

رسوب گذاری در مخازن سدها

مسئله سد سفید رود

از هرمز پازوش*

چکیده:

در این مقاله مسئله رسوب گذاری در سدهای مخزنی، که به منظورهای گوناگون بر روی رودخانه ها ساخته می شوند و عوامل موثر در آن بیان شده و شیوه و شدت ته نشین رسوبات در سد سفید رود، بطور اخص مورد مطالعه قرار گرفته است. عمر سد سفید رود، که در پائین دست محل برخورد دو رودخانه قزل اوزن و شاهرود قرار دارد، متجاوز از ۱۰۰ سال پیش بینی شده بود. پس از بهره برداری تجربه نشان داد که سد با سرعتی بیش از آنچه براساس آمار ناقص پیش بینی شده بود از رسوبات انباشته می شود. اندازه گیری رسوبات ته نشسته در دو نوبت، بفاصله چند سال، نیز این موضوع را تأیید نمود. بررسی اندازه گیری ها نشان می دهد که شاخه بزرگتر رودخانه سفیدرود یعنی رودخانه قزل اوزن، با حدود ۷۶٪ از کل جریان، نزدیک به ۸۴ درصد از کل رسوبات وارد شده به مخزن را به همراه داشته است. قسمت بزرگی از این رسوبات در سالهای پرآب و بویژه در روزهای سیلابی حمل شده اند. بیش از ۸۰ درصد از این رسوبات در مخزن سد انباشته شده و رس و لای بر روی هم، نزدیک به ۸۵ درصد از این مواد ته نشین شده را تشکیل می دهد. از محاسبه عمر سد نتیجه شده است که سد در مدت سی سال (یعنی حدود ۱۰ سال دیگر) گنجایش مفید خود را بکلی از دست خواهد داد.

روشهای کنترل رسوبات در سدها بطور اعم و درسد سفید رود بطور اخص، به اختصار بیان شده اند. برای سد سفید رود بنظر می رسد که بهینه سازی عمل کرد (اپراسیون) مخزن، یکی از موثرترین عوامل در کنترل رسوبات باشد. لازم به تذکر است که این روش نیز چون هر روش دیگر نمی تواند راه حل اساسی مسئله بوده ولی شاید بدین وسیله بتوان تا حدود ۲۰٪ (یعنی حدود ۲ سال) به عمر باقیمانده سد افزود.

۱- مقدمه

سدها به منظور انجام هدفهای خاصی چون کنترل سیلابها، آبیاری، آبرسانی تولید توان الکتریکی، ایجاد راه آبی و بالاخره تفرج ساخته می شوند. هر یک از این هدفها

دارای جنبه های اقتصادی است، مثلاً "کنترل سیلابها، زیانهای ناشی از سیل در امریکا در سال ۱۹۵۴ برابر حدود ۴۴۰ میلیون دلار و در سال ۱۹۶۶ متجاوز از ۱ میلیارد دلار بوده است (۱۱). در ایران اطلاعات چندان دقیقی از

پدیده دردست نمی‌باشد اما اثرات آب شستگی تا ایستگاه پائین دست رودبار، بفاصله نزدیک به ۷ کیلومتر از سد، بخوبی مشهود است.

وجود سد، همچنین سبب تغییر مقدار جریان رودخانه می‌گردد. ساختن سد در منطقه مرطوب و پر باران می‌تواند موجب افزایش جریان سالانه در پائین دست‌گردد و وجود سد در منطقه کم باران و خشک‌از جریان رودخانه در پائین دست می‌کاهد (۲). در تمام سدهای بزرگ ایران حالت اخیر اتفاق افتاده است. برای سد سفیدرود* میانگین جریان در ایستگاه رودبار ۸ متر مکعب در ثانیه (و یا ۲۳۰ میلیون متر مکعب در سال) از میانگین جریان ورودی به مخزن، که در دوره ۱۴ ساله (۱۳۴۱ تا ۱۳۵۵) نزدیک به ۱۶۹ متر مکعب در ثانیه بوده است، کمتر می‌باشد (جریانهای ورودی به مخزن در ایستگاههای کیلوان بر روی رودخانه قزل اوزن، و لوشان بر روی شاهرود سنجیده می‌شوند). مولف چنین تخمین می‌زند که از این مقدار آب حدود ۹۰ میلیون متر مکعب از سطح دریاچه پشت سد تبخیر شده و بقیه به زمین فرو رفته و سبب تغذیه سفره های زیر زمینی می‌گردد.

۲- تولید، انتقال و به نشینی رسوبات

رسوبات در اثر فرسایش تولید می‌شوند. فرسایش به کنده شدن ذرات خاک از سطح زمین، بر اثر بارندگی، ذوب برفها و جریانهای ارضی و نهری گفته شده و به شکلهای نهری یا شیاری و ارضی دیده می‌شود. عوامل دیگری چون باد، یخبندان، نیروی وزن و انسان نیز در فرسایش موثراند. فرسایش وزنی یا نقلی شامل ریزش کناره رودخانه‌ها و یا لغزش توده های بزرگ خاک می‌باشد. عملیات ساختمانی، جاده سازی، حفر معادن و غیره از جمله عوامل فرسایش خاک هستند که توسط انسان صورت می‌گیرند.

خسارتهای وارد شده از سیلها در دست نمی‌باشد ولی وجود زیانهای فراوان را نمی‌توان نادیده گرفت. هدف از ساختن بیشتر سدهای بزرگ ایران، آبیاری و پس از آن تولید توان الکتریکی بوده است*. با این حال بهره برداری کامل از کانالهای آبیاری سد سفید رود، و به ویژه سد دز، سالها پس از اتمام ساختمان این سدها آغاز گردید. به همین علت بر اقتصاد بهره برداری از این سدها لطمه وارد شده است (۱). به هر حال سطح زیر کشت سدهای موجود ایران، در طرح ۱ میلیون هکتار بوده و گنجایش تولید توان آبی آنها نزدیک به ۸ میلیارد کیلو وات ساعت در سال می‌رسد. سهم سد سفید رود از این ارقام بترتیب ۲۴۰ هزار هکتار و ۴۲۰ میلیون کیلو وات ساعت است. اما، سطح زیر کشت این سد، در حال حاضر به ۱۵۰ هزار هکتار نیز نمی‌رسد.

