فرسایش و رسوب

فرسایش	بارمعلق
فرسایش بوسیله باران	باربستر
فرسایش ورقه‌ای	محاسبه دبی متوسط مواد معلق
فرسایش آبراهه‌ای	رسوب‌گذاری در مخازن سدها
حمل رسوب	منابع برای مطالعه بیشتر

رواناب سطحی و جریان آب در رودخانه‌ها همواره توأم با فرسایش خاک و حمل مواد رسوبی است. این مواد در هر جا که موقعیت ایجاب کند ته‌نشین می‌شوند. اطلاع از چگونگی فرسایش و توانایی حمل رسوب در آبراهه‌های مختلف حوضه از جمله مواردی است که در هر طرح هیدرولوژی باید مورد نظر قرار گیرد. محاسبات حجم مردهٔ مخازن از نظر پُر شدن مواد رسوبی یا عملیات رسوب‌زدایی و یا طراحی حوضچه‌های رسوب‌گیر و کانالهای دانه‌گیر و امثال آنها براساس اطلاعات رسوب‌شناسی حوضه استوار می‌باشند.

۱۹-۱ فرسایش

فرسایش فرایندی است که طی آن ذرات خاک از بستر خود جدا شده و به‌کمک یک عامل انتقال دهنده به مکانی دیگر حمل می‌شوند. در صورتی که عامل جدا شدن ذرات از بستر و انتقال آنها آب باشد به آن *فرسایش آبی* گفته می‌شود. از انواع دیگر فرسایش می‌توان *فرسایش بادی* و یا *فرسایش یخچالی* را نام برد. عوامل مهمی بر فرسایش مؤثرند که از آن جمله می‌توان به عوامل اقلیمی، نوع خاک، پوشش گیاهی و پستی و بلندی زمین اشاره کرد. عوامل اقلیمی مانند دما، رطوبت، تابش خورشید، باد و بارندگی علاوه بر تأثیر مستقیم از طریق تبخیر - تعرق و یا تغییر رواناب نیز بر مقدار فرسایش مؤثرند. باد نیز سرعت برخورد قطرات باران و زاویه برخورد آنها را با سطح خاک تغییر می‌دهد که بصورت غیرمستقیم بر فرسایش مؤثر است. اما رابطه بین خصوصیات بارندگی و فرسایش نسبتاً پیچیده بوده و نیاز به توضیح بیشتر دارد. بافت و

ساختمان و خصوصیات دیگر خاک از عواملی هستند که فرسایش‌پذیری آن را در مقابل عوامل فرساینده تحت تأثیر قرار می‌دهند. فرسایش آبی در خاکهای غیرچسبنده (مانند ماسه) با خاکهای چسبنده (رس) متفاوت است. در نوع اول فرسایش اصولاً مکانیکی است حال آنکه در مورد دوم عوامل فیزیکو- شیمیایی نیز دخالت دارند.

پوشش گیاهی زمین باعث تغییر در انرژی جنبشی قطرات باران یا جریان سطحی آب شده و در نتیجه سرعت فرسایش تحت تأثیر آن قرار می‌گیرد. مثلاً فرسایش در اراضی جنگلی بمراتب کمتر از مناطق کویری و عاری از پوشش گیاهی است. عوارض طبیعی زمین مانند شیب، شکل زمین و طول مسیر حرکت آب بر شدت فرسایش مؤثرند. در اراضی شیبدار قدرت فرسایش آب بمراتب بیشتر از اراضی مسطح است. این وضعیت در مورد طول شیبها نیز مصداق دارد. فرایند فرسایش خاک توسط آب از سه مرحلهٔ اساسی تشکیل می‌شود که عبارتند از جداشدن ذرات خاک از بستر، حمل ذرات فرسایش یافته و ته‌نشینی آنها، این فرایندها هرکدام قانونمندی خاص خود را داشته و مباحث مهم علم فرسایش و حفاظت خاک را بوجود می‌آورند.

۱۹-۱-۱ فرسایش بوسیله قطرات باران

فرسایش بارانی نتیجهٔ برخورد قطرات آب باران با سطح خاک است. قطرات باران به دلیل وزن و سرعت خود هنگام برخورد با خاکدانه‌ها دارای مقداری انرژی جنبشی می‌باشند که در اثر آن ذرات خاک از همدیگر متلاشی می‌شوند. اگر یک قطرهٔ باران به جرم m در هنگام برخورد با سطح زمین دارای سرعت حد معادل v باشد انرژی جنبش آن (E) برابر است با ،

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \qquad (۱-۱۹)$$

قطرات باران پس از طی مسافتی که به قطر آنها بستگی دارد به سرعت حد می‌رسند. سرعت حد برای قطرهای مختلف قطرات باران به شرح جدول ۱۹-۱ تخمین زده شده است.

جدول ۱۹-۱

قطر قطرات باران (mm)	سرعت حد قطرات (m/sec)
0.5	3.5
1.0	4.3
1.5	5.6
2.0	5.8
3	6.8
4	7.6
5	7.9
5.5	8.0
6.0	8.0
6.5	8.0

لذا مثلاً یک قطرهٔ باران با قطر ۶ میلی‌متر در هنگام برخورد با زمین مانند آن است که یک وزنه ۰/۵ گرمی با سرعت ۸ متر در ثانیه با آن برخورد نموده است. ویشمایر (Wischmeier) انرژی

جنبشی قطرات باران را متناسب با شدت بارندگی با فرمول زیر توصیف نموده است.

$$KE = 11.87 + 8.73 \log(i) \qquad (۲-۱۹)$$

در این فرمول :

KE = انرژی جنبشی بر حسب ژول بر متر مربع به ازای هر میلی متر باران ($J/m^2.mm$)

i = شدت بارندگی (mm/hr)

فرمول دیگری که با واحدهای مشابه فوق در این مورد توسط هودسون پیشنهاد شده است به شرح زیر می‌باشد.

$$KE = 29.8 - 127.5 / i \qquad (۳-۱۹)$$

در صورتی که شدت بارندگی زیاد باشد انرژی حاصله از آن قادر است ذرات خاک معمولی را از هم متلاشی و یا آنها را از بستر اصلی خود جدا نمایند.

رابطه شدت بارندگی و انرژی جنبشی قطرات باران در مورد بارانهای متداول در ایران بصورت زیر بدست آمده است.

$$KE = 10.2 + 8.9 \log(i) \qquad (۴-۱۹)$$

که i شدت بارندگی (mm/h) و KE انرژی جنبشی ($J/m^2.mm$) است. در سیستم واحدهای انگلیسی رابطه بین انرژی جنبشی باران و شدت بارندگی براساس فرمول ویشمایر بصورت زیر:

$$KE = 916 + 331 \log(i) \qquad (۵-۱۹)$$

می‌باشد که i برحسب اینچ در ساعت و KE برحسب فوت - تن بر ایکر اینچ است.

از هم پاشیدن ذرات خاک در اثر برخورد قطره باران و بحرکت در آمدن آب مازاد بر نفوذ در سطح خاک را اصطلاحاً ***فرسایش شیاری*** (rill erosion) گویند. در این مرحله از فرسایش لایه نازکی از آب در امتداد شیب زمین جریان پیدا کرده و از بهم پیوستن آبراهه‌های بسیار کوچکی که آب در آنها بحرکت در می‌آید ***جریانهای بین شیاری*** (inter-rill) و همراه با آن ***فرسایش بین شیاری*** (inter-rill erosion) بوجود می‌آید.

برخورد قطرات باران با سطح خاک ممکن است بقدری شدید باشد که ذرات خاک را تا ارتفاعی حدود ۰/۵ متر به هوا پرتاب کرده و آنرا مسافتی حدود ۱/۵ تا ۲ متر در اطراف جابجا کند. نقش پوشش گیاهی در فرسایش عمدتاً به دلیل تأثیری است که از پدیده **پاشمان** ذرات خاک جلوگیری بعمل می‌آورد.

برای محاسبه انرژی جنبشی باران روشها و نمایه‌های مختلفی ارائه شده است که از آن جمله نمایه انرژی جنبشی ویشمایر (EI_{30}) است. این نمایه برابر است با حاصلضرب مقدار انرژی جنبشی یک باران (E) در حداکثر شدت باران در یک دوره ۳۰ دقیقه‌ای که در طول مدت بارش همان باران (I_{30}) رخ داده است. بنابراین نمایه مذکور شامل دو نوع محاسبه است: یکی محاسبه انرژی جنبشی باران و دیگری محاسبه حداکثر شدت باران ۳۰ دقیقه‌ای. نحوه این محاسبات در مثال زیر روشن شده است.

● **مثال ۱۹-۱**

بارانی بمدت ۹۰ دقیقه (۱/۵ ساعت) بوقوع پیوسته و مقادیر اندازه‌گیری شدهٔ آن در دوره‌های زمانی ۱۵ دقیقه از روی باران‌نگار اندازه‌گیری و در جدول ۱۹-۲ ارائه شده است (ارقام ستونهای ۱ و ۲). انرژی جنبشی این باران و نمایه انرژی جنبشی ویشمایر را محاسبه کنید.

