دانشکده کشاورزی

گروه علوم و مهندسی خاک

هیدرولوژی

رسوب

تهیه و تنظیم
حیدر غفاری

ماهیت بار رسوب

بار رسوبی (total sediment load) که توسط رودخانه جابجا می‌شود از اجزاء زیر تشکیل شده است:

- بار شسته (wash load)
- بار مواد بستر (bed - material load)

بار شسته به رسوباتی گفته می‌شود که از سطح حوضه آبریز نشات می‌گیرد و نه از بستر رودخانه. این رسوبات عمدتاً ریزدانه بوده و اندازه آن‌ها از ۰/۰۵ میلی‌متر کوچکتر بوده و در ردیف سیلت قرار می‌گیرند. بار شسته همراه با جریان رودخانه به صورت معلق جابجا می‌شود.

بار مواد بستری به آن بخش از رسوبات رودخانه گفته می‌شود که از منشاء آن‌ها کف رودخانه است. این مواد ممکن است یا به دلیل سنگینی در همان کف رودخانه باقی مانده و همراه با جریان آب به صورت پرش، غلتیدن و یا لغزش روی بستر در حرکت باشند. این رسوبات را نمی‌توان با نمونه‌گیرهای بار معلق اندازه‌گیری کرد. به این مواد بار بستر (bed load) گفته می‌شود. از طرف دیگر رسوباتی نیز از مواد بستری وجود دارند که به دلیل سبک بودن در آب معلق بوده و همراه با جریان آب حرکت می‌کنند. به طور کلی مقدار رسوباتی که توسط آب

رودخانه‌ها حمل شده و ممکن است وارد مخازن سدها گردد به دو گروه تقسیم‌بندی می‌شود:

الف- رسوباتی که در آب معلقند و در بالای بستر رودخانه همراه با آب حرکت می‌کنند. به‌این مواد ***بار معلق*** (suspended load) گفته می‌شود.

ب - رسوباتی که در سطح بستر رودخانه همراه با جریان آب به جلو غلتیده می‌شوند. به این نوع رسوبات ***بار بستر*** (bed load) گفته می‌شود.

بار کل رسوب یک رودخانه از مجموع بار بستر و بار معلق تشکیل می‌شود.

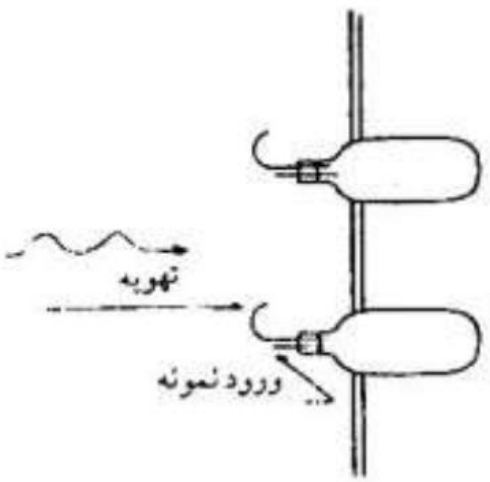
۱-۲-۱۹ بار معلق

بار معلق به مجموعه موادی گفته می‌شود که در آب به صورت معلق وجود دارد. بار معلق برحسب گرم در لیتر یا کیلوگرم در مترمکعب توصیف می‌شود و آن عبارت از مقدار گرم مواد رسوبی است که در هر لیتر جریان آب رودخانه به صورت معلق وجود دارد. برای تخمین بار معلق از جریان رودخانه نمونه‌گیری می‌شود. در آزمایشگاه پس از جدا کردن مواد رسوبی به‌وسیلهٔ کاغذ صافی رسوب را خشک می‌کنند و بعد از توزین غلظت رسوب را برحسب گرم در لیتر می‌سنجند.