سدها، در مقابل مزایای اقتصادی، مسایلی را نیز بوجود می‌آورند که مسئله رسوبات از مهم ترین آنهاست. ته نشینی رسوبات در مخزن سدها مسئله بی‌سست که در طرح هر سد باید در نظر گرفته شود، چه عمر سد و اقتصاد پروژه به آن بستگی دارد. اما مسایل زیستی نیز با ساختن سدها مطرح می‌گردد (۱۸)، که تولید و تکثیر انگلهای زیانبار چون پیوک (سد نیل مثال خوبی از توسعه این انگل است) و ایجاد تغییراتی در زندگی، مهاجرت و تولید مثل ماهیها از آن جمله است. به علت گیر افتادن رسوبات در مخزن سدها، آب خروجی توانائی فرسایش قابل توجهی داشته و سبب آب شستگی شدید رودخانه در پائین دست سد می‌گردد. طول این آب شستگی که به جنس و دانه بندی بستر رودخانه بستگی دارد گاهی به کیلومترها بالغ می‌شود. طول این آب شستگی مثلاً "در پائین دست سد هوور" در امریکا بیش از ۱۵۰ کیلومتر بوده و بستر رودخانه، در فاصله ۲۰ کیلومتری از سد حدود ۴/۲۵ متر، در عرض ۱۵ سال پس از ساختمان سد، گود شده است (۹) در مورد سد سفید رود اطلاع دقیقی از این

* در امریکا هدف اصلی از ساختن تمام سدها، استفاده از توان آبی نبوده است چه با هر ۳۰۰ گرم زغال سنگ حدود ۱kWh انرژی تولید می‌شود که ارزانتر است. در ایران نیز با هر لیتر نفت بیش از ۱۰ کیلو وات ساعت انرژی تولید می‌شود که تا به امروز چندین بار از انرژی الکتریکی ارزانتر بوده است.

** سد سفید رود در منجیل، و در فاصله کمی در پائین دست محل برخورد دو رودخانه قزل اوزن و شاهرود، قرار دارد. این سد که کارهای ساختمانی آن در آذر ماه ۱۳۳۳ شروع گردید و در اردیبهشت ۱۳۴۱ گشایش یافت، دریاچه ای به گنجایش ۱۸۰۰ میلیون متر مکعب را ایجاد نموده بود. در رقوم حداکثر ۲۷۶/۲۵ متر، سطح دریاچه ۵۶ کیلومتر مربع و طول آن در شاخه های قزل اوزن و شاهرود بترتیب ۲۵ و ۱۳ کیلومتر می‌باشد (۵).

فرسایش بستگی به:

۱- رژیم بارندگی (شدت و مقدار بارندگی و تناوب بارانها در سال)
 ۲- شدت جریانهای سطحی ۳- نوع و دانه بندی خاک
 ۴- شیب و وسعت حوزه آبریز ۵- جنس رویه سطحی زمین و پوشش گیاهی و نوع آن دارد . پوشش گیاهی یکی از مهم ترین عوامل در کنترل فرسایش خاک می باشد . برای حوزه ای معین ، به هنگام رگبارها و ذوب برفها تولید مواد رسوبی به حداکثر خود می رسد . بین فرسایش سالانه و مقدار جریان سطحی دستورهایی (فرمولهایی) چون فرمول فلمینگ

$$Q_s = aQ^n \quad (1)$$

وجود دارد . این فرمول گرچه براساس نتایج تجربی حاصل از ۲۵۰ حوزه آبریز در امریکا بدست آمده است ، اما استفاده از آن و فرمولهای مشابه ، باید کاملا " با احتیاط و تنها با اطمینان از سازگاری این فرمولها با نتایج تجربی از محل صورت گیرد . با استفاده از این فرمول در حوزه آبریز سفید رود با گرفتن ضرایب $a = 445000^*$ و $n = 0.72$ که با بیشترین فرسایش مطابقت می کند و مختص نواحی صحرائی است به نتیجه :

$$Q_s \text{ سال / تن} = 17/9 \times 10^6 = 18 \times 10^6$$

خواهیم رسید و حال آنکه اندازه گیری رسوبات معلق در ایستگاههای کیلوان و لوشان میانگین ۱۴ ساله ۵۵/۳ میلیون تن رسوب در سال را نشان می دهد (۳) . از این مقدار ۴۶ میلیون تن را رودخانه قزل اوزن و بقیه آن را شاهرود آورده است . این تفاوت فاحش ، خطرات ناشی از به کار بردن فرمولهای از این گونه را در منطقه بی که صحت فرمول برای آن تجربه نشده است نمایان می سازد .

در شرایط یکسان ، شدت فرسایش که بر حسب تن بر کیلومتر مربع بیان می شود ، معمولا " با افزایش در سطح حوزه کاهش می یابد . شدت فرسایش (از هر کیلومتر مربع) حوزه آبریز سفید رود به وسعت ۵۴۶۰۰ کیلومتر مربع ۱۰۶۵ تن در سال است و حال آنکه برای مخزن سد سن کارلوس در آریزونا به وسعت ۳۳۴۱۰ کیلومتر مربع ، این شدت نه تنها بیشتر نیست بلکه خیلی کمتر بوده و تنها به ۱۳۶ تن بر کیلومتر مربع در سال می رسد (۱۲) .

مواد رسوبی به همراه جریانهای ارضی و نهری به رودخانه ها وارد شده و قسمتی از آن توسط رودخانه حمل می گردد (این قسمت از کمتر از ۱۰ درصد تا بیش از ۷۰ درصد مواد رسوبی تولید شده تغییر می کند) . حمل رسوبات در رودخانه ها به دو گونه صورت می گیرد . قسمتی که از مواد ریز دانه تر تشکیل شده است به صورت معلق در آب حرکت می کند و " بار معلق " نامیده می شود و قسمت دیگری که رسوبات درشت دانه تر بوده و در بستر رودخانه می غلتند ، می خزند و گاهی نیز به جلو می جهند و " باربستری " گفته می شوند . بار معلق هر رودخانه که معمولا " قسمت بزرگتر مواد رسوبی آب آورده را تشکیل می دهد ، و نیز بار بستری هر رودخانه به شدت جریان (و در واقع سرعت جریان) رودخانه بستگی دارد و هر چه شدت جریان افزایش یابد رودخانه می تواند رسوبات بیشتری را حمل نماید . در عمل وزن باربستری که به مخزن سدها وارد می گردد بین ۵ تا ۲۰ درصد وزن رسوبات معلق تغییر می کند .