حل

جدول ۱۹-۱ محاسبه توان فرسایش‌دهی باران

زمان از شروع (min)	بارندگی (mm)	شدت ($mm.h^{-1}$)	انرژی جنبشی ○ ($J.m^{-2}.mm^{-1}$)	کل انرژی جنبشی (ستون ۴) × (ستون ۲) ($J.m^{-2}$)
0-14	1.52	6.08	8.83	13.42
15-29	14.22	56.88	27.56	391.90
30-44	26.16	104.64	28.58	747.65
45-59	31.50	126.00	28.79	906.89
60-74	8.38	33.52	26.00	217.88
75-89	0.25	1.00	-	-

○ انرژی جنبشی از معادله ۱۹-۳ محاسبه شده است

حداکثر بارندگی در ۳۰ دقیقه = 26.16 + 31.50

$= 57.66$ mm

حداکثر شدت در ۳۰ دقیقه $= I_{30} = 57.66 \times (60/30)$

$= 115.32\ mm.h^{-1}$

مقدار کل انرژی جنبشی $= E = \Sigma(KE.d) = \Sigma$(ارقام ستون ۵)

$\Sigma(KE.d) = E = 2277.74\ J.m^{-2}$

نمایه انرژی جنبشی ویشمایر $= [\Sigma(KE.d)] \times I_{30} = E \times I_{30} = 2277.74 \times 115.32$

$= 262668.98\ J.m^{-2}.mm.h^{-1}$

۱۹-۱-۲ فرسایش ورقه‌ای

جریان آب در سطح زمین باعث می‌شود که ذرات خاک به صورت لایه‌ای از بستر خود جدا شده و همراه با آب حمل شوند. توانایی جریان آب در حرکت خاک به عواملی مانند عمق جریان آب، به سرعت حرکت آب، درجه تلاطم جریان آب، شیب زمین و مقاومت خاک در مقابل جریان آب بستگی دارد. برای تخمین مقدار فرسایش ورقه‌ای فرمول‌های تجربی زیادی ارائه شده است. فرمول جهانی فرسایش یا **فرمول ویشمایر** متداولترین این فرمول‌هاست که به صورت زیر ارائه شده است.

$$E = (2.24)\ R.K.L.S.C.P \qquad (۶-۱۹)$$

در این فرمول :

E = مقدار فرسایش خاک (تن در هکتار در سال)

R = ضریب فرسایشی باران

K = ضریب فرسایشی خاک

L = ضریب فرسایشی مربوط به طول شیب که آب روی آن در حرکت است

S = ضریب فرسایشی مربوط به درصد شیب زمین

C = ضریب مربوط به نحوهٔ استفاده از زمین

P = ضریب مربوط به اقدامات حفاظت خاک که در حوضه انجام می‌شود.

در زیر طریقه تخمین هریک از عوامل فوق تشریح شده است.

(الف) ضریب مربوط به توان فرسایش‌دهی باران - نمایه توان فرسایش‌دهی باران (R) را می‌توان بعنوان مهمترین عامل مؤثر در فرسایش خاک دانست. براساس مطالعات ویشمایر فرسایش خاک با مقدار کل بارندگی و انرژی جنبشی باران همبستگی داشته و نمایه فرسایش‌دهی باران را در مورد هر باران بصورت زیر ارائه نمود.

$$R = \frac{[\Sigma(KE.d)]\ I_{30}}{100} \qquad (۷-۱۹)$$

که درآن :

KE = انرژی جنبشی باران (فوت - تن بر ایکر اینچ ft-tons/acre.inch)

d = ارتفاع بارندگی (اینچ inch)

I_{30} = حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای (اینچ بر ساعت inch/hr)

R = نمایه فرسایش‌دهی (100-ft-tons/acre × in/hr)

● مثال ۱۹-۲

در یک بارش حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای ۰/۶ اینچ در ساعت بوده است با توجه به‌داده‌های زیر که از روی باران‌نگار بدست آمده است نمایه فرسایش‌دهی باران (R) را محاسبه کنید.

حل

با توجه به محاسباتی که در جدول زیر صورت گرفته است، خواهیم داشت:

$\Sigma(KE.d) = 3258$

$I_{30} = 0.6$

$[\Sigma(KE.d)]I_{30} = (3258)(0.6) = 1954.8$ (فوت - تن بر ایکر) × (اینچ در ساعت)

$$R = \frac{[\Sigma(KE.d)]I_{30}}{100} = \frac{1954.8}{100}$$

$R = 19.55$, (100 ft.tons/acre × in/hr)

(5)=(3) × (4)	از معادله۱۹-۵ = (4)	(3)	(2)	(1)
انرژی (KE.d) فوت-تن برایکر	انرژی (KE) فوت - تن برایکر اینچ	مقدار بارندگی (d) in	متوسط بازه شدت بارندگی in/hr	بازه شدت بارندگی in/hr
1224	816	1.5	0.5	0-1
974	974	1.0	1.5	1-2
786	1048	0.75	2.5	2-3
274	1096	0.25	3.5	3-4
3258		3.5		جمع

● مثال ۱۹-۳

داده‌های زیر مربوط به یک بارش ۴۰ دقیقه است که مشخصه‌های آن در دوره‌های ۲۰ دقیقه‌ای تعیین شده است (ارقام ستونهای ۱ و ۲). نمایه فرسایش‌دهی باران (R) را برای استفاده در معادله جهانی فرسایش بدست آورید.

حل

زمان min	عمق بارش (mm)	عمق بارش (inch)	مدت (min)	شدت in/hr	انرژی درهر اینچ (باران)	مقدار کل انرژی ft-tons/acre
0-20	25.9	1.02	20	3.06	1077	1098
20-40	20.9	0.82	20	2.47	1046	858
جمع	46.8	1.84	40			1956

باتوجه به این که ارقام ستون ششم از معادله ۱۹-۵ محاسبه شده‌اند خواهیم داشت :

$[\Sigma(KE.d)] = 1956$ = مقدار کل انرژی جنبشی

$I_{30} = 2.86$ = حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای باران

$$R = \frac{[\Sigma(KE.d)]I_{30}}{100} = \frac{(1956)(2.86)}{100}$$

$R = 55.94$, (100 ft.tons/acre × in/hr)

در محاسبه برای مقدار سالانه فرسایش باید مجموع نمایه‌های هریک از بارشهائی که در آن سال وجود دارد در نظر گرفته شود.

$$R_{year} = \Sigma R \qquad (۸-۱۹)$$

که در آن :

R_{year} = نمایه توان فرسایش‌دهی باران در سال

R = نمایه فرسایش‌دهی هریک از بارشهایی که در طول سال اتفاق می‌افتد.

تجربه نشان‌داده‌است‌که نمایه سالانه فرسایش را می‌توان از روی معادله ساده زیر تخمین زد :

$$R_{year} = 0.5P \qquad (۹-۱۹)$$

که P = مقدار بارندگی سالانه (mm)

R_{year} = نمایه فرسایش‌زایی سالانه بارندگی (100-ft-tons/acre × in/hr)

(ب) ضریب فرسایشی خاک - این ضریب برای اراضی مختلف به شرح زیر است :

- پوشش سنگی	K = 0.05
- اراضی مقاوم به فرسایش	K = 0.10
- خاکهای ماسه‌ای نرم	K = 0.16
- خاکهای ماسه‌ای بسیار نرم	K = 0.12
- خاکهای لومی شنی	K = 0.27
- خاکهای لومی مخلوط با شن بسیار نرم	K = 0.35
- خاکهای سیلت لوم	K = 0.48
- خاکهای لومی رسی	K = 0.28
- خاکهای سیلتی رسی	K = 0.25

(ج) ضرایب مربوط به طول و مقدار شیب - در حوضه‌های آبریز معمولاً دو پارامتر L و S توأماً در نظر گرفته شده و مقدار آن از فرمول زیر محاسبه می‌شود.

$$LS = \left(\frac{X}{22.13}\right)^m (0.065 + 0.045\,S + 0.0065\,S^2) \qquad (۱۰-۱۹)$$

در این فرمول :

LS = حاصلضرب ضرایب مربوط به طول و درصد شیب

X = متوسط طول شیب (متر)

S = شیب حوضه (درصد)

m = ضریبی است که بستگی به شیب داشته مقدار آن بین ۰/۳ (برای شیبهای کمتر از ۳ درصد) تا ۰/۵ (برای شیبهای بیشتر از ۴ درصد) متغیر است. مقدار m معمولاً ۰/۵ در نظر گرفته شده و لذا فرمول فوق بصورت زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد :

$$LS = \left(\sqrt{\frac{L}{22.13}}\right)(0.065 + 0.045\,S + 0.0065\,S^2) \qquad (۱۱-۱۹)$$

که در آن :

L = طول شیب (متر) می‌باشد.