برای نمونه‌گیری از مواد معلق رودخانه به روشهای مختلف عمل می‌شود. ساده‌ترین روش نمونه‌گیری آن است که چند شیشه نمونه‌برداری را به صورت پشت‌سرهم به‌یک میله ببندیم و آن را در داخل جریان آب قرار دهیم. بطوری که دهانهٔ شیشه‌ها در مقابل جریان قرار گیرند (شکل ۱۹-۱). چون شیشه‌ها در ارتفاعات مختلف بسته شده‌اند نمونه‌گیری از نقاط مختلف به عمل آمده و این عمل امکان آن را فراهم خواهد ساخت تا میانگین بار معلق را در مقطع رودخانه محاسبه کنیم. دلیل نمونه‌گیری از اعماق مختلف آن است که با توجه به وزن معلق و متغیر بودن سرعت جریان آب در عمقهای مختلف دبی رسوبات معلق نیز در هر عمقی متفاوت است.

هر بطری مجهز به یک دربند لاستیکی است که در داخل آن دو لولهٔ پلاستیکی تعبیه شده است. یکی از این لوله‌ها برای ورود آب و لولهٔ دیگر برای خروج هوای داخل بطری است. پس از آن که شیشه‌ها از آب پر شد آن را بیرون آورده و زمان اندازه‌گیری با دبی آب و عمق نمونه‌برداری نیز ثبت می‌شود. این روش *را نمونه‌برداری نقطه‌ای* گویند.

در رودخانه‌های مناطق خشک و نیمه خشک سیلابها به صورت ناگهانی و به مدت کوتاه اتفاق می‌افتد. در این شرایط باید تمهیداتی اندیشیده شود تا بدون وجود پرسنل برای نمونه‌گیری، این عمل خودکار صورت پذیرد. برای این منظور انواع بطریهای نمونه‌گیری خودکار ابداع شده است که در بازار موجود بوده و در این جا به تشریح برخی از آنها می‌پردازیم.



شکل ۱۹-۱ شیشه‌های نمونه‌گیری رسوب

۱۹-۲-۲ بار بستر

اندازه‌گیری بار بستر در رودخانه‌ها بمراتب مشکلتر از اندازه‌گیری بار معلق است. به همین دلیل در اکثر موارد فقط به اندازه‌گیری بار معلق اکتفا شده و سپس بار بستر به عنوان درصدی از بار معلق (معمولاً بین ۱۰ تا ۵۰ درصد) تخمین زده می‌شود. مثلاً اگر بار معلق ۲۳۳ کیلوگرم در مترمکعب و بار بستر ۳۰ درصد بارمعلق فرض شود برای بار بستر رقمی معادل $\frac{۳۰}{۱۰۰} \times ۲۳۳$ یا ۶۹/۹ کیلوگرم در مترمعکب در نظر گرفته می‌شود. در بسیاری گزارشات هیدرولوژی پس از تخمین بار معلق ۵ تا ۱۵ درصد و حتی در بعضی موارد تا ۲۵ درصد به عنوان بار بستر به آن اضافه می‌کنند تا بار کل بدست آید. در اندازه‌گیری بار بستر نیز روشهای گوناگونی به کار برده می‌شود که از جمله نمونه‌گیرهای نوع بشقابی و نمونه‌گیرهای گودالی است. در نمونه‌گیرهای بشقابی سینی‌هایی که دارای دو دیواره دایره‌ای می‌باشند درکف رودخانه جای‌گذاری می‌شوند تا مطابق شکل ۱۹-۵ مواد بستر در داخل لبه‌های سینی محبوس شود. با خارج کردن سینی و اندازه‌گیری وزن مواد بستر می‌توان غلظت مواد بستر را محاسبه کرد.

شکل ۱۹-۵ نمونه‌گیری نوع بشقابی

۱۹-۳ محاسبهٔ دبی متوسط مواد معلق

برای محاسبهٔ دبی رسوب و یا مقدار مواد معلقی که در درازمدت (مثلاً یک سال) از رودخانه عبور می‌کند از روشهای گوناگونی استفاده می‌شود. روش ترسیمی منحنی دوام مواد رسوبی ساده‌ترین و در عین حال عملی‌ترین روشی است که در پروژه‌های کوچک آبی می‌توان از آن استفاده نمود. در این روش به ترتیب عملیات زیر انجام می‌شود.

۱- دبی رسوبات معلق با توجه به دبی آب برحسب تن در روز محاسبه می‌شود. مثلاً چنانچه غلظت رسوب ۵۱۰ میلی‌گرم در لیتر و دبی جریان ۲۷ مترمکعب در ثانیه باشد. مقدار رسوب برابر ۱۱۸۹/۷۲۸ = ۰/۵۱۰ × (۲۴ × ۳۶۰۰) ۲۷ تن در روز خواهد بود.