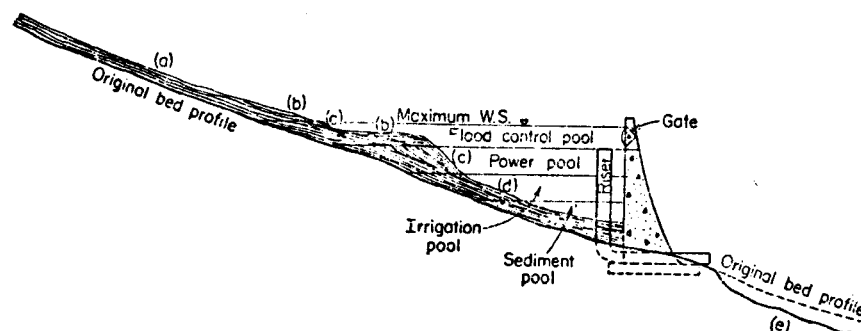
با وارد شدن جریان رودخانه به مخزن ، جریان به تدریج کند شده و هر چه آب به پشت سد نزدیکتر می شود جریان کندتر می گردد ، چنانکه عملا " آب در پشت سدهای بزرگ ساکن می شود . از این رو مخازن سدها همچون حوضچه های رسوبگیر تصفیه خانه های آب عمل نموده و با کند نمودن جریان ، توانائی حمل رسوبات را توسط آب کاهش داده و سبب ته نشینی قسمت بزرگی از رسوبات می گردند . البته ذرات درشتتر با سرعت بیشتر و ذرات ریزتر با سرعت کمتر ته نشین می شوند . سرعت ته نشینی دانه گرد ماسه به قطر ۱ mm حدود ۱۵/۵ سانتیمتر بر ثانیه بوده و برای ذره ای به قطر ۰/۱ میلیمتر این سرعت ۰/۹۰ سانتیمتر بر ثانیه است . سرعت سقوط دانه های کوچکتر از ۰/۱ میلیمتر تا چند میکرون (ماسه بادی ، لای و رس) با مجذور قطر متناسب است (قانون استوکس^۳) . سرعت سقوط ذرات غیرکروی تا حدودی از ذرات کروی شکل کمتر است (۱۰) ، برای ذرات بسیار ریز چون رس و مواد کلوئیدی پوسته آبی که دانه را فرا می گیرد سبب می شود که سرعت ته نشینی به مراتب کوچکتر از آن باشد که قانون استوکس نشان می دهد . البته در ته نشینی مواد رسوبی ، اثر اجتماع دانه ها

* این ضریب در دستگاه انگلیسی ، که ضرایب فرمول فلمینگ در آن دستگاه داده شده است ، ۳۴۲۰۰ است (۱۲) .

میلیمتر بوده و رس و لای بترتیب ۷۳ و ۱۲ درصد (یعنی رویهم ۸۵٪) از مواد رسوبی را تشکیل می‌دهند (۷). از آنچه گفته شد، نتیجه می‌شود که مواد درشت دانه چون قلوه سنگ و شن و ماسه در همان ابتدای مخزن ته نشین شده ولی ذرات ریزتر لای و رس که ته نشینی آنها به عمق ۵۰ متر و بیشتر، روزها وقت می‌گیرد در قسمتهای نزدیکتر به سد انباشته می‌شوند (شکل ۱-). طول عمل رسوبگذاری در پشت برخی از سدهای بزرگ از جمله سد سفید رود بالغ بر ۱۰ کیلومتر است. بعلاوه نتیجه می‌شود که در شرایط یکسان هرچه سد بزرگتر باشد، رسوبات وقت بیشتری برای ته نشین شدن داشته و بخش یا درصد بیشتری از آنها در پشت سد، گیر می‌افتند. این درصد که "بازده گیر افتادن رسوبات" یا بازده رسوبگیری^۳ نامیده می‌شود به حجم مخزن و مدت گذر جریان از مخزن و اندازه دانه‌ها بستگی دارد. بر این اساس، دو روش برای تخمین بازده رسوبگیری ارائه شده است که یکی روش چرچیل^۴ و دیگری روش برون^۵ نامیده می‌شود (۱۹). در روش چرچیل، بازده رسوبگیری تابعی از زمان نگهداری (نسبت گنجایش مخزن در میانگین ارتفاع کارکرد به میانگین شدت جریان ورودی) تقسیم بر میانگین سرعت در مخزن گرفته شده است درحالیکه برون با استفاده از داده‌های تجربی، برای سدهای با عمل

برلزجت آب و نیز بر سرعت هر ذره را نباید از نظر دور داشت. به علت اجتماع ذرات، لزجت افزایش یافته و سرعت ته نشینی ذرات کاهش می‌یابد. این اثر برای ذرات ریزدانه شدیدتر است. بعلاوه بنا بر تجربه مولف، مخلوط آب و رس در غلظتهای وزنی بیش از ۱۰٪ به صورت مایع غیر نیوتنی رفتار می‌نماید (۱۶ و ۱۵ و ۱۴). در نتیجه سرعت سقوط ذرات کلوئیدی و خاک رس علاوه بر عوامل بالا به ویژگیهای نانیتوتنی سیال نیز بستگی خواهد داشت. در این ارتباط، عملیات مجتمع شدن^۱ و دانه دانه شدن^۲ ذرات در اثر نیروهای الکتروشمی نیز وارد می‌گردد، که این خود به درجه اسیدی آب (PH) بستگی دارد. وجود همین نیروها است که رسوبات رسی ته نشین شده در مخزن سدها را تا مدتها به صورت مخلوط غلیظی با آب نگه میدارد. با ته نشینی رسوبات بیشتر، رسوبات زیر متراکم می‌گردند.

در سدهای بزرگ ایران، به طور متوسط در حدود ۸۵٪ رسوبات از نوع لای و رس می‌باشند. اندازه گیریها نشان داده اند که ۹۷٪ مواد معلق وارد شده به مخزن سفید رود قطری کمتر از ۰/۲۰ میلیمتر داشته (۴) و بعلاوه ۸۹٪ رسوبات معلق رودخانه قزل اوزن و ۷۸٪ رسوبات معلق رودخانه شاهرود از رس و لای و بقیه آنها از ماسه بوده است (۳). در مخزن سد دز، اندازه میانگین مواد رسوبی ۰/۰۰۳۵



شکل ۱ - شمای ته نشینی رسوبات در مخزن سدها

1- Flocculation

2- Deflocculation

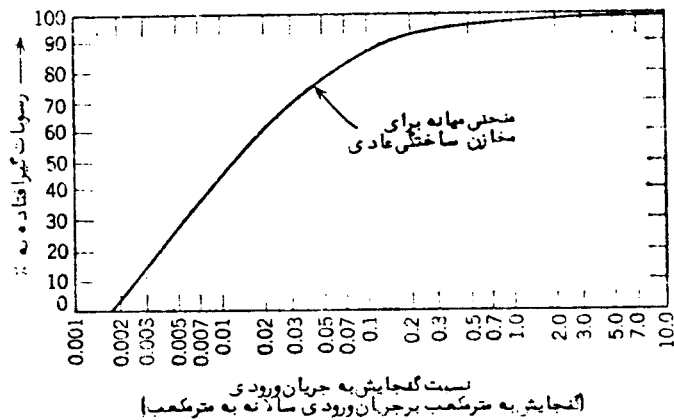
3- Trap efficiency

4- Churchill

5- Brune

میانگین جریان سالانه وارد به آن (نسبت C/I) از ۰/۲ بزرگتر باشد، بیش از ۹۰٪ است، البته نحوه عمل کرد مخزن (بهره برداری از سد) نیز در این بازه موثر است که بعداً مورد بحث قرار خواهد گرفت.