(د) ضریب C (پوشش گیاهی) - مقدار این ضریب در اراضی مختلف به شرح زیر است :

- پوشش گیاهی خیلی خوب	C = 0.04
- پوشش گیاهی خوب	C = 0.09
- پوشش گیاهی نسبتاً خوب	C = 0.15
- پوشش گیاهی نسبتاً فقیر	C = 0.20
- پوشش گیاهی فقیر	C = 0.25
- پوشش گیاهی بسیار فقیر	C = 0.33
- فاقد پوشش گیاهی	C = 0.45

(هـ) ضریب P مربوط به عملیات حفاظتی خاک - این ضریب بسته به نوع عملیات از ۰/۱ تا ۰/۹ در نظر گرفته می‌شود.

● مثال ۱۹-۴

حساب کنید تلفات خاک را در زمینی با طول شیب ۱۰۰ متر شیب ۷ درجه، که زیر پوشش مراتع نسبتاً خوب قرار گرفته است. خاک از نوع ماسه‌ای و متوسط بارندگی ۲۶۹ میلی‌متر در سال است.

حل

فرسایش = 2.24 K.R.LS.C.P

تخمین K- با توجه به نوع خاک مقدار ۰/۱۲ را برای K انتخاب می‌کنیم.

تخمین R- از روی فرمول ۱۹-۹ مقدار R برابر است با

$$R = 0.5 \times 269 = 134.5$$

تخمین LS.

به ازای طول شیب L و درصد شیب S مقدار این ضریب برابر است با:

$$LS = \left(\sqrt{\frac{L}{22.13}}\right)(0.065 + 0.045\,S + 0.0065\,S^2)$$

چون S = 12% و L = 100 m است (حدود ۷ درجه) لذا:

$$LS = \sqrt{\frac{100}{22.13}}\,(0.065 + 0.045 \times 12 + 0.0065 \times 12^2)$$

$$LS = 2.13 \times 1.54$$

$$LS = 3.28$$

تخمین C - با توجه به پوشش گیاهی نسبتاً خوب برای C مقدار ۰/۱۵ در نظر گرفته می‌شود.

تخمین P - برای ضریب مربوط به عملیات حفاظتی ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود.

لذا خواهیم داشت :

تلفات خاک = 2.24 K.R.LS.C.P

$= 2.24(0.12)(134.5)(3.28)(0.15)(0.5) = 8.9$

مقدارتلفات خاک ۸/۹ تن درهکتار درسال یا ۸۹۰ تن در کیلومترمربع در سال پیش‌بینی می‌شود.

۱۹-۱-۳ فرسایش آبراهه‌ای

این نوع فرسایش دراثر حرکت جریان آب و نیرویی که از طرف آب به بستر آبراهه وارد می‌شود صورت می‌گیرد. دریک آبراهه با شیب S و شعاع هیدرولیکی R نیروی تنش برشی (τ_0) که در اثر جریان آب به‌کف آبراهه وارد می‌شود برابر است با

$$\tau_0 = \gamma RS \qquad (۱۹-۱۲)$$

که γ وزن مخصوص آب می‌باشد. دراثر نیروی برشی که بر سطح خاک وارد می‌گردد ذرات خاک از بستر جدا شده و فرسایش صورت می‌گیرد. مشاهده می‌شود که هرچه شیب زمین (S) زیاد باشد نیروی برشی زیادتر شده و در نتیجه آن خاک بیشتر فرسایش پیدا می‌کند و یا هرچه γ زیادتر باشد باز هم τ_0 زیادتر شده و قدرت فرسایش آب زیادتر می‌گردد. یعنی هرچه آب گل‌آلودتر باشد چون وزن مخصوص آن (γ) زیادتر می‌گردد بر قدرت فرسایشی آن نیز افزوده می‌شود. به همین دلیل است که یک آب گل‌آلود بیشتر می‌تواند خاک بستر خود را جابجا کند تا یک آب زلال.

برای آب که در آن $\gamma = 1$ می‌باشد کوچکترین اندازهٔ ذرهٔ یک خاک که در جای خود باقی مانده و در مقابل حرکت آب مقاومت می‌کند بستگی به شیب و خصوصیات هیدرولیکی آبراهه داشته و از معادلهٔ زیر به دست می‌آید.

$$d = 11\ RS \qquad (۱۹-۱۳)$$

d = کوچکترین اندازهٔ ذره‌ای که دربرابر حرکت آب مقاومت می‌کند (فرض شده است که وزن مخصوص آن ۲/۶۵ باشد)

R = شعاع هیدرولیکی

S = شیب زمین

به عبارت دیگر در آبراهه‌ای به شعاع هیدرولیکی R و شیب S ذرات کوچکتر از قطر d جابجا خواهند شد.

● **مثال ۱۹-۵**

در یک مسیل طبیعی سطح مقطع جریان ۱/۲۵ مترمربع ، محیط خیس شدهٔ آن ۱۰۵ سانتی‌متر و شیب مسیل ۲ در هزار می‌باشد. قطر کوچکترین ذره‌ای را که در برابر جریان آب مقاومت می‌کند بدست آورید.

حل

$A = 1.25\ m^2$

$P = 1.05\ m$

$R = A / P = 1.19\ m$

$d = 11\ RS$

$d = 11(1.19)(0.002) = 0.026\ m = 2.6\ cm$

یعنی در این مسیل کلیهٔ ذرات گراول و شن که قطرشان از ۲/۶ سانتی‌متر کمتر است همراه با آب حرکت خواهند کرد.

برطبق تحقیقات مختلفی که در این مورد صورت گرفته است حداقل سرعت لازم برای آن که آب بتواند دانه‌هایی به قطر d (میلی‌متر) و وزن مخصوص G (گرم بر سانتی‌متر مکعب) را در کف آبراهه به‌صورت بار معلق به حرکت درآورد برابر است با :

$$v = 0.152\, d^{0.44}(G - 1)^{0.5} \qquad (۱۹-۱۴)$$

دراین فرمول v برحسب متر در ثانیه است. باید توجه داشت که این فرمول فقط در مورد ذراتی که قطر آنها بین ۰/۳۵ تا ۵/۷ میلی‌متر و وزن مخصوص آنها بین ۱/۸۳ تا ۲/۶۵ باشد صادق است.

● **مثال ۱۹-۶**

حداقل سرعت لازم برای آن که آب بتواند ذرات شن به قطر ۰/۵ سانتی‌متر را به حرکت در آورد چقدر است؟

حل

با فرض این که وزن مخصوص ذرات شن ۲/۶ باشد مقدار v برابر است با ؛

$v = 0.152(5)^{0.44}(2.6 - 1)^{0.5}$

$v = 0.38$ متر در ثانیه

$v = 38$ سانتی‌متر در ثانیه

در هیدرولوژی ، برآوردفرسایش ورسوبات سالانه حوضه‌هااز نظرمحاسبات سدسازی و تعیین حجم مرده مخازن و یا در نظرگرفتن تمهیدات رسوب‌زدایی حائز اهمیت بوده و لازم است هیدرولوژیست جهت آن رقمی را محاسبه نماید.

برای تخمین میزان فرسایش در حوضه‌های آبریز مدل‌های تجربی زیادی پیشنهاد شده است که برخی بسیار پیچیده بوده و نیاز به داده‌های اندازه‌گیری شده دارند. تعداد زیادی نیز روش‌های کاربردی پیشنهاد شده است که روش نسبتاً ساده و دقیق موسوم به PSIAC یکی از آنهاست (Pacific Southwest Inter-Agency Committee) در این روش جمعاً ۹ عامل در نظر گرفته شده و به آنها نمره داده می‌شود. پارامترهائی که در این عوامل در نظر گرفته شده و نمره‌ای که به آنها داده می‌شود عبارتند از :

۱ - زمین‌شناسی سطحی (از صفر تا ۱۰)شامل نوع سنگ، سختی، خردشدگی، تولید رسوب
۲ - خاک (از صفر تا ۱۰) شامل بافت، شوری و سدیمی بودن، سنگلاخی و ساختمان
۳ - آب و هوا (از صفر تا ۱۰) شامل تواتر رگبارها، میزان و شدت بارندگی و غیره
۴ - رواناب (از صفر تا ۱۰) شامل حجم آبدهی، شدت سیلاب و گروه هیدرولوژی خاک
۵ - پستی و بلندی (از صفر تا ۲۰) شامل شیب، دشتهای سیلابی، توسعه آبرفتها و غیره
۶ - وضع پوشش‌زمین (از ۱۰- تا ۱۰+) شامل پوشش گیاهی، سنگی، لاشبرگ و غیره
۷ - استفاده از زمین (از صفر تا ۰/۲۵) شامل نحوه استفاده از زمین، چرای دام و غیره
۸ - وضعیت فعلی فرسایش (از صفر تا ۲۵) شامل فرسایش شیاری، خندقی و لغزش ها
۹ - وضع فرسایش رودخانه‌ای (از صفر تا ۲۵) مانند فرسایش کناره‌ها

در هنگام نمره دادن باید توجه داشت که هر چه عامل مربوط باعث فرسایش بیشتر گردد نمره داده شده بیشتر خواهد بود. پس از این که حسب وضع حوضه به هر کدام از این عوامل نمره داده شده نمره کل مربوط به حوضه جمع شده و کلاس میزان رسوب دهی حوضه از جدول زیر محاسبه می‌شود.