۲- منحنی همبستگی دبی آب و دبی رسوب براساس نتایج حاصله از نمونه‌برداریها رسم شود.

۳- منحنی دوام دراز مدت (سالانه) آب رودخانه با استفاده از دبی‌های روزانه رسم گردد.

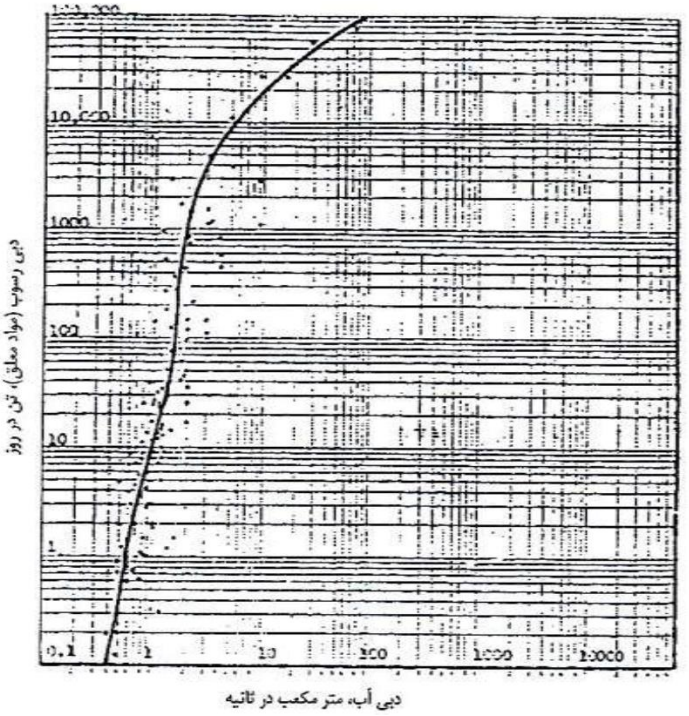
۴- با استفاده از منحنی‌های فوق به روشی که در مثال زیر آورده شده است میزان مواد معلق محاسبه گردد.

