results of EPM method and the three methods of total sediment load, and some of empirical models, was calculated. The results of the calibration showed that the hydrological method and the empirical model, in which the slope is the most important factor to obtain the sediment delivery ratio, with minimum error and maximum accuracy, were the most proper methods.

Key words: Calibration, Empirical model, Erosion intensity, Sediment delivery ratio, Shirin Darreh Dam

1- Ph. D. Candidate, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3- Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(*- Corresponding Author Email: mosaedi@um.ac.ir)