مثلاً چنانچه در یک حوضه نمره کل مربوط به آن حوضه برابر ۳۲ باشد این حوضه در کلاس ۴ واقع بوده و میزان رسوب آن بصورت درون یابی معادل ۲۸۴ تن در کیلومتر مربع تخمین زده می‌شود (جدول ۱۹-۳).

جدول ۱۹-۳ طبقه بندی میزان رسوب دهی بر حسب روش PSIAC

کلاس فرسایش	نمره	میزان رسوب (تن در کیلومتر مربع)
1	>100	>2500
2	75-100	1500-2500
3	50-75	500-1500
4	25-50	200-500
5	0-25	<200

۱۹-۲ حمل رسوب

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.

● **مثال ۱۹-۷**

در یک حوضه آبریز که مساحت آن ۱۰ کیلومترمربع است براساس فرمول کلی فرسایش مقدار تلفات خاک در اثر فرسایش آبی ۸۹۰ تن در کیلومترمربع در سال پیش‌بینی شده است. نسبت حمل رسوب و مقدار رسوب حمل شده در این حوضه چقدر تخمین زده می‌شود.

حل

$A = 10\ km^2 = 3.8\ mile^2$

براساس فرمول ۱۹-۱۶:

$$SDR = 43.4\ A^{-0.1753}$$

$$SDR = 43.4(3.8)^{-0.1753}$$

$$SDR = 34.34\%$$

$$SDR = \frac{\text{مقدار رسوب حمل شده}}{\text{مقدار فرسایش ناخالص}}$$

$$0.34 = \frac{\text{مقدار رسوب حمل شده}}{890}$$

مقدار رسوب حمل شده $= 302\ ton/km^2/year$

$= 302 \times 10 = 3020\ ton/year$

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.

۱۹-۲-۱ 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.

● مثال ۱۹-۸

در یک رودخانه که دبی آن ۳۵ مترمکعب در ثانیه بوده است نمونه‌گیری آب به عمل آمده و نتایج حاصله از بررسی مواد معلق آن به شرح زیر بوده است. مقدار و حجم (دبی) مواد رسوبی معلق را محاسبه کنید.

حجم نمونه = 238 cc

وزن کاغذ صافی = 1.5 gr

وزن کاغذ صافی با نمونه پس از خشک شدن = 57 gr

حل

وزن خشک شدهٔ مواد رسوبی معلق = 57 − 1.5 = 55.5 gr

$$\text{غلظت مواد معلق} = \frac{55.5}{238} = 0.233 \text{ gr/cc}$$

$$= 233 \text{ gr/lit} = 233 \text{ kg/m}^3$$

حال اگر دبی مثلاً به مدت ۲ ساعت ادامه داشته باشد در این زمان وزن مواد معلق که از مقطع رودخانه گذشته است برابر خواهد بود با :

حجم آب = $2 \times 3600 \times 35 = 252000 \text{ m}^3$

وزن رسوبات معلق = $252000 \times 233 = 58.716 \times 10^6$ kg

= 58716 تن

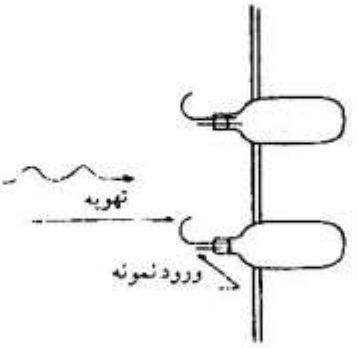
که اگر وزن مخصوص رسوبات را داشته باشیم قادر خواهیم بود حجم رسوباتی راکه رودخانه با خود حمل کرده است محاسبه کنیم. با فرض این که وزن مخصوص مواد رسوبی ۱/۴ گرم در سانتی‌متر مکعب (۱/۴ تن در هر مترمکعب) باشد، حجم مواد رسوبی برابر است با :

$$\text{حجم رسوبات معلق} = \frac{58716}{1.4} = 41940\ \text{m}^3$$

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.

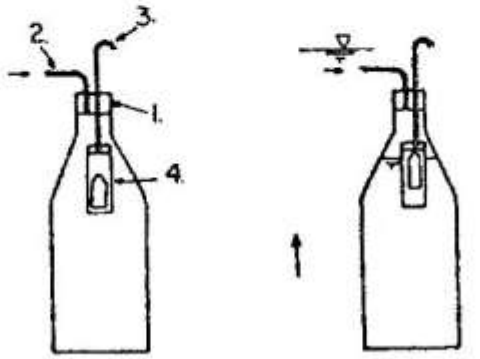
هر بطری مجهز به یک دربند لاستیکی است که در داخل آن دو لولهٔ پلاستیکی تعبیه شده است. یکی از این لوله‌ها برای ورود آب و لولهٔ دیگر برای خروج هوای داخل بطری است. پس از آن که شیشه‌ها از آب پر شد آن را بیرون آورده و زمان اندازه‌گیری با دبی آب و عمق نمونه‌برداری نیز ثبت می‌شود. این روش *را نمونه‌برداری* نقطه‌ای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



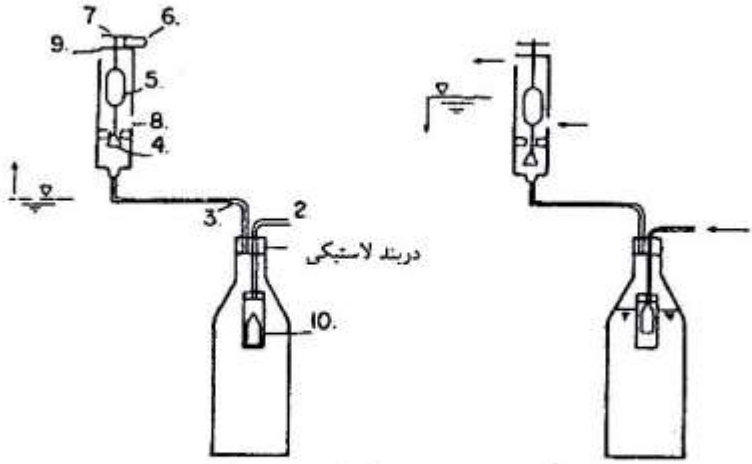
شکل ۱۹-۱ شیشه‌های نمونه‌گیری رسوب

نمونه‌گیری در هنگام بالا آمدن سطح آب در این حالت مطابق شکل ۱۹-۲ بطری نمونه‌گیری در کف رودخانه تثبیت می‌شود. پس از آن که سطح آب در تراز لولهٔ (2) قرار گرفت آب از داخل آن وارد شیشه می‌شود. هوای محبوس شدهٔ داخل بطری از لولهٔ (3) خارج می‌شود. هنگامی که بطری پر شد جسم شناور (4) عمل نمونه و لولهٔ خروجی هوا را مسدود می‌سازد. در این صورت با بسته شدن لولهٔ هوا جریان ورودی آب به داخل بطری نیز قطع می‌شود.



شکل ۱۹-۲ بطریهای نمونه‌گیری خودکار (هنگام بالا آمدن سطح آب)

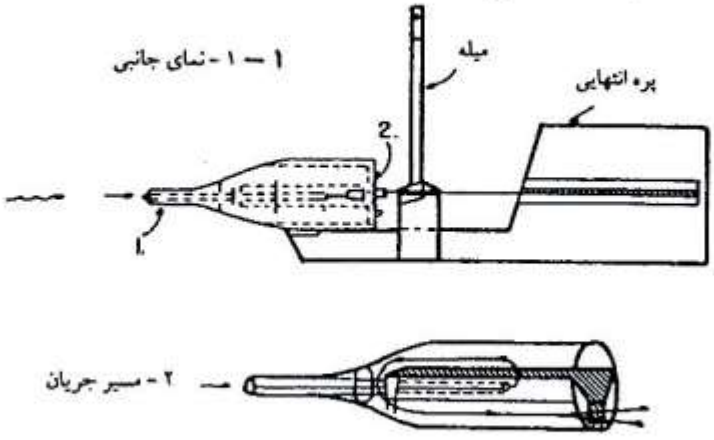
نمونه‌گیری در هنگام نزول سطح آب در این حالت نیز آب از لولهٔ (2) وارد شیشه می‌شود (شکل ۱۹-۳) ولی خروج هوا از لولهٔ (3) توسط شیر (4) که متصل به جسم شناور (5) است کنترل می‌گردد. این شیر با قراردادن جسمی (6) بین دستگاه و صفحهٔ (7) همواره بسته نگه داشته می‌شود. جسم (6) طوری انتخاب می‌شود که در مجاورت آب حل شده یا از هم پاشیده می‌شود (مثل گچ). هنگامی که سطح آب بالا آمده و در تراز منفذ (8) قرار می‌گیرد آب از منفذ وارد محفظهٔ بالایی شده ولی بدون این که آبی وارد بطری شود هوای اضافی از قسمت (9) خارج می‌شود. پس از رسیدن سطح آب به تراز (6) جسم مذکور در آب حل می‌شود ولی باز هم شناور (5) تا زمانی که سطح آب بالاتر از محفظهٔ بالایی باشد مانع از باز شدن دریچه (4) می‌گردد بمجرد این که سطح آب شروع به پایین رفتن نماید بتدریج جسم شناور نیز پایین آمده و دریچهٔ (4) باز می‌شود. در این حالت آب وارد بطری شده و هوای اضافی از (2) خارج می‌گردد. پس از آن که بطری از آب پر گردید جسم شناور (10) باعث مسدود شدن لولهٔ (2) می‌گردد. بدین‌ترتیب بطری در زمانی از آب پر می‌شود که سطح آب در حال نزول باشد.



