فصل سیزدهم

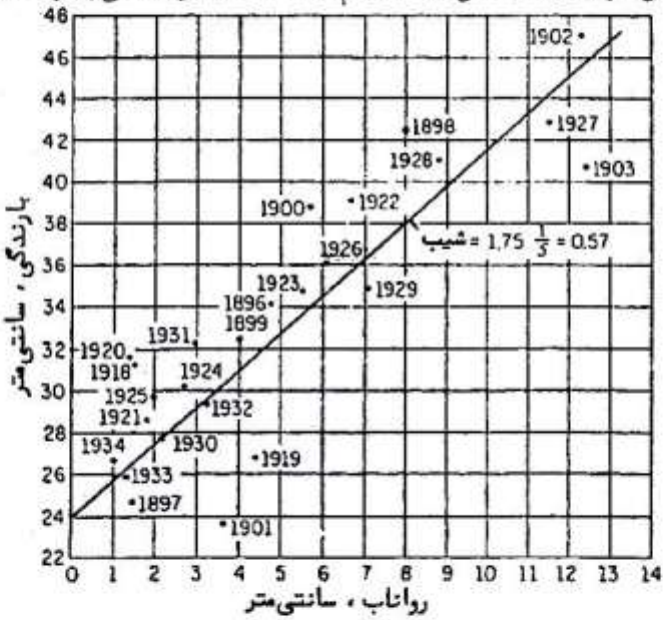
رواناب سطحی

کلّیات
ارتفاع رواناب
تخمین آبدهی سالانه حوضه
حداکثر دبی رواناب
هیدروگراف
مجزا کردن هیدروگراف
منحنی تداوم جریان
مسائل
منابع برای مطالعه بیشتر

۱-۱۳ کلّیات

بحث رواناب و رابطه بارندگی - رواناب (rainfall - runoff) از مهم‌ترین و در واقع اساسی‌ترین موضوع در هیدرولوژی آب‌های سطحی است. هرگاه شدت بارندگی از ظرفیت نفوذ آب به داخل خاک بیشتر باشد بخشی از آب حاصله از بارندگی در سطح حوضه باقی می‌ماند. این آب پس از پرکردن گودیهای سطح زمین که به آن چالاب گفته می‌شود، در امتداد شیب زمین جریان پیدا کرده و از طریق شبکه آبراهه‌ها و سپس رودخانهٔ اصلی از حوضه خارج می‌گردد. به‌این بخش از بارندگی که می‌توان مقدار آن را در رودخانه‌ها اندازه‌گیری کرد ***رواناب سطحی*** (surface run-off) می‌گویند. اصولاً جریانی که در سطح زمین پس از بارندگی بصورت ورقه‌ی راه می‌افتد قبل از آنکه به اولین رده آبراهه برسد ***جریان روی زمینی*** (overland flow) گفته می‌شود. اگر تراکم شبکه آبراهه‌های حوضه Da کیلومتر در هر کیلومتر مربع باشد متوسط طول جریان روی زمینی 0.50/Da خواهد بود. مثلاً با توجه به مثال ۱۲-۱ چنانچه تراکم شبکه رودخانه‌ها در حوضه ۲/۶۳ کیلومتر در هر کیلومتر مربع باشد طولی راکه رواناب بصورت جریان روی زمینی قبل از رسیدن به آبراهه‌ها طی می‌کند بطور متوسط ۰/۱۹ کیلومتر یا ۱۹۰ متر می‌باشد. با توجه به این که خصوصیات فیزیکی حوضه نسبةً ثابت است قاعدتاً بین بارندگی و رواناب می‌توان یک رابطهٔ مستقیم را انتظار داشت. بطوریکه اگر برای چند سال متوالی بارندگی سالانه حوضه و روانابی راکه از آن خارج می‌شود اندازه‌گیری کرده و سپس مختصات نقاط مربوطه را نسبت بهم

در یک دستگاه محور مختصات رسم کنیم، از بین این نقاط می‌توان یک خط یا منحنی را برازش داد. مثلا در شکل ۱۳-۱ رابطه بین بارندگی سالانه (سانتی‌متر) و رواناب سالانه (سانتی‌متر) برای یک حوضه آزمایشی براساس داده‌هایی که در سالهای مختلف موجود بوده است بصورت نمودار رسم شده است. پراکندگی نقاط نسبت به این خط به دلیل تغییراتی است که در شدت بارندگی و وضعیت رطوبتی خاکهای حوضه قبل از شروع بارندگیها و یا تغییرات سطح حوضه وجود داشته است. از روی شیب خط مذکور که در این شکل ۱/۷۵ می‌باشد می‌توان رابطه ریاضی بین بارندگی و رواناب را بدست آورد. در این شکل دیده می‌شود که خط از مرکز مختصات عبور نکرده است بلکه دارای عرض از مبداء ۲۴ سانتی‌متر است. یعنی در سالهایی که بارندگی سالانه کمتر از ۲۴ سانتی‌متر بوده، عملاً رواناب وجود نداشته است. رابطه رواناب و بارندگی براساس نموداری که در شکل ۱۳-۱ رسم شده است از نظر ریاضی بصورت زیر می‌باشد.



شکل ۱۳-۱ رابطه بین بارندگی و رواناب سطحی

در شکل ۱۳-۱ معادلهٔ خط را به صورت $R = S(P - P_a)$ که در آن S شیب خط نسبت به محور عرض‌ها می‌باشد نیز می‌توان نوشت که در این صورت با توجه به آنچه روی شکل مشاهده می‌شود این معادله به وضعیت $R = 0.57(P - 24)$ خواهد بود. اگر مثلاً بارندگی در یک سال ۳۴ سانتی‌متر باشد مقدار رواناب از روی شکل یا معادله ۵/۷ سانتی‌متر تخمین زده می‌شود. استخراج چنین رابطه‌هایی برای حوضه‌ها در هیدرولوژی با اهمیت بوده و می‌توانند از نظر تخمین آورد سالانه رودخانه‌ها مفید باشد، اما بدست آوردن این نوع رابطه تنها در صورتی امکان پذیر است که داده‌های اندازه‌گیری شده بارندگی و رواناب در حوضه وجود داشته باشد.

۱۳-۲ ارتفاع رواناب

رواناب حاصله از بارندگی را می‌توان بر حسب ارتفاع یا حجم توصیف کرده و آن را به‌روشهای مختلف برآورد نمود. از جمله روشهای معمول در هیدرولوژی روش پیشنهادی سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) است که برای حوضه‌هایی که در آنها داده‌های اندازه‌گیری دبی رواناب وجود ندارد بکار می‌رود. در روش SCS ارتفاع رواناب حاصله از یک بارندگی بصورت زیر محاسبه می‌شود :

$$R = \frac{(P - 0.2\,S)^2}{(P + 0.8\,S)} \qquad (۲-۱۳)$$

که در آن:

R = ارتفاع رواناب برحسب اینچ

P = ارتفاع بارندگی (اینچ)

S = عامل مربوط به نگهداشت آب در سطح زمین است که مقدار آن برابر است با:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \qquad (۳-۱۳)$$

دراین معادله CN شماره منحنی مربوط به مقدار نفوذ آب در حوضه می‌باشد که روش بدست آوردن آن در فصل قبل بحث شده است. با داشتن مقادیر بارندگی (P) و شماره منحنی حوضه (CN) می‌توان از روی معادلات فوق ارتفاع رواناب را بدست آورد.

● مثال ۱۳-۱

مقدار رواناب حاصله از ۲ اینچ بارندگی (۵۰ میلی‌متر) روی سطح یک پارک به‌وسعت ۴ هکتار راکه قسمت اعظم آن پوشیده از چمن می‌باشد حساب کنید. وضعیت خاک این حوضه در گروه هیدرولوژیک B قرار می‌گیرد و خاک به دلیل بارندگی‌های قبل مرطوب است.

حل

چنانچه شماره منحنی (CN) را برای وضعیت پوشش حوضه از جداول مربوطه در فصل

قبل بدست آوریم مقدار آن حدوداً برابر CN = 60 خواهد بود که اگر آن را برای وضعیت رطوبتی خاک اصلاح کنیم CN = 78 خواهد شد. بنابراین :

$$S = \frac{1000}{78} - 10 = 2.82$$

$$R = \frac{(2 - 0.2 \times 2.82)^2}{(2 + 0.8 \times 2.82)}$$

$$R = 0.4845 \text{ inch} = 12.3 \text{ mm}$$

لذا مقدار رواناب ۰/۴۸۴۵ اینچ (۱۲/۳ میلی‌متر) یا ۲۴ درصد بارندگی است که حجم رواناب برای سطح ۴ هکتار برابر است با :

$$Q = \frac{12.3}{1000}(4 \times 10{,}000) = 492 \text{ m}^3$$

مقدار ۰/۲۴ را در این مثال ضریب *رواناب* (run-off coefficient) گویند که از تقسیم ارتفاع رواناب بر ارتفاع بارندگی بدست می‌آید.

● مثال ۱۳-۲

مقدار CN در یک حوضه برابر ۶۹ می‌باشد، چنانچه بارندگی ۷۵ میلی‌متر باشد ارتفاع رواناب را محاسبه کنید. اگر سطح حوضه ۲۰ کیلومترمربع باشد حجم رواناب چقدر است؟

حل

$$CN = 69$$

$$P = 75 \text{ mm} = 3 \text{ inch}$$

$$S = \frac{1000}{69} - 10 = 4.49$$

$$R = \frac{(3 - 0.2 \times 4.49)^2}{(3 + 0.8 \times 4.49)}$$

$$R = 0.67 \text{ inch} = 17 \text{ mm}$$

$$Q = 20 \times 10^6 \times \frac{17}{1000} = 340{,}000 \text{ m}^3$$

رابطه بین بارندگی و رواناب برخلاف تصور همیشه خطی نیست مگر این که نگهداشت سطحی (S) در حوضه ناچیز باشد (CN = 100) که در این صورت منحنی (رابطه بارندگی- رواناب) از مرکز مختصات نیز می‌گذرد، اما برای حوضه‌هایی که در آنها نگهداشت سطحی زیاد است اولاً این رابطه بصورت یک منحنی نمایی است، ثانیاً با افزایش نمایه S منحنی از مرکز مختصات نیز فاصله گرفته و بخش زیادی از بارندگی بدون آن که جاری شود در سطح حوضه نگهداشته می‌شود. در عمل ضریب رواناب حوضه بعنوان درصدی از بارندگی که به رواناب تبدیل می‌شود مشخص و ارتفاع رواناب با فرمول ساده زیر تخمین زده می‌شود:

$$R = C \cdot P \qquad (۴-۱۳)$$

که در آن C ضریب رواناب، P مقدار ارتفاع بارندگی و R مقدار ارتفاع رواناب است. ضریب رواناب بستگی به خصوصیات فیزیکی حوضه داشته و مقدار آن را می‌توان از جدول ۱۳-۱ تخمین زد. برآورد رواناب سالانه (آبدهی سالانه) در حوضه‌های آبریز از عملیاتی است که باید توسط هیدرولوژیست‌ها انجام شود.