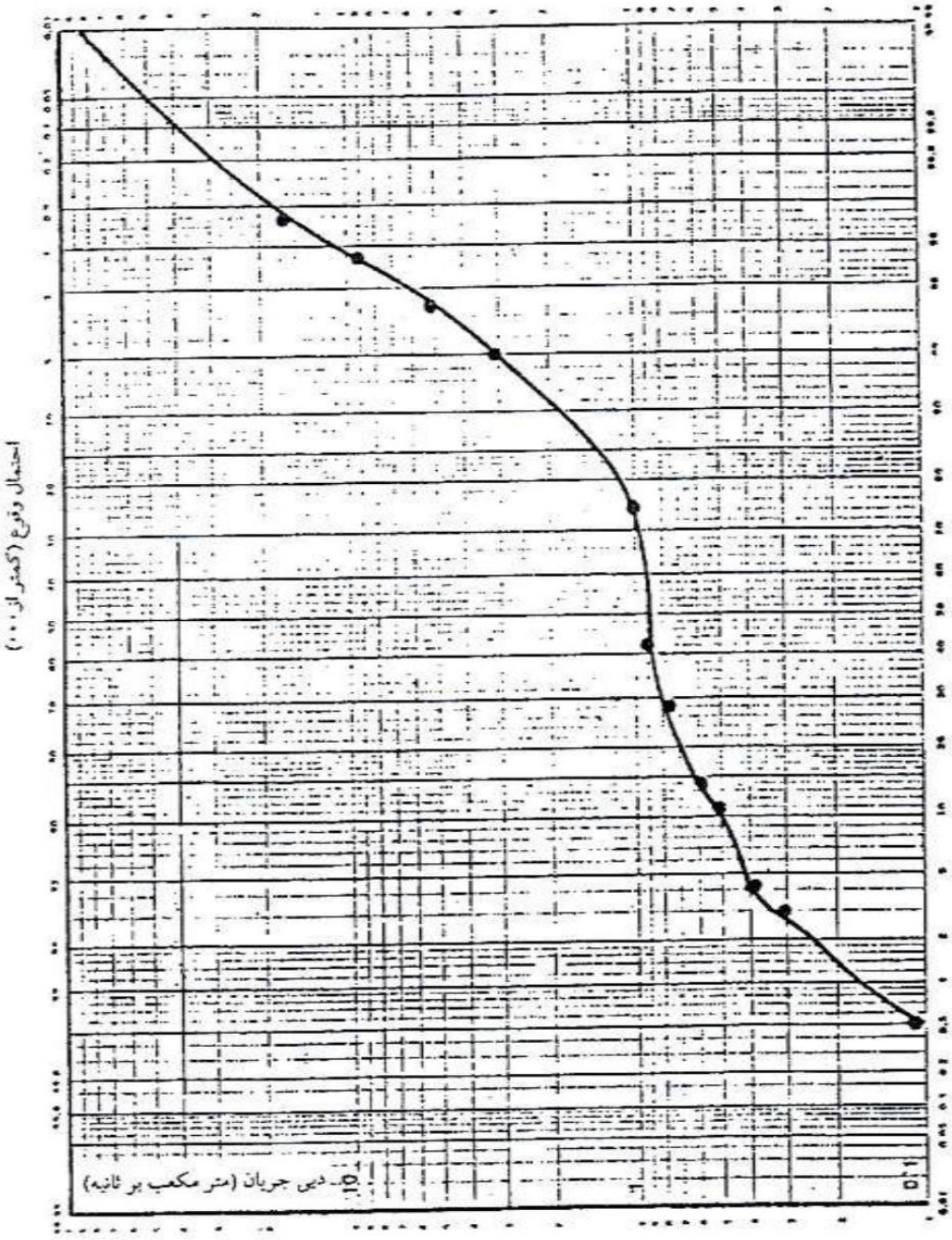
● مثال ۱۹-۹

با توجه به نمونه‌های رسوب در ایستگاه رسوب‌سنجی یک حوضه می‌خواهیم مقدار رسوباتی که سالانه وارد مخزن سدی که روی رودخانه این حوضه ساخته شده است محاسبه کنیم. براساس نمونه گیریهای انجام شده که در آن دبی آب و دبی رسوب محاسبه شده است رابطه بین دبی رسوب (مواد معلق) و دبی آب مطابق شکل ۱۹-۸ در یک دستگاه محورهای مختصات لگاریتمی رسم شده است. همچنین منحنی تداوم جریان نیز که در آن تغییرات دبی رودخانه‌ای به ازای احتمالات مختلف رسم شده است، به صورت شکل ۱۹-۹ در اختیار است. این منحنی دبی رودخانه را به ازای احتمالات تجمعی نشان می‌دهد، با فرض این که وزن مخصوص مواد معلق ۱/۳۵ گرم در سانتی‌متر مکعب باشد می‌خواهیم حجم مواد معلق سالانه این رودخانه را بدانیم؟ اگر بار بستر این رودخانه ۳۰ درصد بار معلق در نظر گرفته شود و وزن مخصوص مواد بستر ۲/۶۵ گرم در سانتی‌متر مکعب باشد حجم کل رسوبات سالانه چقدر است؟ چنانچه سطح حوضه ۵۴۰ کیلومتر مربع باشد دبی ویژهٔ دراز مدت مواد معلق، دبی ویژهٔ بار بستر و دبی ویژهٔ کل مواد جامد این حوضه چقدر است؟