کرد عادی، این بازه را به صورت تابعی از نسبت حجم مخزن به میانگین جریان ورودی سالانه به مخزن، بدست آورده است (شکل ۲). چنانکه این شکل نشان می‌دهد بازه رسوبگیری برای سدهائی که نسبت گنجایش سد به



شکل ۲- تغییرات بازه رسوبگیری بر حسب نسبت C/I و نوع رسوبات (از برون)

در سال پرآب ۴۸-۴۷، به همراه ۱۴ میلیارد مترمکعب آب ۲۱۸/۳ میلیون تن رسوب به مخزن وارد شده که تقریباً ۴ برابر میانگین رسوبات سالانه در دوره ۱۴ ساله (۱۳۴۱ تا ۱۳۵۵) می‌باشد*.

هرگاه از غلظت رسوبات در ایستگاهی در پایین دست سد نیز اندازه گیری به عمل آید، رسوبات خارج شده از سد معین می‌گردد. از تفاوت رسوبات وارد شده به سد و خارج شده از آن در هر سال، وزن مواد رسوبی گیر افتاده در مخزن بدست می‌آید. این روش تعیین رسوبات گیر افتاده، بشرطی که ایستگاه پایین دست فاصله چندانی از سد نداشته باشد، دقیق تر از روش برون و نیز روش چرچیل می‌باشد. براساس تفاوت رسوبات معلق وارد به مخزن سد سفید رود از رسوبات معلقی که در ایستگاه رودبار اندازه گیری شده، میانگین رسوبات مانده در مخزن در دوره ۱۴ ساله، سالانه ۴۰/۱ میلیون تن گزارش شده است (۳). در واقع به علت فاصله بین سد و ایستگاه رودبار می‌توان انتظار داشت که رسوبات معلق گیر افتاده در مخزن تا حدودی از این مقدار تجاوز نماید.

۳- تخمین عمر سدها

عمر تقریبی هر سد براساس حجم رسوبی ته

در روش برون (و نیز روش چرچیل) نیاز به دانستن رسوبات وارد شده به مخزن سد می‌باشد. وزن رسوبات ورودی به مخزن را می‌توان با نمونه برداری از آب رودخانه و اندازه گیری غلظت مواد معلق در ایستگاهی در بالادست مخزن سد تعیین نمود. این اندازه گیری، گرچه، معمولاً روزانه صورت می‌گیرد ولی برای محاسبات تقریبی حتی اندازه گیریهای هفتگی نیز کفایت می‌کند. اما در روزهای سیلابی اندازه گیری رسوبات باید حتماً انجام گیرد چه رسوبات آب آورده در یکروز سیلابی ممکن است با مقدار کل رسوبات آورده شده در مدت چند ماه که جریان معتدل است برابر شود. میانگین ۱۴ ساله مقدار رسوبات معلق وارده به مخزن سفید رود، که از اندازه گیریهای روزانه در ایستگاههای کیلوان و لوشان بدست آمده است، ۵۵/۳ میلیون تن در سال می‌باشد. در سیل ۲۰ اسفند ۱۳۴۷، از رودخانه قزل اوزن ۱۵،۵۵۲،۰۰۰ تن رسوب به مخزن وارد شده است و در همین روز نیز رودخانه شاهرود ۷۵۳/۴۰۰ تن رسوب به مخزن وارد نموده است (۶) رسوبات وارد شده به مخزن در همین یکروز حدود ۳۰٪ میانگین رسوبات ورودی به مخزن در هر سال آبی بوده و از جمع رسوبات وارد شده در سال آبی ۴۴-۴۳ که ۱۴ میلیون تن است تجاوز می‌نماید (حجم آب وارد شده به سد در این سال ۳ میلیارد متر مکعب بوده است).

x در همین سال آبی، مخزن سد حدود ۹٪ از گنجایش اولیه خود را از دست داده است.

محاسبه وزن واحد حجم این نوع رسوبات معمولاً از رابطه:

$$W = W_1 + K \log t \quad (2)$$

استفاده می‌شود، که در آن W_1 و W به ترتیب وزن واحد حجم رسوبات پس از یکسال و t سال ته نشینی بوده و K ضریب ثابت رابطه است. مقادیر W_1 و K این رابطه (که به نام فرمول لین^۱ و کولزر^۲ موسوم است) در جدول ۱ داده شده است. برای ماسه $K=0$ و $W_1=1/5$ تن بر متر مکعب میباشد (۱۲).

نشین شده محاسبه می‌گردد. این حجم علاوه بر وزن رسوبات گیر افتاده که روش تعیین آن بیان شد به وزن واحد حجم مواد ته نشین شده نیز بستگی دارد. وزن واحد حجم مواد ته نشین رسوبات و عمر ته نشینی آنها بستگی به نوع آنها داشته و بین ۵/۳۰ تا ۲ تن بر متر مکعب متغیر است. این وزن برای ماسه مستقل از عمر ته نشینی بوده اما برای رس و لای متناسب با عمر (یا در واقع عمق ته نشینی) افزایش می‌یابد. برای

جدول ۱ - W_1 و K برای رسوبات مخزن (W_1 به تن به متر مکعب)

شرایط مخزن		رس		لای
W_1	K	W_1	K	
۱/۰۵	۰/۰۹۱	۰/۴۵	۰/۲۶	مواد رسوبی، همیشه در زیر آب
۱/۲	۰/۰۴۳	۰/۷۴	۰/۱۷	تغییرات سطح آب مخزن، عادی
۱/۲۷	۰/۰۱۶	۰/۹۶	۰/۱۰	تغییرات سطح آب مخزن، زیاد
۱/۳۱	۰/۰	۱/۲۵	۰/۰	مخزن، در بسیاری از مواقع خالی

به صورت سیکتری انباشته می‌شوند. حدود تغییرات وزن واحد حجم رسوبات سدها پس از ۵۰ سال ته نشینی در جدول ۲ - داده شده است (۱۲).