در صورتی که در فرمول ۱۳-۲ مقدار P بر حسب میلی‌متر باشد و بخواهیم R نیز بر حسب میلی‌متر محاسبه شود لازم است که S نیز برحسب میلی‌متر باشد در این صورت مقدار S برابر خواهد بود با:

$$S = (\frac{1000}{CN} - 10)\ 25.4 \qquad (۱۳-۵ \text{ الف})$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \qquad (۱۳-۵ \text{ ب})$$

جدول ۱۳-۱ ضریب رواناب (C) در حوضه‌های مختلف

نوع پوشش سطح حوضه	شیب‌زمین		
	0-5%	5-10%	10-30%
اراضی مرتعی			
خاک شنی لومی	0.1	0.16	0.22
خاک رسی لومی	0.3	0.36	0.42
خاک رسی سنگین	0.4	0.55	0.60
اراضی جنگلی			
خاک شنی لومی	0.1	0.25	0.3
خاک رسی لومی	0.3	0.35	0.5
خاک رسی سنگین	0.4	0.50	0.6
اراضی کشاورزی			
خاک شنی لومی	0.3	0.4	0.52
خاک رسی لومی	0.5	0.6	0.72
خاک رسی سنگین	0.6	0.7	0.82
اراضی شهری			
30% آسفالت	0.4	0.5	
50% آسفالت	0.55	0.65	
70% آسفالت	0.65	0.80	

● مثال ۱۳-۳

بارانی بمدت ۶ ساعت روی حوضه‌ای که شماره منحنی اراضی آن ۸۰ است رخ داده است. مقادیر بارش در هر ساعت بر اساس اندازه‌گیری‌های باران نگاری مطابق اعداد ستون ۱ و ۲ جدول ۱۳-۲ بوده است. حساب کنید مقادیر بارش مازاد (رواناب) در هر ساعت را.

حل

الف – ارتفاع تجمعی باران را محاسبه می‌کنیم (ارقام ستون ۳ جدول ۱۳-۲)

ب – ارتفاع بارش مازاد تجمعی را در هر ساعت محاسبه می‌کنیم (ارقام ستون ۴ جدول) مثلاً برای بارش ۴۰ میلی‌متر در ساعت دوم خواهیم داشت:

$$S = (\frac{1000}{CN} - 10)\ 25.4$$

$$S = (\frac{1000}{80} - 10)\ 25.4 = 63.5$$

$$R = \frac{(P - 0.2\ S)^2}{P + 0.8\ S}$$

$$R = \frac{[40 - 0.2\ (63.5)]^2}{40 + 0.8\ (63.5)} = 8.2^{Y}$$

ج – با کسر هر کدام از اعداد ستون ۴ از عدد ما قبل خود ارتفاع بارش مازاد در هر ساعت (هایتوگراف بارش مازاد) بدست می‌آید.

جدول ۱۳-۲

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
زمان (hr)	ارتفاع بارش (mm)	ارتفاع بارش تجمعی (mm)	ارتفاع تجمعی بارش مازاد (mm)	ارتفاع بارش مازاد (mm)
0	0	0	0	0
1	15	15	0	0
2	25	40	8.2	8.2
3	20	60	20.2	12
4	10	70	27.2	7
5	8	78	33.1	5.9
6	6	84	37.7	4.6
7	4	88	40.8	3.1
8	2	90	42.4	1.6

باید توجه داشت که استفاده از فرمول‌های ۱۳-۲ تا ۱۳-۴ فقط مربوط به یک بارش مجزاست و نمی‌توان آن را فرضاً برای کل بارندگی سالانه که در آن بارندگی‌ها به دفعات صورت می‌گیرد بکار برد. با این وجود از آنجائی که در مناطق خشک بارش‌ها عمدتاً زمستانه و فقط در یک دوره کوتاه زمستانه صورت می‌گیرد بعضی از کارشناسان فرمول‌های فوق را برای بارندگی سالانه نیز بکار برده‌اند.

● **مثال ۱۳-۴**

در یک حوضه آبریز به مساحت ۶۰ هکتار داده‌های زیر بدست آمده است.

- مقدار بارندگی ۱۰۰ میلی متر
- وضعیت رطوبت خاک قبل از بارندگی خشک می‌باشد
- پوشش زمین با گیاهان ردیفی ۴۰ هکتار با گروه هیدرولوژیکی متوسط (از نوع B در جدول ۱۲-۳)
- پوشش زمین با گیاهان جنگلی ۲۰ هکتار و گروه هیدرولوژیکی متوسط (از نوع B در جدول ۱۲-۳)

روز بعد از بارندگی ۱۰۰ میلی‌متری باران دیگری به میزان ۵۰ میلی‌متر ریزش می‌کند. حساب کنید مقدار رواناب حاصله از حوضه و ضریب رواناب را در روزهای اول و دوم.

حل

با توجه به ارقام جدول ۱۲-۴ مقادیر زیر را برای CN در نظر می‌گیریم.

CN برای پوشش زمین زراعی در شرایط متوسط = ۸۲

CN برای پوشش زمین جنگلی در شرایط متوسط = ۵۵

در صورتی که CN را برای شرایط خاک خشک اصلاح کنیم مقادیر فوق بر اساس ارقام جدول ۱۲-۵ به ترتیب به ۶۵ و ۳۶ اصلاح خواهند شد در این صورت میانگین وزنی CN عبارت است از:

$$CN = \frac{(65 \times 40) + (36 \times 20)}{60} = 55$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 = 207 \text{ mm}$$

$$R = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} = \frac{(100 - 0.2 \times 207)^2}{100 + (0.8 \times 207)} = \frac{3434}{265} = 13 \text{ mm}$$

ضریب رواناب از حاصل بخش ۱۳ بر ۱۰۰ بدست می‌آید که برابر ۱۳ درصد می‌باشد (C = 0.13).

در روز بعد جمع بارندگی ۱۵۰ میلی‌متر خواهد بود. لذا:

$$P = 100 + 50 = 150 \text{ mm}$$

برای روز دوم لازم است CN متوسط به CN مربوط به خاک مرطوب تبدیل شود که با توجه به ارقام جدول ۱۲-۵ مقادیر CN برای اراضی زراعی ۹۳ و برای اراضی جنگلی ۷۴ در نظر گرفته می‌شود و مقدار وزنی آن عبارت خواهد بود از:

$$CN = \frac{(93 \times 40)\ (74 \times 20)}{60} = 86.5$$

$$S = \frac{25400}{86.5} - 254 = 39.64 \text{ mm}$$

برای ۵۰ میلی‌متر بارندگی در روز دوم مقدار رواناب برابر است با:

$$R = \frac{[(50 - (0.2 \times 39.64)]^2}{50 + (0.8 \times 39.64)} = 21.66 \text{ mm}$$

در این وضعیت ضریب رواناب برابر است با:

$$C = 21.66 \div 50 = 0.43$$

برای آن که نقش رطوبت خاک در تولید رواناب مشخص شود در مثال ۱۳-۴ مشاهده گردید که ۱۰۰ میلی‌متر بارندگی در یک روز که خاک خشک بوده است تنها ۱۳ میلی‌متر رواناب تولید کرد حال آن که در همان حوضه در روز بعد ۵۰ میلی‌متر بارندگی که روی یک خاک مرطوب باریده است توانست ۲۱/۶۶ میلی‌متر رواناب ایجاد نماید. این وضعیت همان بحثی است که در فصل هشتم (شکل ۸-۴) در مورد تأثیر رطوبت اولیه خاک بر مقدار نفوذ آب گفته شد.

۱۳-۳ تخمین آبدهی سالانه حوضه

رواناب سالانه یک رودخانه (آورد سالانه) از مهمترین پارامترهائی است که انتظار بدست آوردن آن از یک هیدرولوژیست می‌رود. این موضوع در رودخانه‌هائی که دارای ایستگاه اندازه‌گیری آب می‌باشند کار چندان دشواری نیست اما برآورد آن برای حوضه‌های فاقد ایستگاه نسبتاً مشکل است. امروزه مدل‌های کامپیوتری به انجام این امر کمک فراوان کرده‌اند اما در طرحهای کوچک اگر دسترسی به این مدل‌ها وجود نداشته باشد می‌توان از روشهای ساده تجربی استفاده کرد. یکی از این روشها که برای تخمین آورد سالانه بکار می‌رود روشی است که بنام روش جاستین (Justin) معروف است. روش جاستین بر اساس عملکرد مشابه حوضه‌ها استوار است. در این روش ابتدا در منطقه مورد نظر یک حوضه آبریز را که دارای آمار اندازه‌گیری آب بوده و مشخصات زیر در آن معلوم باشد در نظر می‌گیریم:

- مساحت حوضه، A (کیلومتر مربع)
- حداکثر ارتفاع حوضه، H_{max} (کیلومتر)
- حداقل ارتفاع حوضه، H_{min} (کیلومتر)
- آبدهی سالانه، W (میلیون متر مکعب)
- متوسط بارش سالانه در حوضه، P (سانتی متر)
- متوسط دمای سالانه هوا، T (سانتی گراد)

حال با داشتن این مشخصه‌ها محاسبات زیر را انجام و ضریب K را که بنام ضریب جاستین معروف می‌باشد برای این حوضه بدست می‌آوریم.

$$S = \frac{H_{max} - H_{min}}{\sqrt{A}} \qquad (۶-۱۳)$$

$$R = \frac{W}{A} \qquad (۷-۱۳)$$

$$K = \frac{R(1.8\,T + 32)}{S^{0.155}\,P^2} \qquad (۸-۱۳)$$

پس از بدست آوردن ضریب K برای حوضه مذکور با انجام عمل عکس آبدهی سالانه (W) را برای حوضه موردنظر که در همان منطقه اقلیمی واقع شده است مطابق مثال زیر بدست می‌آوریم.