حل

برای محاسبهٔ دبی ویژهٔ درازمدت جدول ۱۹-۴ را تشکیل می‌دهیم در ستون اول این جدول حدود دسته‌های احتمال (به درصد) نوشته شده است. حدود این دسته‌ها اختیاری است اما سعی می‌شود حدود دسته‌ها در احتمالات بالاکم گرفته شود تا محاسبات دقیقتر باشد. ستون دوم جدول فواصل دسته‌های احتمالاتی را نشان می‌دهد. مثلاً در مورد اول که احتمال ۰/۰۱ تا ۴۰ درصد را نشان می‌دهد فاصلهٔ دسته ۳۹/۹۹ درصد یا ۰/۳۹۹۹ است و در ردیف دوم فاصلهٔ دسته ۱۰ = ۴۰-۵۰ درصد یا ۰/۱ است. در ستون سوم حد وسط فواصل احتمال به درصد نوشته شده است ($\frac{\text{حدبالا} + \text{حدپایین}}{۲}$). مقادیر دبی جریان آب از روی شکل ۱۹-۹ و به ازای احتمال وقوع مربوط به حد وسط دسته‌ها (ستون ۳) استخراج و در ستون ۴ نوشته شده است. ارقام ستون ۵ از حاصلضرب ستون ۲ و ۴ به دست آمده است که در واقع جزء دبی روزانه را در احتمالات مختلف نشان می‌دهد. حاصل جمع این ستون (۱/۰۷ مترمکعب در ثانیه) دبی عادی روزانهٔ رودخانه می‌باشد. میزان رسوب به ازای دبی‌های مختلف آب (ستون ۴) از شکل ۱۹-۸ (رابطهٔ بین دبی آب و دبی رسوب) استخراج و در ستون ۶ نوشته شده است. ستون ۷ دبی روزانهٔ رسوب راکه از حاصلضرب ارقام ستون ۲ و ۶ به دست آمده است نشان می‌دهد. جمع ارقام این ستون مواد معلق روزانه را برحسب تن نشان می‌دهد.





شکل ۱۹-۹ منحنی تداوم جریان آب برای محاسبه بار رسوب

جدول ۱۹-۴ برآورد بار رسوبی درازمدت

1	2	3	4	5	6	7
			با استفاده از منحنی احتمال دبی آب		با استفاده از منحنی دبی‌آب دبی رسوب	
حدود دسته‌ها (درصد)	فواصل دسته‌ها	حدوسط دسته‌های احتمال(درصد)	دبی با احتمال وقوع حد وسط دسته‌ها(متر مکعب در ثانیه)	دبی‌روزانه (۴×۲) مترمکعب در ثانیه	دبی رسوب به ازاء دبی ستون ۴(تن در روز)	رسوب روزانه و سالانه به تن ۲×۶
0.01-40	0.3999	20	0.5	0.19	0.8	0.31
40-50	0.1	45	0.7	0.07	2	0.2
50-60	0.1	55	0.80	0.08	4	0.4
60-70	0.1	65	0.90	0.09	7	0.7
70-80	0.1	75	1.0	0.01	10	1
80-90	0.1	85	1.3	0.13	21	2.1
90-95	0.05	92.5	2.4	0.12	2000	100
95-98	0.03	96.5	4.0	0.12	6500	195
98-99	0.01	98.5	8.0	0.08	18000	180
99-99.8	0.008	99.4	15	0.12	25000	200
99.8-99.9	0.001	99.85	30	0.03	50000	50
99.9-99.99	0.0009	99.945	43	0.03	60000	54
جمع روزانه				1.07		784

بطوری که از جدول ۱۹-۴ نتیجه‌گیری می‌شود دبی روزانهٔ این رودخانه بطور عادی ۱/۰۷ مترمکعب در ثانیه و مقدار رسوبات معلق روزانه ۷۸۴ تن می‌باشد. حال به محاسبات دیگر می‌پردازیم.

میلیون مترمکعب ۳۳/۷ = $۱/۰۷\times۳۶۵\times۸۶۴۰۰\times۱۰^{-۶}$ = حجم متوسط درازمدت سالانهٔ آب

تن در سال ۲۸۶۱۶۰ = ۷۸۴×۳۶۵ = وزن متوسط درازمدت مواد معلق

تن در سال در کیلومترمربع ۵۳۰ = ۵۴۰ ÷ ۲۸۶۱۶۰ = مقدار مواد معلق حاصله از هر کیلومترمتربع از حوضه

تن در سال ۸۵۸۴۸ = ۰/۳ × ۲۸۶۱۶۰ = مقدار متوسط درازمدت مواد بستر

تن در سال در کیلومترمربع ۱۵۹ = ۵۴۰ ÷ ۸۵۸۴۸ = دبی ویژهٔ درازمدت مواد بستر در هر کیلومترمربع از حوضه