شکل ۱۹-۳ نمونه‌گیری خودکار(هنگام نزول سطح آب)

با قرار دادن چنین بطریهای در عمقهای مختلف این امکان فراهم می‌شود تا از جریان آب در طی فروکش نمودن سیلاب نمونه‌گیری شود.

یکی دیگر از روشهای نمونه‌گیری *روش غیرنقطه‌ای* است، در این نمونه‌گیری بطری در قاب فلزی محافظ جای داده شده و بتدریج در داخل آب فرو برده می‌شود تا به کف رودخانه برخورد نماید. در طی مدتی که بطری پایین داده می‌شود آب وارد آن می‌شود و بمحض برخورد با کف رودخانه لولهٔ خروج هوا با مکانیسم ساده‌ای بسته می‌شود تا از ورود آب به داخل بطری جلوگیری شود. شکل ۱۹-۴ این نوع بطریهای نمونه‌برداری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۹-۴ بطری نمونه‌گیری غیرنقطه‌ای

۱۹-۲-۲ بار بستر

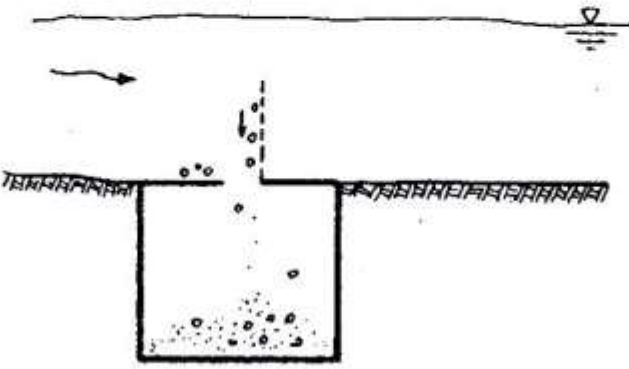
اندازه‌گیری بار بستر در رودخانه‌ها بمراتب مشکلتر از اندازه‌گیری بار معلق است. به همین دلیل در اکثر موارد فقط به اندازه‌گیری بار معلق اکتفا شده و سپس بار بستر به عنوان درصدی از بار معلق (معمولاً بین ۱۰ تا ۵۰ درصد) تخمین زده می‌شود. مثلاً اگر بار معلق ۲۳۳ کیلوگرم در مترمکعب و بار بستر ۳۰ درصد بارمعلق فرض 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

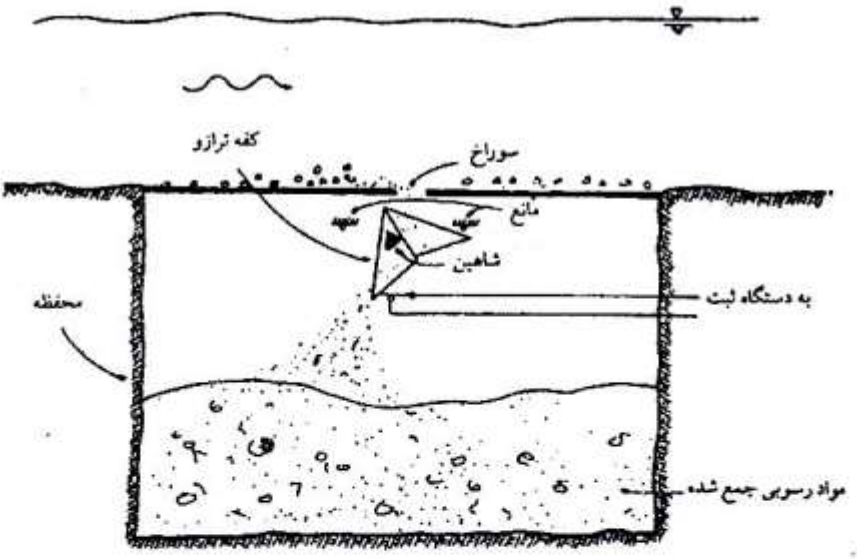
نمونه‌گیرهای گودالی در کف رودخانه و زیر بستر تعبیه می‌شوند. در قسمت عقب دهانهٔ نمونه‌گیر مطابق شکل ۱۹-۶ صفحهٔ توری شکلی قرار می‌گیرد تا مواد بستر پس از برخورد با آن به‌داخل گودال بریزند. با اندازه‌گیری وزن مواد جمع شده در داخل گودال می‌توان بار بستر را تخمین زد.

یکی دیگر از دستگاههای نمونه‌گیری خودکار که در مناطق خشک کاربرد زیادی دارد دستگاه نمونه‌گیری ترازویی است. در این دستگاه مطابق شکل ۱۹-۷ مواد بستر از دهانهٔ محفظهٔ روی ترازوی دو کفه‌ای ریخته می‌شود. پس از پر شدن یکی از کفه‌ها عمل تخلیه به صورت خودکار انجام شده و کفهٔ دیگر در مقابل موادی که از بالا ریخته می‌شود قرار می‌گیرد با شمارش تعداد

دفعاتی که کفه‌های ترازو جابجا می‌شود - تعداد دفعات به صورت الکتریکی ثبت می‌شود - می‌توان وزن مواد بستر را محاسبه کرد. شکل ۱۹-۷ دستگاه نمونه‌گیری خودکار را نشان می‌دهد. لازم به تذکر است که تنها پر شدن باعث تعویض کفه‌ها نمی‌شود بلکه هرگاه وزن مشخصی از مواد بستر روی ترازو قرار گرفت این عمل به صورت خودکار انجام می‌شود.



شکل ۱۹-۶ نمونه‌گیر گودالی



شکل ۱۹-۷ دستگاه نمونه‌گیری خودکار

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.