● مثال ۱۳-۵

می‌خواهیم آبدهی سالانه را در یک حوضه در منطقه بیرجند که مشخصات فیزیکی آن به شرح زیر است تخمین بزنیم:

- مساحت حوضه $A = 3230\ km^2$
- حداکثر ارتفاع از سطح دریا $H_{max} = 2787\ m$
- حداقل ارتفاع از سطح دریا $H_{min} = 1100\ m$
- متوسط بارش سالانه $P = 166\ mm$
- دمای متوسط سالانه حوضه $T = 12.2\ ^{\circ}C$

در یک حوضه دیگر بنام حوضه رودخانه سالار واقع در همین منطقه مشخصه‌های فیزیکی و آبدهی سالانه آن به شرح زیر معلوم می‌باشد:

- مساحت حوضه رودخانه سالار $A = 2070\ km^2$
- حداکثر ارتفاع حوضه رودخانه سالار $H_{max} = 2700\ m$
- حداقل ارتفاع حوضه رودخانه سالار $H_{min} = 1230\ m$
- آبدهی سالانه رودخانه سالار بر اساس اندازه‌گیریهای موجود ۴۰ میلیون متر مکعب
- متوسط بارش سالانه در حوضه سالار $P = 250\ mm$
- متوسط دمای سالانه $T = 13.7\ ^{\circ}C$

حل

ابتدا ضریب K را برای حوضه رودخانه سالار با استفاده از فرمول‌های زیر محاسبه می‌کنیم و آن را به رودخانه مورد نظر تعمیم می‌دهیم.

$$S = \frac{H_{max} - H_{min}}{\sqrt{A}} = \frac{2.700 - 1.230}{\sqrt{2070}}$$

$$S = 0.03231$$

$$R = \frac{W}{A} = \frac{40 \times 10^6}{2070 \times 10^6} = 0.0193\ m = 1.93\ cm$$

$$K = \frac{R(1.8\,T + 32)}{S^{0.155}\,P^2}$$

$$K = \frac{1.93\ (1.8 \times 13.7 + 32)}{(0.03231)^{0.155}\ (25)^2} = 0.2979$$

حال با داشتن این ضریب مقدار آبدهی حوضه مورد نظر قابل محاسبه است. بدین ترتیب که با انجام عمل عکس خواهیم داشت:

$$S = \frac{H_{max} - H_{min}}{\sqrt{A}}$$

$$S = \frac{2.787 - 1.100}{\sqrt{3230}} = 0.0296$$

$$R = \frac{K\ (S)^{0.155}\ P^2}{(1.8T + 32)}$$

$$R = \frac{0.2979\ (0.02968)^{0.155}(16.6)^2}{(1.8 \times 12.2 + 32)} = 0.88\ cm$$

$$W = A \cdot R$$

$$W = (3230 \times 10^6) \times (0.88 \times 10^{-2}) = 28.42 \times 10^6\ m^3$$

$$W = 28.42\ Mm^3$$

بنابراین مقدار آورد سالانه این حوضه ۲۸/۴۲ میلیون متر مکعب در سال تخمین زده می‌شود.

باید توجه داشت که در صورت عدم دسترسی به داده‌های اندازه‌گیری شده رواناب در یک حوضه مشخص برای تعیین ضریب K لازم خواهد بود حسب وضعیت حوضه رقمی را برای آن تخمین زد.روش دیگری که در این مورد می‌تواند بکار برده شود روش به اصطلاح کتاین (Cotaigne) است که اساس کار آن بر مبنای میزان کمبود جریان (D) در حوضه استوار می‌باشد. این مقدار از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$D = P - \lambda\ p^2 \qquad (۹-۱۳)$$

$$\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14\ T} \qquad (۱۰-۱۳)$$

$$R = P - D = \lambda P^2 \qquad (۱۱-۱۳)$$

در این معادله‌ها:

P= بارندگی سالانه حوضه (متر)

T= دمای متوسط حوضه (سانتی گراد)

D= کمبود جریان سالانه (متر)

R= رواناب (متر)

● **مثال ۱۳-۶**

با اطلاعات مربوط به مثال قبل، آبدهی سالانه حوضه را به روش کتاین بدست آورید.

حل

$$\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14\,T}$$

$$\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14 \times 12.2} = 0.398$$

$$D = P - \lambda\, p^2$$

$$D = 0.166 - 0.398\,(0.166)^2 = 0.155\ m = 155\ mm$$

$$R = P - D$$

$$R = 166 - 155 = 11\ mm$$

چون رواناب در سطح حوضه ۱۱ میلی‌متر است لذا آبدهی سالانه برابر است با :

$$W = R\,(A)$$

$$W = \frac{11}{1000}\,(3230 \times 10^6) = 35500000$$

$$W = 35.5\ mcm$$(میلیون متر مکعب)

ملاحظه می‌شودکه با این روش آبدهی سالانه ۳۵/۵ میلیون مترمکعب تخمین زده می‌شود.

علاوه بر روشهای فوق انجمن تحقیقات کشاورزی در هند نیز فرمول ساده‌ای را برای این منظور ارائه داده است که بصورت زیر می‌باشد.

$$Q = \frac{(1.115\ P^{1.44})}{T^{1.34}\ A^{0.0613}} \qquad (۱۲-۱۳)$$

در این معادله:

P= بارندگی سالانه حوضه (سانتی متر)

T= دمای متوسط سالانه حوضه (سانتی گراد)

Q= رواناب سالانه حوضه (سانتی متر)

A= مساحت حوضه (کیلومتر مربع)

مثلاً در مورد مثال ۱۳-۵ برای حوضه رودخانه سالار با مساحت ۲۰۷۰ کیلومتر مربع و بارندگی سالانه ۲۵۰ میلی‌متر (۲۵ سانتی‌متر) و دمای متوسط سالانه ۱۳/۷ درجه سانتی گراد مقدار رواناب سالانه از روی معادله ۱۳-۱۲ برابر ۲/۱۵ سانتی متر بدست می‌آید که با توجه به سطح حوضه معادل ۴۴/۶ میلیون متر مکعب می‌باشد.

۱۳-۴ حداکثر دبی رواناب

در طراحی سازه‌های آبی علاوه بر حجم یا ارتفاع رواناب حاصل از بارندگیها حداکثر شدت لحظه‌ای رواناب نیز مورد نظر می‌باشد. ساده‌ترین رابطه‌ای که برای تخمین حداکثر دبی رواناب می‌توان نوشت معادله *استدلالی* (rational) است. چنانچه بارانی با شدت i روی حوضه ببارد و مساحت حوضه معادل A باشد اگر شدت بارندگی ثابت و مدت بارندگی برابر زمان تمرکز حوضه یا بیشتر از آن باشد با فرض این که بارندگی تمام سطح A را در برگرفته باشد حداکثر دبی رواناب با توجه به ضریب رواناب C برابر خواهد بود با،

$$Q = \frac{1}{36} C i A \qquad (۱۳-۱۳)$$

در این معادله:

i = شدت بارندگی برحسب (سانتی‌متر بر ساعت)

A = سطح حوضه (هکتار)

C = ضریب رواناب (از جدول ۱۳-۱)

Q = حداکثر دبی رواناب (مترمکعب در ثانیه)

چنانچه شدت بارندگی برحسب میلی‌متر در ساعت و مساحت حوضه برحسب کیلومترمربع باشند دبی خروجی (Q) برحسب مترمکعب در ثانیه عبارت خواهد بود از:

$$Q = 0.278\ C i A \qquad (۱۳-۱۴)$$

● **مثال ۱۳-۷**

از یک حوضهٔ آبریز که خاک آن از نوع شنی لومی است به عنوان مرتع استفاده می‌شود. بارانی بشدت ۱۵ میلی‌متر در ساعت به مدت ۱/۵ ساعت روی این حوضه می‌بارد. ارتفاع رواناب و دبی آن را محاسبه کنید. شیب اراضی حوضه ۷ درصد است و مساحت حوضه ۲/۵ کیلومترمربع می‌باشد.

حل

با فرض این که زمان تمرکز حوضه ۱/۵ ساعت باشد ابتدا از جدول ۱۳-۱ مقدار ضریب رواناب $C = 0.16$ به دست می‌آید.

ارتفاع رواناب: $R = C \cdot P = 0.16(15) \times 1.5 = 3.6\ mm$

و حداکثر دبی رواناب برابر است با:

$$Q = \frac{1}{36} C i A$$

$$Q = \frac{1}{36} \times 0.16 \times \frac{15}{10} \times 250 = 1.67\ m^3/sec$$

در روش استدلالی حداکثر دبی لحظه‌ای بااین فرض محاسبه می‌شود که مدت بارندگی برابر زمان تمرکز حوضه باشد. یعنی حداکثر شدت بارانی که مدت آن برابر زمان تمرکز حوضه است در فرمول لحاظ می‌شود. در غیر این صورت دبی کمتر از مقدار فوق خواهد بود. زیرا اگر مدت بارندگی بیشتر از زمان تمرکز باشد بر اساس رابطه شدت - مدت چنین بارانی از شدت کمتری بر خوردار است و لذا دبی به این دلیل کاهش می‌یابد و بر عکس اگر مدت بارندگی از زمان تمرکز کمتر باشد قبل از آنکه تمام سطح حوضه در رواناب مشارکت نمایند باران خاتمه پیداکرده و لذا دبی کمتر می‌شود. لذا حداکثر دبی وقتی است که مدت بارندگی برابر زمان تمرکز باشد. روش استدلالی بسیار ساده بوده و درکارهای کوچک مانند محاسبه حداکثر دبی جریان‌هائی که در راه‌سازی باید از زیرپل‌ها عبورکند از این روش استفاده می‌شود.