تن در سال در کیلومترمربع (۶۸۹ = ۱۵۹ + ۵۳۰) = دبی ویژهٔ درازمدت کل مواد رسوبی

حجم کل مواد رسوبی معلق در سال = $\frac{۲۸۶۱۶۰}{۱/۳۵}$ = ۲۱۱۹۷۰ مترمکعب

حجم کل مواد رسوبی بستر در سال = $\frac{۸۵۸۴۸}{۲/۶۵}$ = ۳۲۳۹۵ مترمکعب

حجم کل مواد رسوبی = ۲۱۱۹۷۰ + ۳۲۳۹۵ = ۲۴۴۳۶۵ مترمکعب

ملاحظه می‌شود که اگر روی این رودخانه سد احداث گردد هر سال ۲۴۴۳۶۵ مترمکعب رسوب وارد مخزن این سد خواهد شد و اگر بخواهیم این سد مدت ۵۰ سال عمر داشته باشد لازم است ۱۲/۲۲ = (۵۰ × ۲۴۴۳۶۵) میلیون مترمکعب حجم مرده برای آن در نظر گرفته شود.

البته برای محاسبه فرسایش و رسوب در حوضه‌های آبریز روشها و مدلهای تجربی زیادی به کارگرفته‌می‌شودکه استفاده از آنهابستگی به نوع داده‌های موجود دارد.از جملهٔ این روشها مدل کامپیوتری موسوم‌به HEC-6 استکه توسط مرکز مهندسی هیدرولوژی آمریکا ارائه شده است.

● مثال ۱۹-۱۰

در حوضه یک رودخانه بمدت ۶ سال اندازه‌گیری رسوب و دبی جریان صورت گرفته است که نتایج حاصله آن طی سالهای مختلف در جدول زیر نشان داده شده است. می‌خواهیم متوسط رسوب این حوضه را بر حسب تن در سال در هر ۱۰۰ کیلومتر وسعت حوضه بدست آوریم. در مدت ۵۰ سال عمر سدّی که قرار است روی این رودخانه احداث شود چقدر رسوب در مخزن سد تجمع پیدا می‌کند. بین بار رسوب و آورد سالانه رودخانه یک رابطه رگرسیونی برقرارکرده و برای مدت ۴ سالی که آمار رسوب وجود ندارد مقدار رسوب را تخمین بزنید. وسعت ۷۸۷۰ کیلومتر مربع است.

حل

با توجه به ارقام اندازه‌گیری دبی رسوب و آورد سالانه آب در سالهای مختلف که در جدول (۱۹-۵) آمده است خواهیم داشت:

سال	آورد سالانه $M.m^3$	دبی رسوب (M.ton)
۱۹۷۸-۷۹	۴۲۵۰	-
۱۹۷۹-۸۰	۸۳۲۴	-
۱۹۸۰-۸۱	۳۷۵۰	-
۱۹۸۱-۸۲	۱۲۹۲۰	-
۱۹۸۲-۸۲	۲۱۸۴	۳/۸۲۶
۱۹۸۳-۸۴	۵۷۰۸	۱۰/۳۰۹
۱۹۸۴-۸۵	۱۳۰۶۰	۱۴/۱۸۲
۱۹۸۵-۸۶	۴۱۴۵	۶/۸۹۵
۱۹۸۶-۸۷	۷۸۰۰	۱۱/۲۱۴
۱۹۸۷-۸۸	۲۸۴۶	۴/۹۲

متوسط بار رسوب بر حسب داده‌های موجود :

$$= \frac{3.826+10.309+14.182+6.895+11.214+4.92}{6} = 8.558 \text{ M.ton/year}$$

متوسط بار رسوب اگر فرض کنیم که بارکف معادل ۱۰ درصد بار معلق باشد بار کل رصوب عبارت است از:

بار بستر + بار معلق = بار کل

$$= 8.558 + (\frac{10}{100})(8.558)$$

$$= 9.414 \text{ M.ton/year}$$

با فرض اینکه وزن مخصوص رسوبات ۱/۲ تن در متر مکعب باشد حجم رسوبات سالانه عبارت است از:

$$\text{حجم رسوبات سالانه} = \frac{9.414}{1.2} = 7.85 \text{ M.m}^3$$

چنانچه عمر سد ۵۰ سال باشد در این مدت حجم رسوب عبارت خواهد بود از :

$$\text{حجم رسوب در ۵۰ سال} = 7.85 \times 50 = 392.5 \text{ M.m}^3$$

بعبارت دیگر در مدت ۵۰ سال حجمی معادل ۳۹۲/۵ میلیون متر مکعب از رسوبات پر خواهد شد. اگر در مدت ۶ سالی که هم آمار دبی سالانه آب (Q) و هم دبی رسوب (q_s) را داریم رابطه رگرسیونی غیر خطی برقرار کنیم چنین رابطه‌ای بصورت :

$$q_s = 0.25\ Q^{0.937}$$

خواهد بود که از روی آن می‌توان بار رسوب را برای سالهائی که آمار وجود ندارد تخمین زد. مثلاً در سال ۷۹-۱۹۷۸ که دبی Q برابر ۴۲۵۰ میلیون متر مکعب است بار رسوب معلق ۶۲۷/۶۷ میلیون تن خواهد شد که حجم کل رسوب ۶/۸۴۲ میلیون متر مکعب برآورد می‌شود.

ذرات خاکهایی که از بستر طبیعی خود جدا می‌شوند همگی همراه با جریان آب به حرکت در نیامده بلکه قسمتی دوباره در جای دیگر ته‌نشین می‌شود. آنچه همراه با آب حرکت می‌کند و به مخزن سد یا هر نقطهٔ دیگر می‌رسد بار رسوب یا میزان *تولید رسوب* گفته می‌شود. اگر به مقدار کل خاکی که در یک حوضه فرسایش می‌یابد *فرسایش ناخالص* اطلاق شود *نسبت حمل رسوب* (Sediment Delivery Ratio) عبارت است از:

$$\text{نسبت حمل رسوب} = \frac{\text{مقدار رسوب حمل شده به یک نقطه}}{\text{مقدار خاک فرسایش شده در بالا دست آن نقطه}} \qquad (۱۵-۱۹)$$

هرچه سطح حوضه بزرگتر باشد فرسایش ناخالص زیادتر و نسبت حمل رسوب در آن کوچک‌تر خواهد بود. ازعوامل مهمی که بر نسبت حمل رسوب در یک حوضه مؤثرند عبارتند از:

- توپوگرافی سطح حوضه
- خصوصیات باران و سیل
- خصوصیات فیزیوگرافی حوضه
- خصوصیات خاک حوضه

برای تخمین نسبت حمل رسوب (SDR) فرمول‌های مختلفی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان معادله‌های زیر را نام برد.

الف - فرمول‌هایی که براساس مساحت استوارند مانند فرمول:

$$SDR = 43.4\ A^{-0.1753} \qquad (۱۶-۱۹)$$

که برای حوضه‌هایی است با مساحت کمتر از ۱۰ میل مربع و فرمول:

$$SDR = 46.7\ A^{0.2071} \qquad (۱۷-۱۹)$$

که برای حوضه‌هایی با مساحت بین ۱۰ تا ۱۰۰ میل مربع صادق است و فرمول:

$$SDR = 64.6\ A^{0.2775} \qquad (۱۸-۱۹)$$

که برای حوضه‌هایی با مساحت بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ میل مربع مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ب - فرمول‌هایی که براساس خصوصیات فیزیوگرافی حوضه استوارند مانند:

$$\log(SDR) = 2.94259 - 0.8262\ \text{colog}\left(\frac{R}{L}\right) \qquad (۱۹-۱۹)$$

و فرمول زیر که در آن مقدار SDR برابر است با:

$$SDR = 1862\ A^{0.23}\ (L/R)^{-0.51}(B)^{-2.79} \qquad (۲۰-۱۹)$$

دراین فرمول‌ها A مساحت حوضه برحسب میل مربع، R اختلاف ارتفاع بین بلندترین و پایین‌ترین نقطه حوضه (فوت)، L طول حوضه آبریز (فوت) و B نسبت انشعاب رودخانه‌های حوضه می‌باشد.