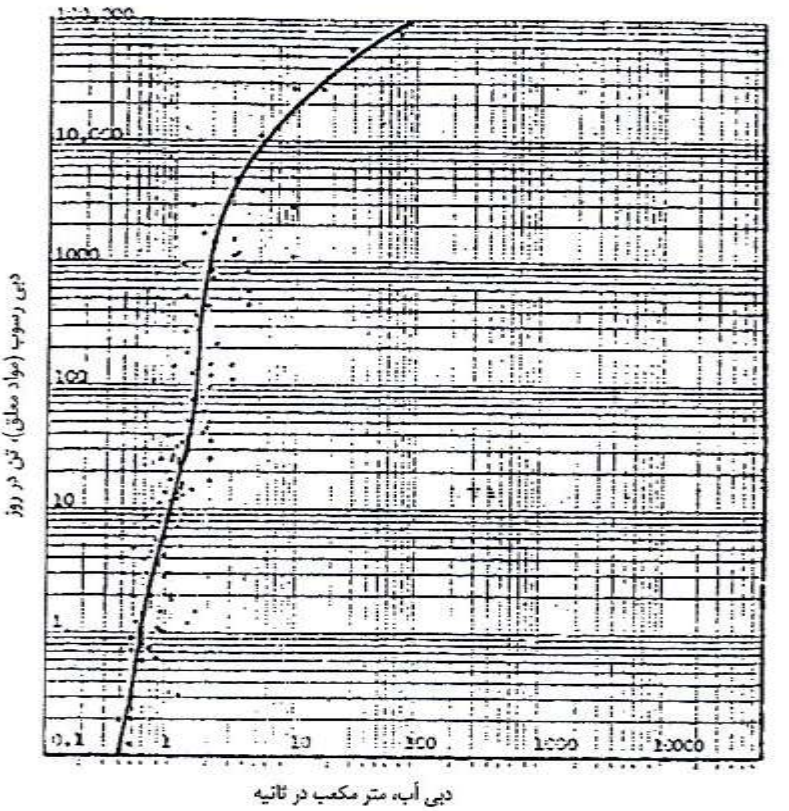
● مثال ۱۹-۹

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؟

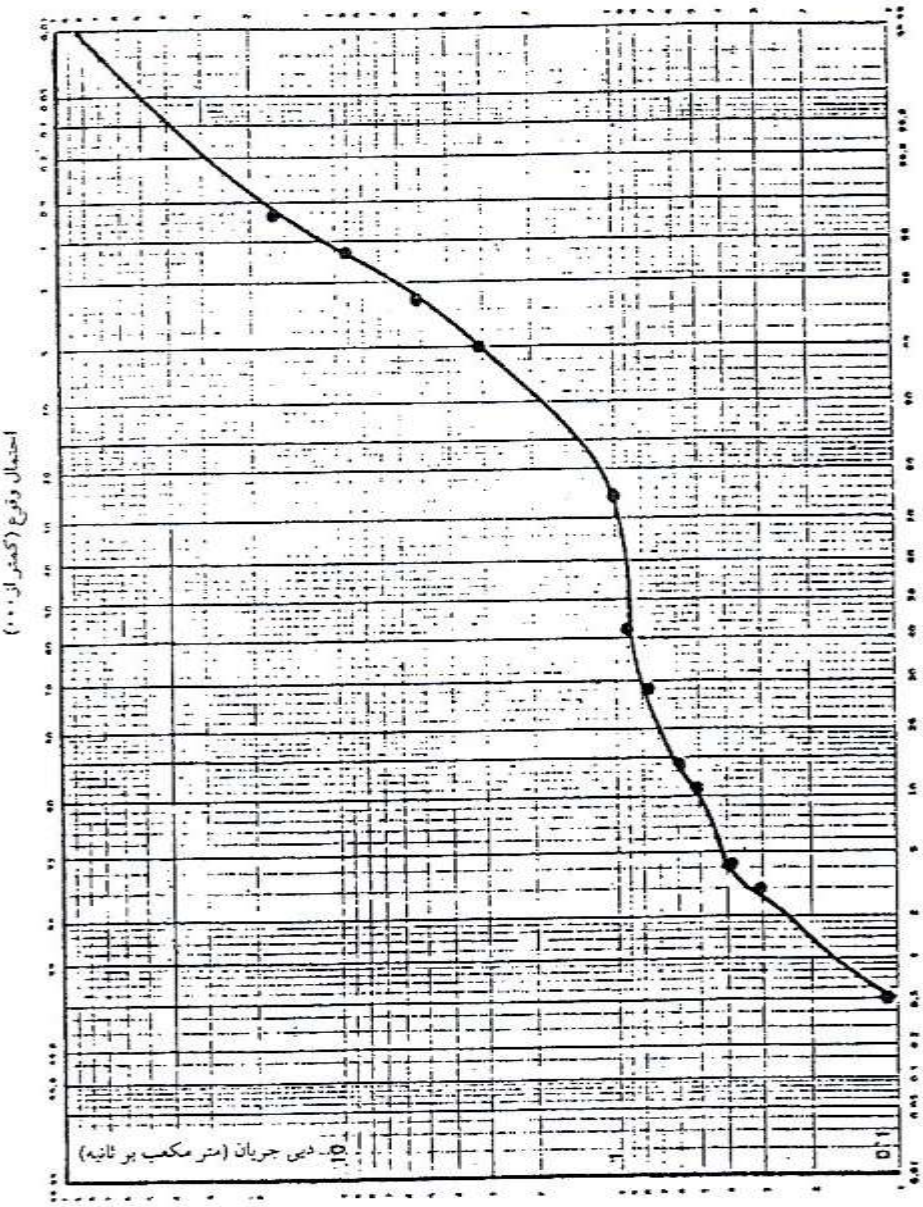
حل

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 ۱۹-۸ رابطه بین دبی رسوب و دبی جریان آب



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	حدوسط‌دسته‌های 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 = ۳۶۵×۷۸۴ = 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:

جدول ۱۹-۵

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 :

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

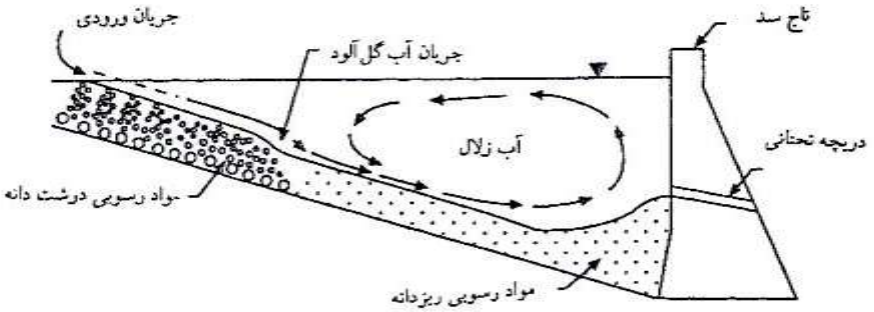
خواهد بود که از روی آن می‌توان بار رسوب را برای سالهائی که آمار وجود ندارد تخمین زد. مثلاً در سال ۷۹-۱۹۷۸ که دبی Q برابر ۴۲۵۰ میلیون متر مکعب است بار رسوب معلق ۶۲۷/۶۷ میلیون تن خواهد شد که حجم کل رسوب ۶/۸۴۲ میلیون متر مکعب برآورد می‌شود.

۱۹-۴ رسوب‌گذاری در مخازن سدها

یکی از مسائل عمده در سدسازی پر شدن مخازن از رسوباتی است که توسط جریان آب حمل شده و در مخزن سد ته نشین می‌گردد. وضعیت جریان و ترکیب رسوبات از مهمترین عوامل موثر در این پدیده می‌باشند. هنگامی که جریان آب وارد مخزن شود به دلیل بزرگ شدن سطح مقطع، سرعت آب کاهش یافته و مواد معلق شروع به ته‌نشینی می‌کنند.

آب رودخانه نسبت به آب مخزن دو تفاوت عمده دارد یکی اینکه از آن گل آلودتر است و دوم آنکه سردتر می‌باشد. این دو خاصیت باعث می‌شود که آب رودخانه سنگین‌تر از آب مخزن باشد. لذا جریان آب پس از ورود به مخزن در قسمت تحتانی مخزن در همان زیر آب و در امتداد شیب به حرکت خود ادامه می‌دهد. بطوری که مطابق شکل ۱۹-۱۰ در مخزن یک لایه‌بندی از

نظر آب بوجود می‌آید. جریان زیرین آب گل آلود پس از آنکه به قسمت انتهایی مخزن رسید بصورت عمودی بالا آمده و دوباره به سمت عقب برگشت می‌کند و در یک مسیر بیضی شکل مطابق آنچه در شکل ۱۹-۱۰ نشان داده شده است جریان پیداکرده و با آب داخل مخزن مخلوط می‌گردد و چنانچه مخزن پر از آب باشد قسمتی از جریان از سر ریز سد خارج می‌گردد.



شکل ۱۹-۱۰ تیپ مقطع مخزن یک سد و الگوی رسوب گذاری در آن

با گذشت زمان رسوبات در مخزن ته نشین می‌شوند اما ته نشین شدن رسوبات روند بسیار پیچیده‌ای داشته و پیش بینی آن بسیار مشکل و شاید غیر ممکن باشد. البته روشن است که ابتدا مواد درشت دانه و سپس مواد ریزتر رسوب می‌کنند. دانسیته مواد رسوبی متغیر و از ۵۰۰ تا ۱۷۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب متغیر است. هر چه مقدار رس و مواد کلوئیدی رسوبات بیشتر باشد دانسیته آن کمتر خواهد بود. معمولاً دانسیته مواد رسوبی ۱۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده و بر همین اساس حجم رسوبات انباشته شده در مخزن سد محاسبه می‌گردد.

علاوه بر متغیر بودن وزن مخصوص رسوبات مخزن یکی دیگر از مسائل مهم این است که وزن مخصوص رسوبات بسته به این که دائماً زیر آب هستند یا خیر نسبت به زمان تغییر می‌کند. چنانچه وزن مخصوص اولیه رسوبات γ_1 باشد وزن مخصوص رسوبات پس از T سال تغییر کرده و به γ_t می‌رسد. مقدار γ_t را می‌توان از رابطه زیر تخمین زد.

$$\gamma_t = \gamma_1 + k \log (t) \qquad (۲۱-۹)$$

در این معادله :

t = زمان برحسب سال

k = ضریبی است بنام عامل تراکم

واحد وزن مخصوص در معادله بالا برحسب پوند بر فوت مکعب بوده و مقادیر آن همراه با مقادیر عامل تراکم (k) از جدول ۱۹-۶ قابل استخراج است (هر گرم بر سانتی‌متر مکعب معادل ۶۲/۴ پوند بر فوت مکعب است).