روش دیگری که برای تخمین حداکثر شدت رواناب بکار برده می‌شود روش مدت-مساحت (time-area method) است. روش مدت - مساحت در واقع حالت پیشرفته‌تر روش استدلالی است. بااین روش در مواردی که شدت بارندگی در ساعتهای مختلف تغییر کند می‌توان با دقت بیشتر رواناب را تخمین زد. فرض کنید در یک حوضه آبریز، بارانی به مدت چند ساعت ببارد و شدت باران در دوره‌های زمانی t (مثلاً یک ساعت) مطابق شکل ۱۳-۲ به ترتیب i_1 ، i_2 ، i_3 ، i_4 ،... و i_n باشد. اگر خطوط هم-پیمایش حوضه را برای Δt که در اینجا یک ساعت فرض شده است رسم کنیم مساحت بین هر دو خط هم-پیمایش به ترتیب A_1 ، A_2 ، A_3 ،... و A_n است. لازم به ذکر است که خطوط هم-پیمایش خطوطی هستند که نقاط همزمان تمرکز را به یکدیگر متصل می‌کنند. مقدار دبی که در دوره‌های مختلف از حوضه خارج می‌شود با توجه به فرمول استدلالی به شرح زیر است.

- برای دوره اول (t_1) که فقط مساحت A_1 در دبی خروجی دخالت دارد .

$$Q_1 = 0.278\ C(A_1\ i_1) \qquad (۱۵-۱۳)$$

- برای دوره دوم (t_2) که علاوه بر مساحت A_1 ، مساحت A_2 نیز در دبی لحظه‌ای دخالت دارد با توجه به این که مساحت A_1 نزدیک قسمت خروجی است لذا برای آن باید شدت باران در ساعت دوم (i_2) را در نظر گرفت و برای مساحت A_2 شدت مربوط به ساعت اول مؤثر بوده است.یعنی تاثیر مجموع این مساحتها بصورت زیر است.

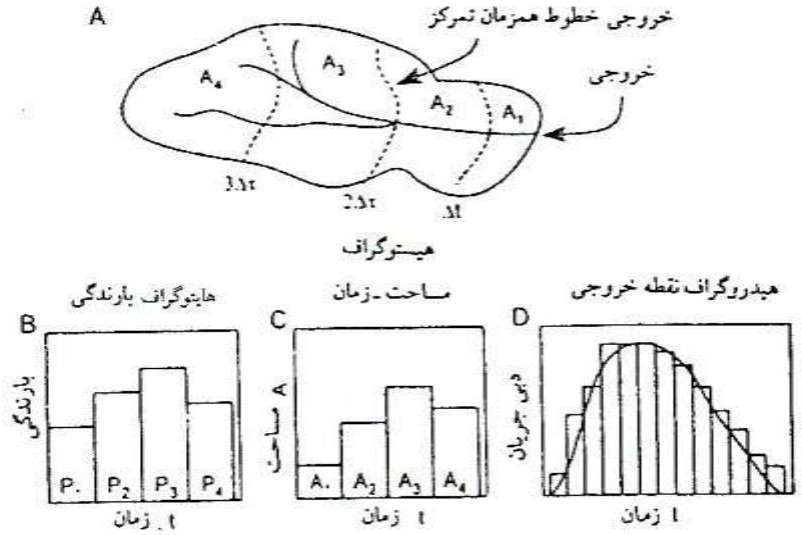
$$Q_2 = 0.278C(A_1\ i_2 + A_2\ i_1) \qquad (۱۶-۱۳)$$

و بهمین روش در انتهای ساعتهای سوم و چهارم خواهیم داشت که :

$$Q_3 = 0.278\ C(A_1\ i_3 + A_2\ i_2 + A_3\ i_1) \qquad (۱۷-۱۳)$$

$$Q_4 = 0.278\ C(A_1\ i_4 + A_2\ i_3 + A_3\ i_2 + A_4\ i_1) \qquad (۱۸-۱۳)$$

مشاهده می‌شود که دبی مرتب در حال افزایش خواهد بود تا هنگامی که به زمان تمرکز حوضه برسیم که در آن موقع دبی خروجی به حداکثر می‌رسد و اگر شدت بارندگی افزایش نیابد چنانچه مدت بارندگی بیشتر از زمان تمرکز حوضه باشد دبی هیدروگراف کاهش پیدا خواهد کرد.



شکل ۱۳-۲ روش مدت - مساحت

مزیت روش مدت - مساحت این است که در آن فرض یکنواخت بودن بارندگی در طول مدت بارش وجود ندارد. از طرف دیگر شدت بارندگی بستگی به مدت بارندگی داشته و برای ما پیش‌بینی مدت بارندگی از قبل مشخص نمی‌باشد. از آنجایی که در اکثر موارد پیش‌بینی حداکثر دبی، موردنظر می‌باشد برای تخمین حداکثر جریانی که از حوضه ممکن است خارج شود می‌توان چنین فرض نمود که مدت بارندگی برابر زمان تمرکز حوضه (t_c) باشدولی شدت بارندگی در هریک از دورها (Δt) از الگوی توزیع بارندگی منطقه پیروی کند. اگر تغییرات شدت بارندگی نسبت به زمان (هایتوگراف hyetograph) در دست باشد محاسبات بیشتر با واقعیت تطبیق خواهد داشت در غیراین صورت می‌توان از الگوهای مرسوم توزیع زمانی بارندگی استفاده کرد(جدول ۱۳-۳). روش ساده‌تر این است که فرض کنیم که شدت بارندگی در هر ساعت کمتر از ساعت قبل بوده و کاهش آن متناسب با رابطه شدت-مدت بارندگی‌های منطقه باشد. مثلاً اگر زمان تمرکز ۳ ساعت است در ساعت اول برای بارندگی شدتی معادل حداکثر شدت بارانهای یک ساعته منطقه فرض کرد، در ساعت دوم شدتی معادل حداکثر شدت بارانهای دو ساعته و در ساعت سوم شدتی معادل حداکثر بارانهای سه ساعته را برای آن فرض نمود. البته در واقع چنین نبوده و اگر باران سه ساعت بطور پیوسته ببارد با توجه به مطالب فوق شدت آن در ساعات اول و دوم زیادتراز معمول لحاظ شده است که این می‌تواند به عنوان ضریب اطمینان در نظر گرفته شود. بدین‌ترتیب می‌توانیم حداکثر رواناب را که از حوضه خارج خواهد

شد با اطمینان زیاد پیش‌بینی نماییم. برای این منظور به ترتیب عملیات زیر را انجام می‌دهیم:

(۱) خطوط هم-پیمایش حوضه را برای دوره‌های زمانی Δt رسم کنید. سعی شود زمان تمرکز حوضه (t_c) مضربی از Δt باشد. زمان تمرکز برای حوضه‌های کوچک از فرمول کرپیچ که در سیستم متریک بصورت زیر است محاسبه می‌شود.

$$t_c = 0.0003\ L^{0.77}\ S^{-0.385} \qquad (۱۹-۱۳)$$

در این معادله L طول حوضه در مسیر رودخانه اصلی برحسب متر، S شیب آبراهه اصلی (برحسب متر بر متر) و t_c برحسب ساعت می‌باشد. برای رسم خطوط هم-پیمایش ساده‌ترین روش استفاده از تعیین سرعت حرکت آب از روی شیب حوضه و بدست آوردن فاصله‌ای است که آب در دوره زمانی مورد نظر طی می‌کند.

(۲) از روی الگوی توزیع بارندگی منطقه مقدار و سپس شدت بارندگی را برای هریک از دوره‌های زمانی Δt_1، Δt_2 و ... تخمین بزنید. الگوئی که سازمان هواشناسی جهانی (WMO)برای توزیع مقدار بارش در طول بارندگی پیشنهاد نموده است به شرح جدول ۱۳-۳ است که با استفاده‌ازاین‌الگو امکان تعیین مقدار و شدت بارندگی در هرکدام از این دوره‌ها امکان‌پذیر است.

(۳) با فرمول‌های روش مدت - مساحت، دبی خروجی از حوضه را محاسبه کنید.

جدول ۱۳-۳ توزیع بارندگی در طول بارش بر اساس روش WMO

زمان بارندگی(٪)		مقدار بارندگی (٪)
0	شروع	0
10		3
20		13
30		20
40		60
50		70
60		78
70		83
80		90
90		95
100	پایان	100

● مثال ۱۳-۸

زمان تمرکز یک حوضهٔ آبریز ۵ ساعت برآورد شده است. با توجه به منحنی شدت-مدت بارندگی و خطوط هم-پیمایش حوضه که در شکل ۱۳-۳ رسم شده است حداکثر دبی که از این حوضه در اثر بارندگی ۸ ساعته خارج خواهد شد چقدر است (ضریب رواناب را ۰/۶ در نظر بگیرید).

حل

با توجه به این که زمان تمرکز $t_c = 5$ hr می‌باشد و Δt برابر یک ساعت انتخاب می‌شود ($\Delta t = 1$ hr) منحنی‌های هم-پیمایش حوضه را به ازای Δt های یک ساعته رسم می‌کنیم که در شکل ۱۳-۳ ب نشان داده شده است. مساحتهای محصور بین خطوط ایزوکرونال حوضه نیز در روی شکل برحسب کیلومتر مربع مشخص شده‌اند. حال از روی الگوی توزیع شدت بارندگی (شکل ۱۳-۳ الف) شدت بارندگی در ساعات ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ را به دست می‌آوریم که بطور متوسط برابر خواهد بود با ۴۵، ۳۵، ۲۲، ۱۵ و ۹ میلی‌متر در ساعت. مقادیر دبی خروجی از حوضه در Δt های مختلف با توجه به فرمول $Q = 0.278\ C\ i\ A$ به‌شرح زیر است.