در هر حال، بیشترین وزن واحد حجم اولیه رسوبات ماسیه بی، لابی رسی به ترتیب حدود ۱/۵، ۱/۳۰ و ۱/۲۵ تن بر متر مکعب بوده و مربوط به حالتی است که مواد رسوبی بیشتر مواقع از آب خارج باشند. در غیر این صورت رسوبات

جدول ۲ - میانگین وزن واحد حجم رسوبات در سد ۵۰ ساله

مواد	دائماً مغروق	گاهی خارج از آب
رس	۰/۶۵ - ۰/۹۵	۰/۹۵ - ۱/۳۰
لای	۰/۸۸ - ۱/۲۰	۱/۲۰ - ۱/۳۵
ماسه	۱/۳۵ - ۱/۶۰	۱/۳۵ - ۱/۶۰
شن و ماسه غیریکدست	۱/۵۰ - ۲/۱۰	۱/۵ - ۲/۱۰

میانگین وزن واحد حجم مواد رسوبی در سدهای ایران پس از ۲۰ سال ته نشینی بین ۱/۱۰ تا ۱/۳۰ تن بر متر مکعب تخمین زده می‌شود با تقسیم میانگین سالانه وزن رسوبات گیر افتاده در مخزن بر میانگین وزن واحد حجم مواد رسوبی،

با استفاده از جداول ۱ یا ۲ می‌توان میانگین وزن واحد حجم رسوبات را انتخاب نمود. البته وجود هرگونه خطا در رقم انتخاب شده مستقیماً در محاسبه حجم رسوبات ته نشین شده در مخزن منعکس خواهد شد. در این مقاله،

روشهایی وجود دارند، یکی از روشهای معمول، روش صوتی^۳ است که اساس آن بر سرعت حرکت صوت در آب استوار است. با این روش که روش آبنگاری (هیدروگرافی) نیز نامیده شده است تراز سطح رسوبات در مقاطع عرضی مختلف برداشت شده و به این ترتیب پخش (و بنابراین حجم) رسوبات ته نشین شده، حدا از رسوبات وارد و خارج شده، و بدون اینکه نیازی به تعیین وزن واحد حجم رسوبات باشد معین می گردد. اما این روش وقت گیر و گران بوده و نیاز به افراد با تجربه دارد. این روش در سدهای بزرگ ایران چون سفید رود، دز و کرخ بکار رفته است. در سد سفید رود، این روش تاکنون دوبار مورد استفاده قرار گرفته است یکبار در سال ۱۳۴۹ و بار دیگر در ۱۳۵۵ که جزئیات کار در گزارشهایی آمده است (۴، ۳). طبق این اندازه گیریها در دوره ۹ ساله (از ۱۳۴۱ تا ۱۳۴۹) ۴۲۳ میلیون متر مکعب و در دوره ۱۴ ساله (از ۱۳۴۱ تا ۱۳۵۵) ۶۵۱ میلیون متر مکعب از حجم مخزن به علت رسوبگذاری از دست رفته است. این اندازه گیری بخوبی با محاسبات انجام شده در جدول-۲ می خواند. در تصویر ۱- وضع مواد رسوب کرده در رودخانه قزل اوزن در فاصله تقریبی ۵ کیلومتر در بالا دست سد نشان داده شده است.



تصویر ۱- وضع رسوبات در رودخانه قزل اوزن در فاصله ۵ کیلومتری از سد، دیماه ۱۳۵۹ (از مولف).

حجم از دست رفته مخزن در هر سال تعیین می شود. عمر سد با تقسیم حجم مفید سد (یعنی حجمی که پر شدن آن، سد از هدف اصلی که برای آن ساخته شده است باز می ماند) به حجم از دست رفته سالانه محاسبه می گردد. عمر سد سفید رود و چند سد بزرگ دیگر ایران و جهان به این ترتیب محاسبه و نتایج در جدول-۳ مقایسه شده اند. این جدول، عمر سد سفید رود را حدود ۳۰ سال نشان می دهد در حالی که طراحان خارجی آن، عمر آن را متجاوز از ۱۰۰ سال پیش بینی نموده بودند. بعلاوه از این جدول چنین بر می آید که عمر سدهای بزرگ ایران، در مقایسه با سدهای بزرگ جهان، نسبتاً "کوتاه" است. این موضوع به علت وضع خاص زمین شناسی و تکتونیک ایران می باشد. علاوه بر این سدها، به دو مخزن استثنائی دیگر نیز می توان اشاره نمود، یکی مخزن یا سواک آدر ژاپن است که هر ساله با از دست دادن ۶/۵ درصد از گنجایش خود در مدت ۱۳ سال ۸۵٪ آن از رسوب پر شده است (۴) و دیگری مخزن نوریس آدر ایالت تنسی آمریکا است. که هر ساله تنها ۰/۰۵ درصد از گنجایش خود را از دست می دهد (۱۳) و بنابراین پر شدن آن از رسوبات بیش از ۲۰۰۰ سال طول خواهد کشید.

چون با رسوبگذاری در مخزن، یعنی با کوچک شدن نسبت C/I ، بازده رسوبگیری کاهش می یابد عمر واقعی سدها تا حدودی بیش از آن است که محاسبات ساده جدول-۳ نشان می دهد. در این مورد با ترتیب جدولی مشابه با آنچه در مرجع (۲) آمده است می توان بر دقت محاسبات افزود، چنین محاسبه بی برای مخزن سفیدرود در جدول-۴ داده شده است. این جدول بر مبنای:

$$I = 5330 \times 10^6 \text{ m}^3 = \text{میانگین سالانه جریان}$$

$$X = 55/3 \times 10^6 = \text{میانگین سالانه، رسوبات معلق و بستری}$$

$$\text{تن} \quad 1/10 = 60/8 \times 10^6$$

$$\text{تن} / \text{m}^3 = 1/20 = \text{میانگین وزن واحد حجم}$$

مرتب شده است (که در آن مقدار رسوبات بستری ۱۰ درصد رسوبات معلق منظور شده است). بنابراین هرگاه بهره برداری از سد به صورت عادی گذشته ادامه یابد سد در کمتر از ۱۰ سال دیگر تقریباً "تمامی حجم مفید خود را از دست می دهد". البته این محاسبات اطلاعی درباره پخش مواد ته نشسته در مخزن بدست نمی دهد. برای تعیین پخش رسوبات