جدول ۱۹-۶ برآورد وزن مخصوص اولیه رسوبات و عامل تراکم برای محاسبه وزن مخصوص نهائی رسوبات مخزن

ردیف	شرایط مخزن	ماسه		سیلت		رس	
		γ_1	k	γ_1	k	γ_1	k
	رسوبات همیشه مستغرق	93	0	65	5.7	30	16
	سطح آب مخزن بطور متوسط تغییر می‌کند	93	0	74	2.7	4	10.7
	سطح آب مخزن زیاد تغییر می‌کند	93	0	79	1	60	6
	مخزن اکثر اوقات خالی است	93	0	82	0	78	0

مثلاً چنانچه رسوبات یک مخزن شامل ۴۰ درصد ماسه، ۳۰ درصد سیلت و ۳۰ درصد رس باشد و مخزن در طول سال با افت قابل ملاحظه سطح آب مواجه باشد خواهیم داشت:

$$\gamma_1 = (0.4 \times 93) + (0.3 \times 79) + (0.3 \times 60) = 78.9 \frac{110}{ft^3} = 1.26 \frac{gr}{cm^3}$$

$$K = (0.4 \times 0) + (0.3 \times 1) + (0.3 \times 6) = 2.1$$

چنانچه عمر مخزن سد ۵۰ سال ولی متوسط زمان رسوبگذاری ۲۵ سال باشد وزن مخصوص نهائی رسوبات سد برابر ۱/۳۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب خواهد بود، زیرا:

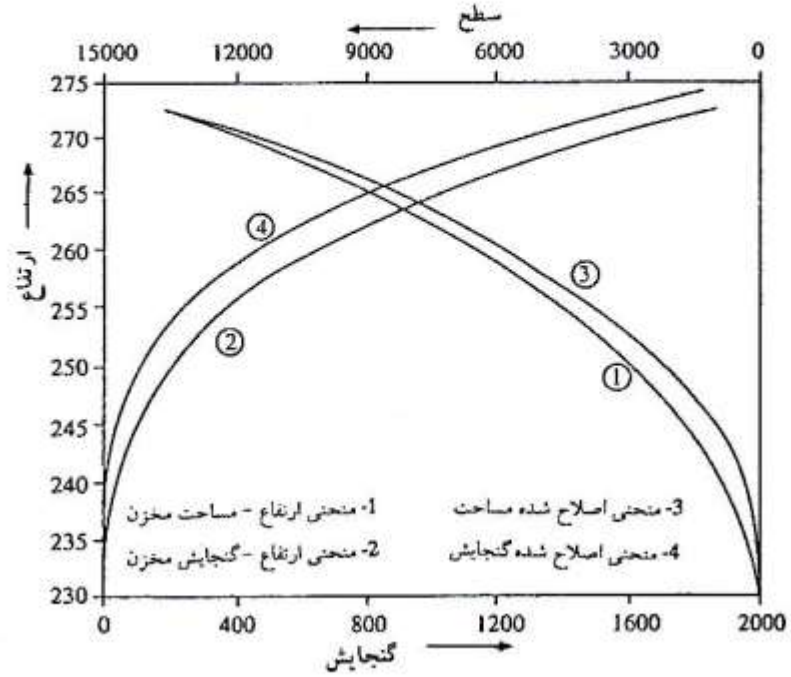
$$\gamma_t = 78.9 + 2.1 \log(25) = 81.8 \text{ lb/ft}^3 = 1.31 \text{ gr/cm}^3$$

بخشی از مخزن سد که در طول عمر سد از رسوب پر می‌شود بنام حجم مرده سد معروف است (dead storage) و قسمت بالای آن را حجم مفید مخزن گویند. ارتفاعی که حجم مرده و مفید سد را از هم جدا می‌کند رقوم حجم مرده (dead storage elevation) نام دارد. اما ته‌نشین شدن رسوبات فقط محدود به حجم مرده نبوده و در بالاتر از رقوم حجم مرده نیز مواد ته‌نشین می‌گردند. در هیدرولوژی برای پیش‌بینی نحوه پر شدن مخازن از رسوب و کاهش حجم مفید مخزن روش‌های متعددی بکار برده می‌شود که ساده‌ترین و عملی‌ترین آنها روشی است بنام روش تجربی کاهش سطح (empirical area reduction method) که در اینجا به ذکر آن می‌پردازیم.

روش تجربی کاهش سطح برای محاسبه رسوب گذاری در مخازن برای اینکه نحوه محاسبات این روش بیشتر ملموس باشد با ذکر مثال نحوه عمل گام به گام شرح داده می‌شود.

● مثال ۱۹-۱۱

می‌خواهیم در مخزن یک سد که مقدار رسوب وارده به آن در هر سال ۹ هکتار - متر به ازاء هر یکصد کیلومتر مربع سطح حوضه است (9 ha.m/sq.km) الگوی رسوب‌گذاری را در ۵۰ سال عمر سد با روش تجربی کاهش سطح محاسبه کنیم. سطح حوضه ۵۵۷۴ کیلومتر مربع و رابطه ارتفاع - سطح مخزن - حجم مخزن مطابق شکل ۱۹-۱۱ می‌باشد.



شکل ۱۹-۱۱ منحنی‌های اولیه و اصلاح شده سطح و حجم مخزن نسبت به ارتفاع

حل

برای حل این مسأله گام به گام مراحل زیر را انجام می‌دهیم.

(۱) - جدولی را تشکیل دهید (جدول ۱۹-۷) که ستون اول آن ارتفاع سطح آب در محل سد (متر) باشد. برای این منظور اولین عدد بالاترین رقوم سطح آب در هنگام پر بودن مخزن و پایین‌ترین عدد کف مخزن باشد. در این مثال بالاترین و پایین‌ترین عدد به ترتیب ۲۷۲/۵ و ۲۳۰ می‌باشند. اعداد میانی بر حسب فاصله خطوط تراز در نقشه توپوگرافی مخزن که در اینجا ۴ متر می‌باشد انتخاب شده‌اند.

(۲) - اعداد ستون دوم جدول ۱۹-۷ سطح اولیه مخزن به ازاء هر رقوم ارتفاعی است (هکتار) که با پلانی متری نقشه توپوگرافی مخزن بدست می‌آید. در این جدول سطح مخزن از ۱۳۵۶۲ هکتار در بالاترین رقوم تا صفر در کف مخزن تغییر می‌کند.

(۳) - ستون سوم جدول را که حجم کل مخزن به ازاء هر رقوم ارتفاعی می‌باشد تشکیل دهید. برای بدست آوردن اعداد این ستون می‌توان مخزن را به یک مخروط تشبیه کرد که آن را با صفحات مختلف در هر رقوم ارتفاعی قطع کرده‌ایم. حجم هر مخروط ناقص از متوسط دو مقطع در فاصله بین آنها بدست می‌آید. حجم احجام این مخروطهای ناقص برابر حجم مخزن می‌باشد.

(۴) – با داشتن ارقام ستون‌های ۱ و ۲ رابطه ارتفاع – سطح – حجم مخزن را بدست آورید. (منحنی‌های ۱ و ۲ در شکل ۱۹–۱۱ از روی این اعداد رسم شده‌اند).

(۵) – در یک دستگاه محور مختصات لگاریتمی تغییرات حجم مخزن (Q) را نسبت به عمق مخزن (H) رسم کنید تا یک خط مستقیم حاصل شود. عکس شیب خط یعنی m = Q/H را بدست آورید. بر اساس مقدار m مخازن مطابق شکل ۱۹–۱۲ به ۴ تیپ تقسیم می‌شوند که عبارتند از:

تیپ ۱ که در آنها مقدار m بین ۳/۵ تا ۴/۵ می‌باشد.
تیپ ۲ که در آنها مقدار m بین ۲/۵ تا ۳/۵ می‌باشد.
تیپ ۳ که در آنها مقدار m بین ۱/۵ تا ۲/۵ می‌باشد.
تیپ ۴ که در آنها مقدار m بین ۱/۰ تا ۱/۵ می‌باشد.
بدین ترتیب شماره تیپ مخزن را مشخص کنید.

(۶) – ستون ۴ جدول ۱۹–۷ را تکمیل کنید. این ستون عمق آب در مخزن می‌باشد. برای تکمیل این ستون باید اعداد ستون ۱ را از ۲۳۰ که رقوم کف مخزن است کسر کرد.

(۷) – ستون ۵ جدول را که عمق نسبی (P) مخزن است بدست آورید. برای بدست آوردن آن باید ارقام ستون ۴ را بر ۴۲/۵ که بالاترین عمق مخزن می‌باشد تقسیم کنید.

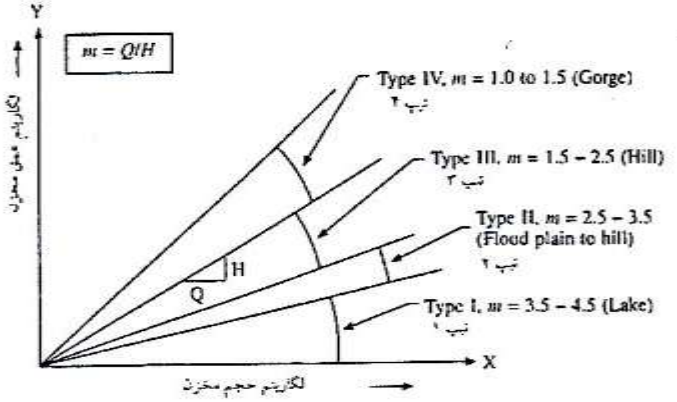
(۸) – با توجه به شماره تیپ مخزن یکی از معادلات زیر را برای آن انتخاب کنید. این معادله بنام معادله تیپ مخزن (A_p) معروف است.