پس از Δt (یک ساعت):

$$Q_1 = 0.278(0.6)(45)(10) = 75\ m^3/sec$$

پس از $2\Delta t$ (۲ ساعت):

$$Q_2 = 0.278(0.6)[(35)(10)+(45)(15)] = 170\ m^3/sec$$

پس از $3\Delta t$ (۳ ساعت):

$$Q_3 = 0.278(0.6)[(22)(10)+(35)(15)+(45)(12)] = 214\ m^3/sec$$

پس از $4\Delta t$ (۴ ساعت):

$$Q_4 = 0.278(0.6)[(15)(10)+(22)(15)+(35)(12)+(45)(20)] = 300\ m^3/sec$$

پس از $5\Delta t$ (۵ ساعت):

$$Q_5 = 0.278(0.6)[(9)(10)+(15)(15)+(22)(12)+(35)(20)+(45)(13)] = 310\ m^3/sec$$

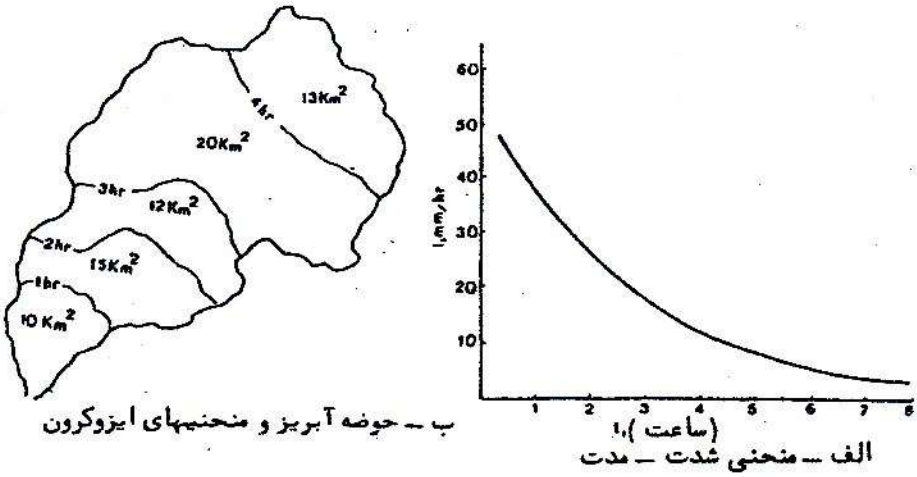
بنابراین حداکثر دبی پس از ۵ ساعت معادل ۳۱۰ مترمکعب در ثانیه خواهد بود. چون بارندگی ۸ ساعت به طول انجامیده است شدت بارندگی در ساعات ۶، ۷ و ۸ به ترتیب $i_6 = 7$ mm/hr، $i_7 = 6$ mm/hr و $i_8 = 5$ mm/hr است لذا رواناب در ساعتهای ۶، ۷ و ۸ به ترتیب عبارت خواهد بود از:

$$Q_6 = 0.278(0.6)[(7)(10)+(9)(15)+(15)(12)+(22)(20)+(35)(13)] = 213\ m^3/sec$$

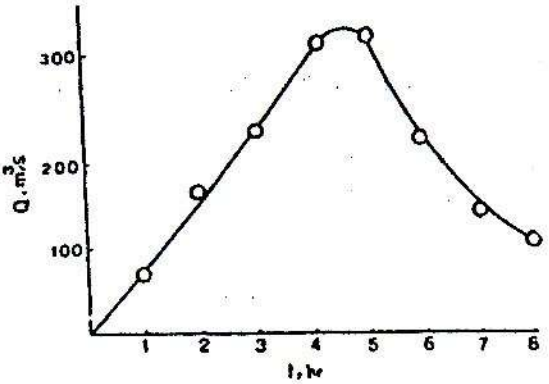
$$Q_7 = 0.278(0.6)[(6)(10)+(7)(15)+(9)\ (12)+(15)(20)+(22)(13)] = 143\ m^3/sec$$

$$Q_8 = 0.278(0.6)[(5)(10)+(6)(15)+(7)(12)+(9)(20)+(15)(13)] = 100\ m^3/sec$$

مشاهده می‌شود که دبی مرتب در حال نزول می‌باشد. بطوریکه اگر منحنی تغییرات Q را نسبت به Δt های مختلف رسم کنیم مشاهده خواهد شد که دبی ابتدا افزایش یافته، پس از ۵ ساعت به حداکثر می‌رسد و سپس دوباره کاهش می‌یابد. یعنی بالاترین مقدار دبی در زمانی که معادل زمان تمرکز حوضه است رخ می‌دهد (شکل ۱۳-۴).



شکل ۱۳-۳



شکل ۱۳-۴

در معادله استدلالی آنچه حائز اهمیت است تخمین دقیق ضریب C و شدت بارندگی (I) است. شدت بارندگی تابعی از مدت بارش و دوره برگشت آن است. اگر مقدار بارندگی (F) و مدت (t) را داشته باشیم ساده‌ترین راه برای بدست آوردن شدت بارندگی آن است که برای درجه اطمینان بیشتر بجای تقسیم F بر t از فرمول $I = \frac{F}{2} + \frac{1}{t}$ مثلاً چنانچه مدت بارش ۳ ساعت و مقدار آن ۲۶ میلی‌متر بوده باشد با استفاده از فرمول فوق شدت باران 13.3 mm/h در ساعت خواهد بود در حالیکه با تقسیم F بر t مقدار آن ۸/۶ میلی‌متر در ساعت بدست می‌آید. اما اگر

فقط مدت زمان تمرکز را در اختیار داشته باشیم توصیه می‌شود برای تخمین شدت بارندگی و استفاده از آن در معادله استدلالی از معادلات زیر استفاده شود. در این فرمول‌ها I شدت بارندگی بر حسب میلی‌متر بر ساعت و t بر حسب دقیقه است.

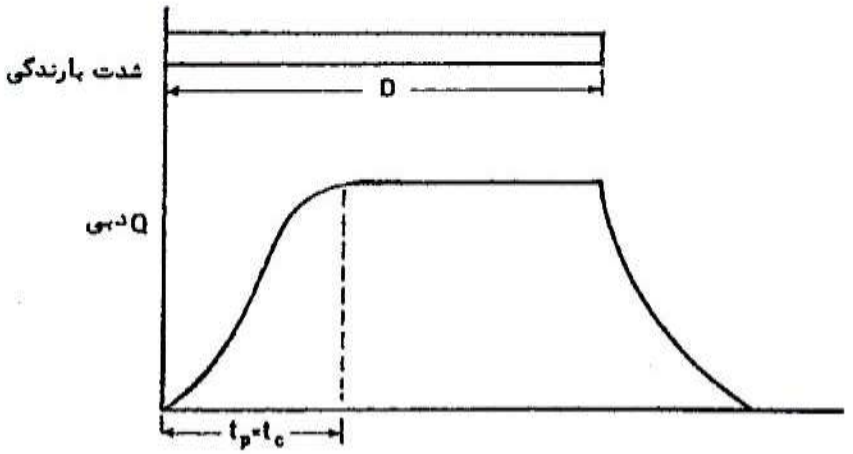
- برای باران‌های معمولی $I = 30.48/t^{0.5}$
- برای باران‌های معمولی تا شدید $I = 63.8/t^{0.687}$
- برای باران‌های آرام و زمستانی $I = 15.24/t^{0.5}$
- برای باران‌های با دوره بازگشت ۱۰ سال $I = (1045/t)^{0.5}$
- برای باران‌های با دوره بازگشت ۱۵ سال $I = (2090/t)^{0.5}$
- برای باران‌های با حداکثر شدت $I = 98.4/t^{0.687}$

مثلاً چنانچه زمان تمرکز را ۲۵ دقیقه در نظر بگیریم شدت بارندگی بر اساس فرمول‌های فوق به ترتیب ۱/۶، ۶/۹، ۱/۳، ۶/۵، ۱/۹ و ۱۰/۸ میلی‌متر بر ساعت خواهد بود.