جدول ۳- خصوصیات هیدرولیکی و رسوبی برخی از مخازن بزرگ ایران و جهان

نام مخزن	سفید رود	دز	کرج	میدان	اواکه ^۲	منگلا ^۳
گنجایش کل به $10^6 m^3$	۱۸۶۰	۳۳۱۵	۲۰۵	۳۸۴۰۰	۲۹۲۰۰	۷۲۵۰
گنجایش مفید به $10^6 m^3$	۱۵۰۰	۲۴۸۰	۱۹۵	۳۳۶۰۰	۲۲۴۰۰	۶۵۹۰
سطح حوزه آبریز به Km^2	۵۶۴۰۰	۱۷۳۶۰	۸۶۰	۴۰۴۱۰۰	-	۳۳۳۰۰
جریان سالانه به مخزن $10^6 m^3$	۵۳۶۰	۶۴۳۰	۶۳۰	۱۶۰۲۰	-	۲۴۰۰۰
ونسبت (C/I)	۰/۳۵	۰/۵۲	(۰/۳۳)	(۲/۳)	-	(۰/۳)
رسوبات سالانه وارده به مخزن به $10^6 m^3$	۵۶/	۲۰	۲/	۱۲۵/۶	۳۹/۹	۵۱/
بازده رسوبگیری مخزن	۹۴-۹۰	-	-	۹۸-۹۶	۱۰۰ فرض شده است	-
کاهش حجم سالانه مخزن به درصد	۴/۰	≈ ۱	۱/۰	۰/۳۳	۰/۱۸	-
عمر تقریبی سد به سال	۳۰	۱۰۰	۱۱۰	۱۰۰	۶۰۰	۱۲۰
مورد استفاده مخزن ^۴	F.I.P.	F.I.P.	FIMP	FIMPR	FINPR	FIP

۱- دریاچه مید (Mead) بزرگترین مخزن آمریکا و همان دریاچه پشت سد هوور است، (مرجع ۱۳ ص ۱۶۱).

۲- مخزن اواکه (Oahe) یکی از مخازن بزرگ آمریکا در داکوتای جنوبی، (مرجع ۱۱ ص ۲۲۵).

۳- منگلا (Mangla) یکی از بزرگترین سدهای خاکی دنیا در پاکستان غربی (مرجع ۱۶). درآینده با افزایش ارتفاع این سد بر حجم مخزن افزوده خواهد شد و گنجایش کل آن به ۱۱۸۰۰ و گنجایش مفید آن به ۹۰۶۰ میلیون متر مکعب خواهد رسید.

۴- F = کنترل سیل، I = آبیاری، M = آبرسانی، N = کشتیرانی، P = تولید توان آبی، R = تفرج

جدول ۴ - محاسبه زمان لازم برای پر شدن ۸۰٪ از گنجایش مخزن سفید رود (با عمل کسر عسادی)

سالهای لازم برای پر شدن ۸۰٪ مخزن	افزایش حجم رسوبات مخزن در دوره	رسوبات گیر افتاده سالانه ۱۰۶ m ^۳ تن	بازده رسوبگیری		گنجایش جریان ورودی سالانه	گنجایش باقیمانده به ۱۰۶ متر مکعب
			میانگین	%		
۷/۵	۳۶۰	۴۸/۲	۵۷/۸	۹۵	۹۶	۱۸۰۰ ۰/۳۳۸
۷/۶	۳۶۰	۴۷/۳	۵۶/۸	۹۳/۵	۹۴	۱۴۴۰ ۰/۲۷۰
۷/۸	۳۶۰	۴۶/۱	۵۵/۳	۹۱	۹۳	۱۰۸۰ ۰/۲۰۳
۸/۳	۳۶۰	۴۳/۰	۵۲/۰	۸۵/۵	۸۹	۷۲۰ ۰/۱۳۵
جمع ۳۱/۲ سال					۸۲	۳۶۰ (۲۰٪ حجم کل) ۰/۰۶۸

۴- کنترل رسوبگذاری در مخازن

روشهایی برای کنترل رسوبگذاری در مخازن وجود دارند که عبارتند از: ۱- کاهش فرسایش با آبخیزداری در حوزه آبریز، ۲- کنترل ورود رسوبات به سد، ۳- کاهش مواد ته‌نشسته در مخزن، ۴- لارویی رسوبات ته نشین شده به روشهای مکانیکی. علاوه بر این روشها انتخاب محل صحیح سد و طرح دریچه‌های تخلیه نیز در کنترل رسوبات موثر است. به عنوان مثال، در برخی از سدهای کشور الجزیره، که توسط فرانسویان در زمان سلطه بر این کشور ساخته شده بودند در روزهای سیلابی آب با چگالی تا $1/4$ تن بر متر مکعب (یعنی آب با غلظت نزدیک به ۲۰٪ از رسوبات) از دریچه‌های تخلیه خارج شده است. آشکار است که طرح صحیح این مجاری نیاز به تجربه داشته و منطقی آن است که این تجربه از طرح و ساختن سدهای کوتاه بدست آمده و در سدهای بلند پیاده گردد و این همان روشی است که در کشورهای پیشرفته بچشم می‌خورد. مثلاً در آمریکا در دوره بین سالهای ۱۹۲۹ تا ۱۹۵۴ میلادی گنجایش متوسط مخازن بزرگتر از ۶ میلیون متر مکعبی ۱۰ برابر شده و از ۸۵ میلیون متر مکعب به ۸۵۰ میلیون متر مکعب رسیده است (۱۱).

عملیات آبخیزداری حوزه آبریز و تثبیت کف و دیواره‌های کانال رودخانه فرسایش را کاهش داده و گرچه منطقی ترین روش کنترل رسوبات بنظر می‌رسد ولی تنها برای حوزه‌های آبریز کوچک عملی می‌باشد. روشهای حفاظت خاک در حوزه‌های تا ۲۵۰ کیلومتر مربع با کاهشی تا ۸۰٪ در فرسایش و در حوزه‌های آبریز تا ۴۰۰۰ کیلومتر مربع با کاهشی تا ۴۸٪ در تولید مواد رسوبی همراه بوده است ولی در حوزه‌های آبریز بزرگ، اشکالات اقتصادی وجود دارد. بهترین روش حفاظت خاک ایجاد یک پوشش گیاهی است که سبب کاهش سرعت آب و گیرانداختن رسوبات حمل شده توسط آب می‌گردد. در حوزه‌های سد سفید رود، به نظر مولف، این روش مستلزم دستکم یک میلیارد تومان سرمایه‌گذاری بوده و تنها وقتی مقرون به صرفه است که پوشش سبز به صورت مرتع برای چرای صحیح و اصولی دام‌ها بهره برداری گردد. کنترل رسوبات وارد به مخزن با جلوگیری از ورود قسمتی از رسوبات به داخل مخزن صورت می‌گیرد. ساختن دیوارهای حایل در نقاط با