$A_p = 3.417^{1.5} P (1 - P)^{0.2}$ برای مخازن تیپ ۱ (۱۹–۲۲)

$A_p = 2.324 P^{0.5} (1 - P)^{0.4}$ برای مخازن تیپ ۲ (۱۹–۲۳)

$A_p = 15.882 P^{1.1} (1 - P)^{2.3}$ برای مخازن تیپ ۳ (۱۹–۲۴)

$A_p = 4.232 P^{0.1} (1 - P)^{2.5}$ برای مخازن تیپ ۴ (۱۹–۲۵)



شکل ۱۹–۱۲ طبقه‌بندی منحنی‌های تیپ مخازن

(۹) – به ازاء مقادیر P که در ستون ۵ حساب کرده‌اید و با داشتن تیپ و معادله مربوط به مخزن مقادیر A_p را محاسبه و ستون ۷ را تشکیل دهید. در این مثال فرض شده است که مخزن از تیپ ۲ بوده و لذا معادله ۱۹-۲۲ در مورد آن صادق است. لذا اعداد ستون ۷ بر اساس معادله ۱۹-۲۲ بدست آمده‌اند.

(۱۰) – از روی آنچه در بخش ۱۹-۳ گفته شد حجم کل رسوبات وارده به مخزن سد را در طول ۵۰ عمر سد محاسبه کنید. در این مثال این مقدار ۵۰ سال عمر سد برابر است با:

$$\text{بار رسوب در ۵۰ سال} = \frac{(9)\ (50)\ (5574)}{(100)} = 25084\ \text{Ha.m} = 250.84\ \text{M.m}^3$$

(۱۱) – در آزمون اول یک رقوم مشخص را که انتظار دارید پس از عمر سد از رسوب پر شود بصورت آزمون و خطا انتخاب کنید. درپایان عمر سد باید این سطح کلاً از رسوب پر شود. در این مثال این رقوم را اول ۲۴۰ انتخاب می‌کنیم.

(۱۲) – به ازاء رقوم انتخاب شده ۲۴۰ متری از ستون ۲ سطح مخزن به دست آورید. در این مثال به ازاء رقوم ۲۴۰ متر با انترپولاسیون سطح مخزن برابر ۶۸۷ هکتار بدست می‌آید.

(۱۳) – به ازاء رقوم انتخاب شده ۲۴۰ متر مقدار A_p مربوطه را از ستون ۶ بدست آورید. در این مثال به ازاء رقوم ۲۴۰ متر مقدار A_p برابر ۱/۰۱۲ خواهد بود.

(۱۴) – اعداد بدست آمده از بند ۱۲ و ۱۳ را بر هم تقسیم کنید تا ضریب K بدست آید. مقدار این ضریب در این مثال عبارت است از:

$$K = \frac{687}{1.012} = 678.8$$

(۱۵) – با داشتن K آن را در اعداد ستون ۶ ضرب کنید تا ارقام ستون ۷ حاصل گردد.

(۱۶) – ارقام ستون ۷ سطح مربوط به قسمت پر شده با رسوب را در ترازهای مختلف نشان می‌دهد. حال با داشتن این ارقام حجم رسوب را بین هر دو سطح از فرمول زیر بدست آورده و ستون ۸ را تشکیل دهید.

$$\text{حجم رسوب} = \frac{0.5\ (A_1 + A_2)\ H}{100} \qquad (۱۹-۲۶)$$

که در آن H ارتفاع بین در سطح A_1 و A_2 می‌باشد.

(۱۷) – از رقم آخر ستون ۸ شروع کرده و مقادیر تجمعی رسوب را از پائین به بالا حساب کنید. ملاحظه می‌شود که بالاترین رقم این ستون همان عدد ۲۵۰/۸۴ میلیون متر مکعب می‌باشد. اگر حجم کل رسوب در این ستون با حجم محاسبه شده با رسوب متفاوت بود باید در بند ۱۱ عدد دیگری را بجای ۲۴۰ انتخاب کرده و کل محاسبات را تکرار کنید تا سرانجام مقدار حجم کل رسوب بدست آمده در ستون ۹ با بار کل رسوب در عمر سد برابر گردد.

(۱۸) – با کسر کردن ارقام ستون ۶ از ارقام ستون ۲ سطح اصلاح شده را بدست آورده و در ستون ۱۰ قرار دهید.

جدول ۱۹-۷ توزیع رسوب در مخزن با استفاده از روش تجربی کاهش سطح

Elevation (m) ارتفاع	Original Area (Ha.) سطح اولیه	Original Capacity ($M.m^3$) گنجایش اولیه	Depth of Reservoir col. (1) – 230 عمق مخزن	Relative Depth(P) .(4)/42.5 عمق نسبی	$A_p = 2.324P^{0.5}(1-P)^{0.4}$	Sediment Area = KA_p = $678.8A_p$ مساحت رسوب	Sediment Volume $0.5(A_1 + A_2)H/100$ حجم رسوب	Sediment Accumulated حجم تجمعی رسوب	Revised Area (Ha.) مساحت اصلاح شده	Revised Volume ($M.\ m^3$) حجم اصلاح شده
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
272.5	13562	1875.00	42.5	1.00	0.0	0.0	6.17	250.84	13562	1624.2
270.0	11512	1561.44	40.0	0.941	0.727	493.5	23.57	244.62	11018	1316.8
266.0	9579	1134.95	36.0	0.847	1.009	684.9	29.35	221.10	8894	913.9
262.0	7780	736.00	32.0	0.753	1.153	782.6	32.311	91.75	6997	544.3
258.0	5822	532.42	28.0	0.659	1.227	832.9	33.66	159.44	4989	373.0
254.0	4246	332.81	24.0	0.565	1.252	849.9	33.78	125.78	3396	207.0
250.0	2957	188.98	20.0	0.471	1.236	839.0	32.80	92.00	2118	96.98
246.0	1904	95.11	16.0	0.376	1.180	801.0	30.71	59.20	1103	35.91
242.0	1085	38.00	12.0	0.282	1.082	734.5	20.81	28.49	350	9.51
238.0	306	6.81	8.0	0.188	0.927	306.0	6.90	7.68*	0	0.0
234.0	39	0.57	4.0	0.094	0.685	39.0	0.78	0.78*	0	0.0
230.0	0	0.00	0.0	0.000	0.000	0.0	0.00	0.00	0	0.0

عمق مخزن $= 272.5 - 230.0 = 42.5$ m.

* حجم رسوب نمی‌تواند از حجم مخزن (ستون ۳) بیشتر باشد

(۱۹) – با کسر کردن ارقام ستون ۹ از اعداد ستون ۳ ستون ۱۱ جدول را که مقادیر اصلاح شده حجم مخزن است بدست آورید.

(۲۰) – حال با داشتن اعداد اصلاح شده سطح و حجم مخزن (ستون‌های ۱۰ و ۱۱) می‌توانید آنها را نسبت به ارتفاع مخزن رسم کنید تا مطابق شکل ۱۹–۱۱ منحنی‌های ۳ و ۴ که حالت اصلاح شده منحنی‌های ۱ و ۲ است بدست آید.

مسائل

۱۹–۱ در یک سد حجم آب ورودی و مقدار رسوبی که هر سال وارد مخزن می‌شود طی ۸ سال آمار به شرح زیر بوده است.

سال	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
حجم آب ورودی ($M.m^3$)	1430	3850	2050	6510	2880	1120	6050	2220
وزن رسوب ورودی (M.ton)	2.65	5.82	3.6	7.15	5.22	1.95	6.88	3.94

الف – حساب کنید متوسط بار رسوب را برای هر سال در هر ۱۰۰ کیلومتر مربع وسعت حوضه

ب – چنانچه مقدار جریان در سال ۱۹۹۰ برابر $3450\ M.m^3$ بوده باشد میزان رسوب وارد شده به مخزن را در آن سال برآورد کنید.

ج – چنانچه وسعت حوضه ۳۰۵۰ کیلومتر مربع باشد طی ۱۰۰ سال چقدر رسوب وارد مخزن سد می‌شود.

۱۹–۲ در یک رودخانه مقادیر دبی جریان (q , m^3/sec) و رسوب (q_s , tons/day) طی روزهای مختلف اندازه‌گیری و داده‌های زیر حاصل شده است.

q	q_s	q	q_s	q	q_s
880	5.33	1020	78.7	3000	1530
1520	267	1020	82.0	2350	943
1440	217	930	68.9	-	-

الف – منحنی تغییرات دبی جریان و رسوب را رسم کنید.

ب – طی یک روز دبی جریان ۱۱۴۰ متر مکعب در ثانیه بوده است مقدار رسوب چقدر تخمین زده می‌شود.

منابع برای مطالعه بیشتر

1- Chow, V.T., *Hnad book of applied hydrology*, McGraw Hill, New York, 1964.
2- Kinori, B. and J. Mevorach, *Mannual of surface drainage engineering* New York, 1984.
3- Patra, K. C. *Hydrology and water resources engineering. Alpha Sci.* International Ltd. Pangbourne, UK, 2001.
4- Schwab, G. et al, *Soil and water conservation engineering*, John Wicly Inc. New York, 1981.
5- Ward, A.D. and W.Elliot, *Environmental hydrology*, Lewis pub. New York, 1996.