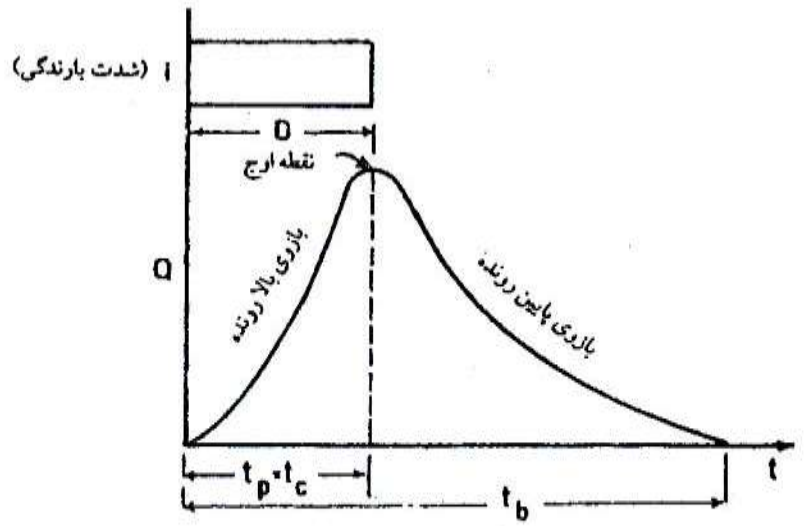
۵-۱۳ هیدروگراف

هیدروگراف نموداری است که تغییرات دبی رواناب را نسبت به زمان نشان می‌دهد. در قسمت قبل گفته شد که اگر روی یک حوضهٔ آبریز که زمان تمرکز آن t_c است باران یکنواختی به مدت D ساعت ببارد و $D > t_c$ باشد دبی خروجی از حوضه بتدریج افزایش می‌یابد و در زمانی که برابر زمان تمرکز حوضه است به حداکثر خود می‌رسد. سپس تا زمانی که بارندگی ادامه دارد دبی ثابت باقی مانده ولی بلافاصله پس از قطع باران دبی نیز تقلیل می‌یابد. چنین منحنی که تغییرات دبی را در زمانهای مختلف نشان می‌دهد هیدروگراف گویند. شکل ۱۳-۵ تیپ هیدروگراف‌هایی است که در آن تداوم بارندگی (D) از زمان تمرکز حوضه (t_c) بیشتر است. در چنین وضعیتی زمان رسیدن به اوج هیدروگراف (t_p) با زمان تمرکز برابر خواهد بود ($t_p = t_c$). اما اگر مدت بارندگی برابر زمان تمرکز حوضه ($D = t_c$) باشد در شکل هیدروگراف تغییراتی بوجود می‌آید و قسمت اوج آن از حالت پهن بودن خارج شده و شکل قله‌ای بخود می‌گیرد. بطوریکه هیدروگراف بلافاصله پس از رسیدن به اوج دوباره نزول کرده و منحنی شکل مثلثی یا زنگوله‌ای پیدا می‌کند. در چنین وضعیتی چون تداوم بارندگی دقیقاً برابرزمان تمرکز حوضه است زمان رسیدن به اوج نیز برابر زمان تمرکز خواهد بود. که این وضعیت در شکل ۱۳-۶ نشان داده شده است. این شکل برای وضعیتی است که زمان تمرکز حوضه (t_c) و تداوم بارندگی (D) با هم برابر بوده‌اند. ($D = t_c$). در نتیجه هیدروگراف در زمانی به اوج خود می‌رسد (t_p) که بارندگی به اتمام رسیده باشد. در این وضعیت زمان رسیدن به اوج در هیدروگراف برابر زمان تمرکز و تداوم بارندگی است ($t_p = t_c = D$).

اگر مدت بارندگی کوتاهتر از زمان تمرکز حوضه باشد باز هم هیدروگراف شکل زنگوله‌ای خود را حفظ خواهد کرد ولی هیدروگراف پس از یک تأخیر زمانی به نقطه اوج می‌رسد (شکل ۱۳-۷). فاصله زمانی بین مرکز بارندگی تا نقطه اوج هیدروگراف را *زمان تأخیر* (lag time) می‌گویند. (t_l در شکل ۱۳-۷ و یا t_{lag} در شکل ۳-۸).



شکل ۱۳-۵ نمونه یک هیدروگراف برای وضعیّت بارندگیهای با شدت ثابت که در آنها مدت بارندگی طولانی‌تر از زمان تمرکز است.



شکل ۱۳-۶ نمونه یک هیدروگراف برای وضعیّتی‌که زمان بارندگی مساوی زمان تمرکز است.

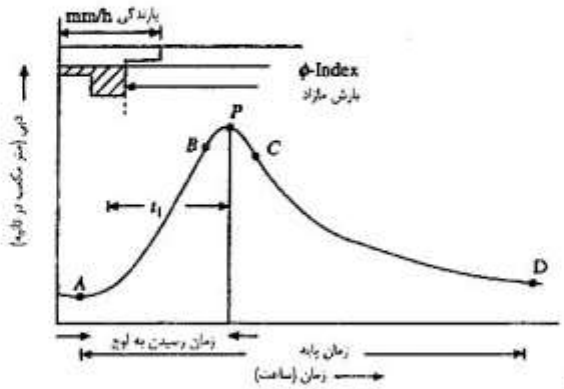
بطور کلی هر هیدروگراف از سه قسمت اساسی تشکیل شده است که عبارتند از:

● ***بازوی بالا رونده*** (rising limb) : اگر به شکل ۱۳-۷ توجه شود بارانی که با شدت معین روی حوضه باریده است پس از آن که به اندازه نمایه Φ در خاک نفوذ نموده است مازاد آن در سطح حوضه جاری شده و هیدروگرافی را مشابه آن چه در شکل مشاهده می‌کنید تشکیل می‌دهد. قسمت A تا B را بازوی بالا رونده هیدروگراف می‌گویند که نشان می‌دهد چگونه دبی خروجی از حوضه پس از بارندگی افزایش می‌یابد. این قسمت از هیدروگراف بیشتر تحت تاثیر خصوصیات بارندگی و سطح حوضه می‌باشد و قاعدتاً کمی حالت محدّب (concave) دارد. پس از آن که تمام سطح حوضه در رواناب خروجی مشارکت نمودند هیدروگراف به نقطه اوج خود می‌رسد.

● ***اوج*** (peak) یا ***تاج*** (crest segment): حداکثر دبی هیدروگراف معمولاً یک نقطه نیست بلکه بخشی از منحنی هیدروگراف می‌باشد که در شکل ۱۳-۷ از B تا C می‌باشد. با این وجود همیشه هیدرولوژیست‌ها علاقمند هستند که یک نقطه مشخص را مانند P در هیدروگراف مشخص کنند تا از آن به عنوان حداکثر دبی استفاده نمایند.

● ***بازوی پائین رونده هیدروگراف*** (recession limb) : بخش C تا D را روی شکل ۱۳-۷ که حالت مقعر دارد بازوی پائین رونده هیدروگراف گویند. این بخش نشان دهنده چگونگی تخلیه آب ذخیره شده در حوضه طی بارندگی می‌باشد. بعبارت دیگر تا نقطه C آب در حوضه ذخیره شده و از آن به بعد تخلیه می‌گردد. نقطه D جائی است که از آن به بعد آب جاری در رودخانه عمدتاً از آب‌های زیرزمینی و زیرسطحی تامین می‌شود و بارندگی تاثیری بر آن ندارد. شیب بازوی پائین رونده هیدروگراف نشان دهنده سرعت آب ذخیره شده در چالاب‌های سطحی می‌باشد.

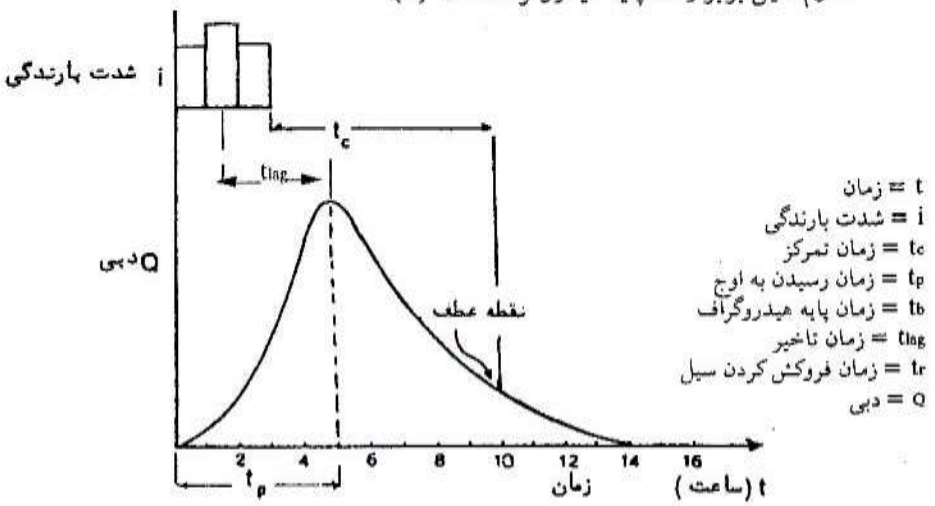
روی محور افقی در شکل ۱۳-۷ فاصله‌ای که از A تا P طی می‌شود بنام ***زمان رسیدن به اوج*** (time to peak) و فاصله‌ای که از A تا D طی می‌شود ***زمان پایه هیدروگراف*** (base time) نام دارد. زمان رسیدن به اوج معمولاً با علامت t_p و زمان پایه هیدروگراف با علامت t_b نشان داده می‌شود.



شکل ۱۳-۷ وضعیت هیدروگراف در شرایطی که مدت بارندگی کوتاهتر از زمان تمرکز حوضه باشد.

چنانچه مدت بارندگی کمتر از زمان تمرکز باشد دقیقاً نمی‌توان از روی هیدروگراف زمان تمرکز را بدست آورد. اما تجربه نشان داده است که فاصله زمانی بین انتهای بارندگی مؤثر تا نقطه‌ای که هیدروگراف در قسمت نزولی خود تغییر شیب می‌دهد (**نقطه عطف** در بازوی پایین‌رونده) برابر زمان تمرکز حوضه خواهد بود (شکل ۱۳-۸). مثلاً درشکل ۱۳-۸ که‌بارانی به مدت ۳ ساعت روی حوضه نسبتاً بزرگ باریده است زمان وقوع اوج سیل ۵ ساعت بعد از شروع بارندگی و زمان تمرکز حوضه برابر با ۷ ساعت (۷ = ۳-۱۰) است و زمان وقوع اوج هیدروگراف نسبت به مرکز بارندگی ۳/۵ ساعت تأخیر دارد. رسم هیدروگراف‌های سیل از چند نظر حائز اهمیت است که در زیر به برخی از آنها اشاره شده است.

- از هیدروگراف می‌توان زمان شروع و پایان سیل را نسبت به آغاز بارندگی مشخص کرد.
- دبی اوج سیل و زمان وقوع آن از روی هیدروگراف قابل تشخیص است.
- شکل بازوی بالارونده و پایین روندهٔ هیدروگراف مشخص کنندهٔ چگونگی افزایش و فروکش کردن سیل است.
- حجم سیلاب را می‌توان از روی سطح زیر منحنی هیدروگراف محاسبه کرد.
- تداوم سیل برابر زمان پایهٔ هیدروگراف است (t_b).