شیب تند و یا خاکهای سست که امکان ریزش و یا لغزش توده‌های خاک وجود دارد و نیز ساختن حوضچه‌های رسوبگیر از این قبیل است. حوضچه‌های رسوبگیر معمولاً برای ذخیره رسوبات وارد از یک سیلاب ۱۰۰ ساله (بزرگتر از سیلاب اسفند ۴۷) به اضافه رسوبات وارد در عرض ۲ تا ۳ سال با جریان عادی طرح می‌شوند. پس از پر شدن هر حوضچه رسوبگیر می‌توان اقدام به ساختن حوضچه یا سد رسوبگیر دیگر کرده و یا سد رسوبگیر را توسط روشهای مکانیکی لارویی نمود. برای سد سفید رود، به سد یا سدهای رسوبگیری با گنجایش دست کم ۲۰۰ میلیون متر مکعب نیاز است که بیش از گنجایش سد کرج بوده و اقتصادی بودن آن مشکوک بنظر می‌رسد.

روش دیگر برای کاهش ورود مواد رسوبی به مخزن می‌تواند آن باشد که آب مازاد بر احتیاج رودخانه قزل‌اوزن را، بویژه به هنگام سیلابها، اگر شرایط موضع نگاری (توپوگرافی) اجازه دهد از طریق (خواه تونل یا کانال) به طرف دیگر سد منحرف نمود. رودخانه شاهرود با جریان سالانه‌ی ۱۲۰۰ میلیون متر مکعب (حدود سی درصد بده قزل‌اوزن) تنها ۱۶٪ از کل رسوبات وارد به پشت سد را با خود به مخزن وارد می‌سازد. چون سالانه ۲۰۰۰ میلیون متر مکعب آب توسط این سد تنظیم می‌شود، انبار نمودن آب شاهرود به اضافه تنها ۱۰٪ جریان قزل‌اوزن در مخزن سد برای مصارف کفایت می‌کند. با این عمل عمر سد بیش از دو برابر افزایش خواهد یافت. براساس گفته مسئولان سازمان آب منطقه‌ی شمال چنین روشی نیاز به ایجاد تونلی به طول ۲۰ کیلومتر دارد. بنابراین اقتصادی بودن آن مشکوک بنظر می‌رسد. اما از چنین روش بدیع در یکی از سدهای قدیمی ایران بر روی رودخانه ترم‌آبرود (سد کرکر در محل گرمابدشت گرگان) استفاده شده است که باقیمانده‌های آن هنوز بچشم می‌خورد و نشان می‌دهد که ایرانیان سده‌ها پیش چنین روشی را برای دور کردن سیلابها از سد و ذخیره نمودن آب رودخانه در مواقع عادی که غلظت رسوبات پائین تر بوده است برای دازتر نمودن عمر سد - بکار گرفته‌اند.

کنترل در ته نشینی رسوبات ۱- با استفاده از مواد شیمیایی برای مجتمع کردن رسوبات ریز دانه و یا قراردادن مواد آلی (چون یونجه و غیره) در مخزن سد (۱۹) و ۲- با مطالعه در بهینه سازی^۱ برنامه بهره برداری مخزن عملی

۱/۰۴ تن بر متر مکعب مطابقت می نماید بمراتب از حداکثر غلظت رسوبات وارد شده به سد به هنگام سیلابها که حدود ۴۰۰ گرم در لیتر بوده است کوچکتر می باشد .

تخلیه (یا لارویی) رسوبات ته نشسته به روشهای مکانیکی نیز امکان دارد ولی خارج کردن هر متر مکعب از رسوبات چندین برابر سرمایه اولیه برای ایجاد هر متر مکعب از حجم مخزن هزینه بر می دارد . تخلیه هر متر مکعب رسوب بیش از ۲۰۰ ریال تمام می شود در حالیکه ایجاد هر متر مکعب از مخزن سفید رود در حال حاضر بین ۲۵ تا ۳۰ ریال خرج بر می دارد (هزینه ساختن سد ۴۵۰ میلیون تومان بوده است یعنی ایجاد هر متر مکعب از مخزن ۲/۵ ریال ، به هنگام ساختمان خرج برداشته است) . بنابراین، این روش برخلاف ادعای برخی افراد ، پرخرج ترین و غیر عملی ترین روش کنترل می باشد .

خلاصه و نتیجه گیری

سفید رود که در طرح آن از امار کوتاه رسوب (تنها در محل تاریک در پائین دست محل سد اندازه گیری رسوبات از سال آبی ۳۸-۳۷ انجام شده است ولی در ایستگاههای کیلوان ولوشان تا سال آبی ۴۵-۱۳۴۴ آمار برداشت نشده است) و احتمالاً "از فرمولهای تجربی (چون فرمول فلمینگ) استفاده شده و عمر آن ، دست کم ۱۰۰ سال پیش بینی شده بود ، در مدتی کمتر از ۱۵ سال بیش از ۴۰٪ از گنجایش مفید خود را از دست داده است . محاسبه نشان می دهد که این سد در عرض ۱۰ سال آینده تقریباً "تمامی حجم مفید خود را از دست خواهد داد . از اینجا نتیجه می شود که طرح سدهای آتی (خواه بلند و یا کوتاه) باید براساس امار چند ساله (دست کم ۵ساله) از رسوبات صورت گیرد ، مگر آنکه اطمینان کافی از بی اهمیت بودن مقدار رسوبات در رودخانه وجود داشته باشد . در سدهای آتی بر روی دریاچه های تخلیه نیز لازم است تجربه شود . به علاوه مسأله بسیار مهم در عمر سد مطالعه و تنظیم برنامه عمل کرد مخزن سد می باشد . در مخزن سد سفید رود مطالعه دقیق و همه جانبه برای بهینه سازی عمل کرد مخزن بمنظور افزایش عمر سد پیشنهاد می شود . توسط این روش شاید بتوان تا ۲۰ و یا ۳۰ درصد بر عمر باقیمانده سد افزود .

می گردد . روش اول معمولاً " غیر اقتصادی است به ویژه در سدهای بزرگ از اینرو در روش دوم بحث می شود . در مخزن سفید رود تاریخ بروز سیلابها در بالا دست مخزن با زمان حداکثر رسوبات خارج شده از سد نمی خواند و حال آنکه پیش از ذوب کامل برفها دریاچه های تخلیه برای خارج کردن سیلابهایی چون سیلاب ۲۰ اسفند ۱۳۴۷ ، بهتر بود باز گذاشته می شدند تا قسمتی از رسوبات ته نشین شده نیز در اثر جریانهای ثقلی خارج گردند . با دقیق شدن در آمار رسوبات ورودی به سد ، و خروجی از آن ، همچنین دیده می شود که کمترین رسوبات خروجی از سد در سال آبی ۴۴-۴۳ (که کم آب ترین و بنابراین رسوبات وارده* حداقل بوده) رخ نداده است . بنظر مؤلف ، بهبود بهره برداری از مخزن عملی تر از سایر روشهای کنترل رسوبگذاری در مخزن بوده و نیاز به مطالعه بیشتر دارد . البته برنامه بهره برداری بهینه برخلاف نظر عامیانه به خارج نمودن آب از دریاچه های سد به میزان احتیاجات آبرسانی و غیره محدود نشده بلکه شیوه و زمان بندی پروخالی کردن مخزن سد و پیش بینی زمان بروز سیلابها و خشکیها و غیره را شامل می گردد . برای خارج نمودن رسوبات بیشتر ، سطح آب مخزن به هنگام بروز سیل باید در کمترین ارتفاع ممکن قرار داشته باشد . با توجه به اینکه سیلابها در اواخر اسفند و در اوایل فروردین ماه جاری می شوند این عمل تا حدودی مخاطره آمیز است مگر آنکه حجم برف انبار شده در حوزه آبریز سد با برف سنجی تعیین شده باشد . با دقت در آمار رسوبات ورودی و خروجی چنین بنظر می رسد که از سال ۱۳۵۰ به بعد برنامه بهره برداری (یا عملکرد) مخزن سفیدرود بهبود یافته باشد . به هر حال ، این روش نیز چون سایر روشها قطعی نیست ولی ممکن است بتواند عمر باقیمانده سد را بین ۱۰ تا ۳۰ درصد افزایش دهد .

البته علاوه بر عمل کرد عادی مخزن ، تخلیه مواد رسوبی با پائین بردن غیر عادی سطح آب سد نیز عملی می گردد . این روش هیدرولیکی که نام "شاس" بر آن گذاشته شده است از ۱۲ مهر تا ۱۵ دیماه ۱۳۵۹ در سد سفید رود بمرورد اجرا گذاشته شد . براساس گزارشات توسط این روش حدود ۲۴ میلیون تن رسوب از سد تخلیه شده است . از اندازه گیریها میانگین غلظت مواد رسوبی خارج شده ۴۰ گرم در لیتر بدست آمده است (۸) . این غلظت که با وزن مخصوص

* رسوبات وارده به مخزن در این سال آبی تنها ۱۴ میلیون تن بوده است .

"مراجعه"

- 14- Pazwash, H. "Drag Forces on Bodies Moving Through Aqueous Clay Suspensions", Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Ill., Urbana, Jan. 1970.
- 15- Pazwash, H. and J.M. Robertson, "Forces on Bodies in Bingham Fluids," Journal of Hydraulic Research, Vol. 13, No. 1, 1975, PP. 35-55.
- 16- Pazwash, H. and J.M. Robertson, "Couette Viscometry of Clay-Water Mixtures as Bingham Plastics", Iranian J. of Science and Technology, Vol. 4, 1976, PP. 107-114.
- 17- Szechowycz, R.W. and M.M. Qureshi, "Sedimentation in Mangla Reservoir," J. of the Hyd. Div., ASCE, Vol. 99, Sept. 1973, PP. 1551-1573.
- 18- Environmental Effects of Large Dams, Published by American Society of Civil Engineers, 1978.
- 19- "Sediment Control Methods: D. Reservoirs", By the Task Committee for Preparation of Manual on Sedimentation, J. of the Hyd. Div., ASCE, Vol. 99, Apr. 1973, PP. 617-635.
- ۱- پازوش، هرمز، "نگاهی به برنامه های به-سره برداری از منابع آب ایران، در گذشته" مجله دانشکده فنی شماره ۴۱، مهر ۱۳۵۹، ص ۴۹-۴۱.
- ۲- پازوش، هرمز، شناخت آبهای زیرزمینی، انتشارات دانشگاه تهران شماره ۱۴۹۵ آبان ۱۳۵۴، ص ۵۸ تا ۶۰ و ص ۱۴۹ تا ۱۵۲.
- ۳- "رسوبات سد سفید رود" سازمان آب و برق منطقه ای شمال، وزارت نیرو، امور بررسی منابع آب و خاک، آذر ۱۳۵۶.
- ۴- "رسوبات دریاچه مخزن سد سفید رود" سازمان آب و برق منطقه ای شمال، وزارت نیرو، خرداد ۱۳۵۰.
- ۵- "عمران منطقه ای شمال"، وزارت آب و برق، سازمان آب منطقه ای شمال، ۱۳۵۵.
- ۶- آمار رسوب رودخانه های ایران، "سال آبی ۴۸-۴۷ وزارت آب و برق، واحد آب، شماره ۲۴، ۱۳۵۰.
- ۷- "نتیجه مطالعات رسوب سنجی مخزن دریاچه سد دز" وزارت آب و برق، شرکت سهامی آب و برق خوزستان، واحد کنترل و تنظیم سدها، شهریور ۱۳۵۲.
- ۸- "تخلیه رسوبات با حفظ سطح دریاچه در رقوم پائین (شاس)"، وزارت نیرو، شرکت سهامی آب منطقه ای شمال، امور سدهای گیلان، ارائه شده در سمینار بررسی مسائل رسوبات سد سفید رود از ۲۷ تا ۳۰ دیماه ۱۳۵۹، رشت.
- 9- Chow, Ven T, Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill, 1964, pp. 17/5-6.
- 10- Graf, W.H., Hydraulics of Sediment Transport, McGraw-Hill, 1971, PP. 51-53.
- 11- Kazmann, R.H., Modern Hydrology, Harper & Row Publishers, 2nd Ed., 1972, PP. 152, 256, 258.
- 12- Linsley, R.K., M.A. Kohler and J.L.H. Paulhus, Hydrology for Engineers, 3rd Ed., 1982., PP. 328 et Seq.
- 13- Linsley, R.K. and J.B. Franzini, Water Resources Engineering, 3rd Ed., 1979, PP. 160-et Seq.