شکل ۱۳-۸

● مثال ۱۳-۹

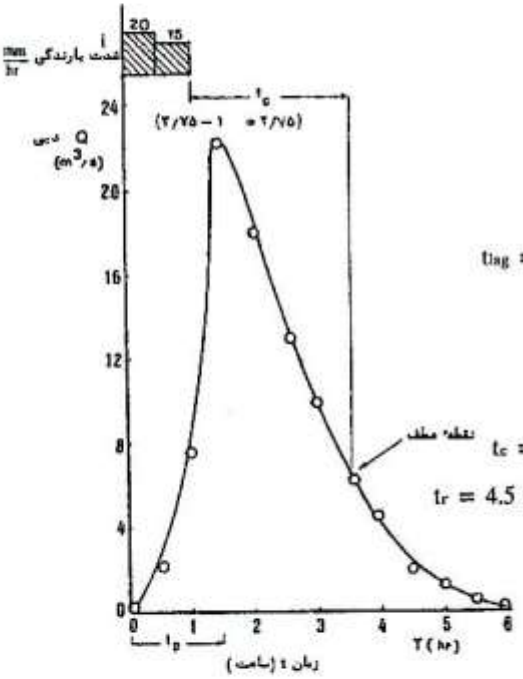
در یک رودخانهٔ دبی سیل در زمانهای مختلف اندازه‌گیری و ارقام زیر بدست آمده است.

t(ساعت)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
Q(مترمکعب در ثانیه)	0	3	8	23	18	13	10	7	5	3	2	1	0

این سیل ناشی از باران یک ساعته‌ای است که شدت بارندگی در نیم ساعت اول ۲۰ و در نیم ساعت بعد ۱۵ میلی‌متر در ساعت است. مشخصات سیل را به دست آورید. مساحت حوضه ۲۵ کیلومترمربع است.

حل

چنانچه دبی را نسبت به زمان در یک دستگاه محور مختصات رسم کنیم (شکل ۱۳-۹) هیدروگراف سیل به دست می‌آید. از روی هیدروگراف مشخصات سیل به شرح زیر قابل استخراج است:



- زمان شروع بارندگی $t = 0$ hr
- زمان شروع سیل $t = 0$ hr
- زمان خاتمهٔ بارندگی $t = 1$ hr
- زمان خاتمهٔ سیل $t = 6$ hr
- تداوم سیل $t_b = 6$ hr
- زمان تاخیر سیل $t_{lag} = (1.5 - 0.5 = 1)$ 1 hr
- زمان پایه هیدروگراف $t_b = 6$ hr
- زمان رسیدن به اوج $t_p = 1.5$ hr
- دبی اوج (حداکثر) $Q_{max} = 23\ m^3/sec$
- زمان تمرکز $t_c = 2.75$ hr $(3.75 - 1 = 2.75)$
- زمان فروکش کردن سیل $t_r = 4.5$ hr $(6 - 1.5 = 4.5)$

شکل ۱۳-۹

- حجم سیلاب با توجه به جدول ۱۳-۴ که از روی داده‌های هیدروگراف بدست آمده است معادل ۱۶۷۴۰۰ مترمکعب می‌باشد. در این جدول ستون اول زمان با دوره‌های نیم ساعته، ستون دوم دبی بر اساس هیدروگراف سیل، ستون سوم متوسط دبی در هر دوره است که از جمع کردن دبی‌هادر ابتدا و انتهای هر دوره و تقسیم آن بر دو به دست آمده‌است.

به عنوان مثال اگر دبی در شروع بارندگی صفر و نیم ساعت پس از آن ۳ مترمکعب در ثانیه باشد متوسط آن در طی این مدت ۱/۵ مترمکعب در ثانیه است. ارقام ستون چهارم حجم آبی است که در هر دوره از رودخانه می‌گذرد و از حاصلضرب دبی متوسط در زمان (نیم ساعت = ۱۸۰۰ sec) به‌دست آمده است. مثلاً در دوره پنجم حجم رواناب ۲۷۹۰۰ (۱۸۰۰ × ۱۵/۵) مترمکعب است.

با توجه به این که مساحت حوضه ۲۵ کیلومتر مربع است ارتفاع رواناب ناشی از این بارندگی ۰/۰۰۶۵ = (۱۰^۶ × ۲۵) : (۱۶۷۴۰۰) متر و یا ۶/۵ میلی‌متر است که اگر متوسط ارتفاع بارندگی را نیز ۱۷/۵ میلی‌متر ($\frac{۱۵ + ۲۰}{۲}$) در نظر بگیریم ملاحظه خواهد شد که $\frac{۶/۵}{۱۷/۵}$ یا ۳۷ درصد از بارندگی به رواناب تبدیل شده است. یعنی ضریب رواناب ۰/۳۷ بوده است.

جدول ۱۳-۴

1	2	3	4
t (hr)	دبی m^3/sec	متوسط دبی (m^3/sec)	حجم آب (m^3)
0	0		
0.5	3	1.5	2700
1	8	5.5	9900
1.5	23	15.5	27900
2	18	20.5	36900
2.5	13	15.5	27900
3	10	11.5	20700
3.5	7	8.5	15300
4	5	6	10800
4.5	3	4	7200
5	2	2.5	4500
5.5	1	1.5	2700
6	0	0.5	900

همانطور که گفته شد بازوی بالارونده هیدروگراف نمایه‌ای است که بستگی به خصوصیات فیزیکی و پوشش سطح حوضه و ویژگیهای بارندگی از قبیل شدت و مدت و یکنواختی آن دارد حال آنکه بازوی پایین‌رونده هیدروگراف بستگی به فرایندهای زهکشی و تخلیه آب از حوضه دارد. پس از آنکه هیدروگراف به نقطه اوج رسید ممکن است مدتی در این مرحله باقی مانده و یا بلافاصله شروع به نزول کند. پس از رسیدن دبی به اوج با قطع بارندگی ابتدا دبی سیل با شدت نسبتاً زیاد کاهش یافته اما پس از مدتی در منحنی بازوی پایین‌رونده هیدروگراف تغییر شیب یا

نقطه عطف ایجاد می‌شود. فروکش کردن سیل از این نقطه به بعد مستقل از خصوصیات بارش بوده و فقط بستگی به وضعیت زهکشی حوضه از نظر تخلیه آب زیرزمینی، روانابهای دیررس و زیرسطحی و خارج شدن آب نگهداشته شده در سطح حوضه دارد. این بخش از هیدروگراف را **منحنی فروکش** (ression curve) گویند. اگر دبی در نقطه‌عطف که شروع فروکش سیل است Q_0 باشد معادله منحنی فرونشینی که باآن بتوان دبی تخلیه رواناب را در هر زمان محاسبه کرد بصورت زیراست.

$$Q = Q_0 K^t \qquad (۲۰-۱۳)$$

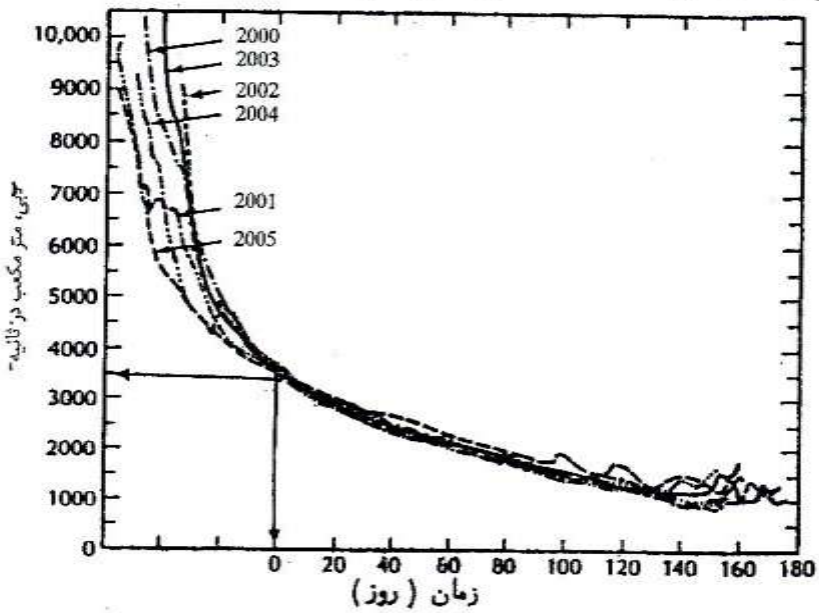
که در آن K نمایه وضعیت زهکشی حوضه، Q_0 دبی درزمان شروع فروکش سیل (نقطه عطف منحنی بازوی پایین رونده هیدروگراف) و t زمان از شروع فروکش سیل می‌باشد. با توجه به ثابت بودن K برای حوضه‌های آبریز معادله فوق را می‌توان بصورت نمایی زیر نیز نوشت

$$Q = Q_0 e^{-at} \qquad (۲۱-۱۳)$$

که در آن a ضریب مربوط به خصوصیات فیزیکی حوضه و e مبنای لگاریتم طبیعی است.

● مثال ۱۳-۱۰

بازوی پایین رونده هیدروگراف سالانه رودخانه‌ای در مدت ۶ سال پیاپی مطابق با شکل ۱۳-۱۰ بوده است. با توجه به این شکل ضریب ثابت a برای این حوضه را در رابطه با معادله فروکش سیل به‌دست آورید. دبی رودخانه ۴۰ روز پس از شروع فرونشینی چه مقدار پیش‌بینی می‌شود؟ در شکل ۱۳-۱۰ قسمت فرونشینی سیل در سالهای مختلف نشان داده شده است.



شکل ۱۳-۱۰ منحنی فروکش دبی سالانه

حل

$$Q = Q_o e^{-at}$$

$$e^{-at} = Q/Q_o$$

$$-at = \ln Q/Q_o$$

$$a = -\frac{1}{t} \ln \frac{Q}{Q_o}$$

از روی شکل ۱۳-۱۰ مقدار $Q_o = 3500\ m^3/sec$ (در زمان $t = 0$) و در زمان $t = 100$ مقدار دبی $Q = 1500\ m^3/sec$ می‌باشد لذا با داشتن این دو نقطه می‌توانیم a را محاسبه کنیم.

$$a = -\frac{1}{100} \ln \frac{1500}{3500} = 8.47 \times 10^{-3}$$

بنابراین معادلهٔ فرونشینی سیل در این رودخانه به صورت زیر است :

$$Q = Q_o e^{-at}$$

$$Q = 3500\ e^{-(8.47 \times 10^{-3})t}$$

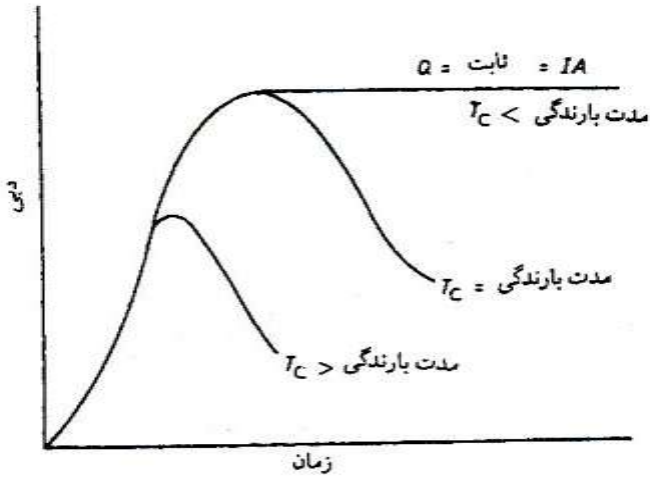
و پس از ۴۰ روز از شروع فرونشینی دبی عبارت خواهد بود از:

$$Q = 3500\ e^{-(8.47 \times 10^{-3})(40)}$$

$$Q = 2490\ m^3/sec$$

۱۳-۶ مجزا کردن هیدروگراف

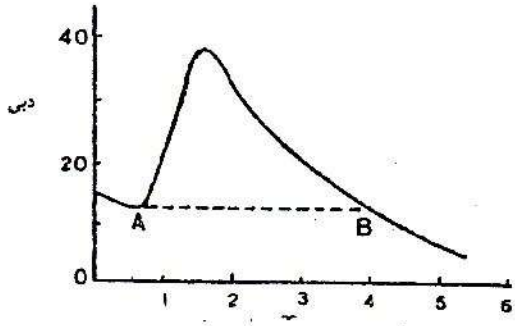
همان‌طور که گفته شد بسته به اینکه مدت بارندگی بزرگتر، مساوی و یا کوچکتر از زمان تمرکز باشد شکل هیدروگراف متفاوت خواهد بود که این حالت‌ها در شکل ۱۳-۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۳-۱۱ شکل هیدروگراف حوضه با فرض یکنواخت بودن بارش

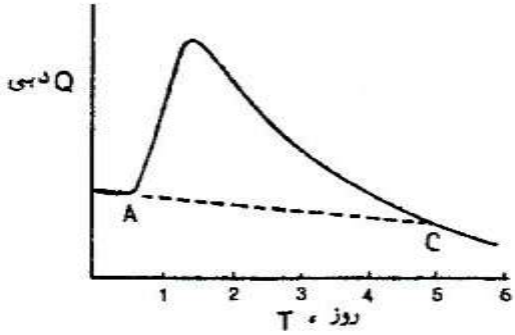
شکل مذکور فقط مربوط به هیدروگراف سیل می‌باشد اما اگر قبل از وقوع سیل جدید فرضاً در یک رودخانه به دلیل بارندگیهای قبلی آب در جریان باشد و یا این که حوضه در مرحله فروکش کردن سیل قبلی باشد و در این وضعیت بار دیگر بارندگی صورت گیرد رواناب جدید با دبی قبلی رودخانه مخلوط می‌شود و لذا بخشی از دبی رودخانه مربوط به رواناب قبلی است و اگر بخواهیم هیدروگراف سیل جدید را بدست آوریم لازم است ابتدا دبی قبلی رودخانه که بنام **دبی پایه** (base flow) نامیده می‌شود از آن کسر شود. این فرآیند را ***مجزا کردن یا جداسازی هیدروگراف*** (hydrograph separation) گویند و همانطور که گفته شد، منظور از مجزا کردن هیدروگراف جدا ساختن جریان پایه که معمولاً قبل از وقوع سیل در رودخانه جاری بوده از هیدروگراف است که در تحلیل هیدروگراف نباید آن را به حساب دبی سیل منظور کرد. با توجه به شکل ۱۳-۱۲ که در آن هیدروگرافی با جریان پایه رسم شده است می‌توان این دبی پایه را به سه روش ساده و معمول از هیدروگراف مجزا ساخت.

روش اول - ساده ترین روش برای جدا کردن دبی پایه آن است که در هیدروگراف رودخانه از نقطه‌ای که سیل شروع می‌شود (A) یک خط مستقیم به نقطه‌ای که سیل خاتمه پیدا می‌کند (B) رسم کنیم بخشی از هیدروگراف که بالای خط AB قرار گیرد هیدروگراف رواناب مستقیم است. معمولاً خط AB که ابتدا وپایان سیل را بهم وصل می‌کند یک خط شیبدار خواهد بود ولی چنانچه نقطه پایان سیل یعنی B مشخص نباشد و نتوان آن را به دقت تعیین کرد از نقطه‌ای که هیدروگراف شروع به افزایش می‌کند (A) یک خط مستقیم و افقی رسم می‌شود تا مؤلفه پایین‌روندهٔ هیدروگراف را در نقطه B قطع کند. بخشی از هیدروگراف که در بالای این خط افقی (AB) قرار می‌گیرد هیدروگراف سیل است که می‌توان آن را روی کاغذ دیگری بطور مجزا رسم کرد و آنچه در پایین خط واقع می‌شود دبی پایه رودخانه خواهد بود زیرا در این جا فرض شده است که دبی پایه در طول سیل ثابت باقی بماند. مثلاً در شکل ۱۳-۱۲ دبی پایه حدود ۱۲/۵ مترمکعب در ثانیه است، لذا از تمام دبی‌ها باید رقم ۱۲/۵ به عنوان دبی پایه کسر شود. بطور ساده در این روش دبی رودخانه قبل از شروع سیل به عنوان دبی پایه در نظر گرفته می‌شود



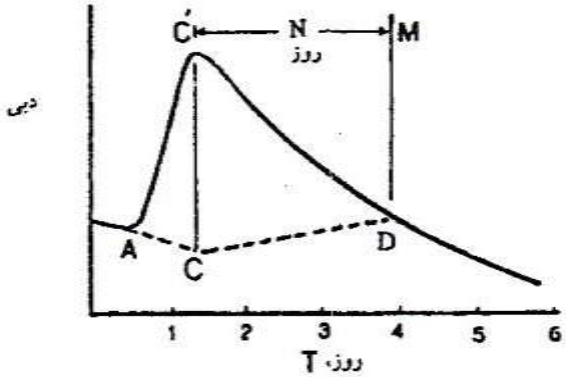
شکل ۱۳-۱۲ تجزیهٔ هیدروگراف (نقطه A شروع و نقطه B پایان سیل است. اگر نقطه B نامشخص باشد خط AB افقی رسم می‌شود.)

اما غالباً دبی پایه قبل از شروع سیل با همان شیبی که قبلاً داشته است با یک خط مستقیم ادامه داده می‌شود تا مؤلفه پایین‌رونده را در نقطه‌ای قطع نماید. بخشی از منحنی که در بالای این خط (AC در شکل ۱۳-۱۳) قرار می‌گیرد به‌عنوان هیدروگراف سیل محسوب می‌شود. در این روش برخلاف حالت قبل که دبی پایه در طول تداوم سیل ثابت فرض شده بود بتدریج و با شیبی که قبلاً داشته است کاهش می‌یابد. ولی مشکلی که اکثراً پیدا می‌شود این است که چون شیب خط دبی پایه قبل از شروع سیل معمولاً تند است اگر آن را بهمان صورت ادامه دهیم ممکن است هیچ وقت بازوی پائین رونده هیدروگراف را قطع نکند در این صورت بهتر خواهد بود که برای جداکردن هیدروگراف از این شیوه استفاده نشود.



شکل ۱۳-۱۳ تجزیهٔ هیدروگراف (خط AC با شیب قبلی خود رسم شده است)

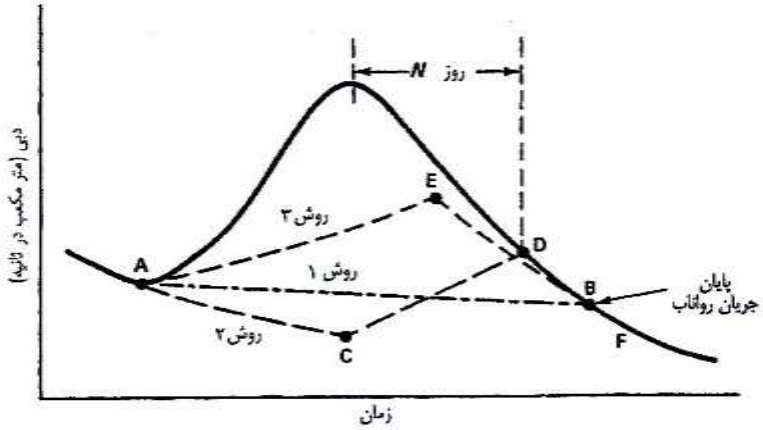
روش دوم - در این روش ابتدا هیدروگراف در یک دستگاه محور مختصات طوری رسم می‌شود که محور زمان بر حسب روز مدرج شده باشد. سپس دبی پایه با همان شیبی که قبل از شروع سیل داشته است مطابق آنچه گفته شد ادامه می‌یابد تا خط عمودی را که از نقطهٔ اوج هیدروگراف بطرف پایین‌اخراج شده است در نقطهٔ C قطع کند (شکل ۱۳-۱۴). از نقطهٔ اوج یک خط افقی نیز اخراج کرده و درروی آن طولی راکه معادل $N = 0.83\ A^{0.2}$ روز باشد مشخص کنید (A مساحت حوضه حسب کیلومترمربع است و N برحسب روز و مشابه مقیاس محور افقی هیدروگراف می‌باشد). حال از نقطهٔ انتهایی این خط (M) عمود دیگری به سمت پایین اخراج می‌شود تا بازوی پایین‌رونده هیدروگراف را در D قطع کند از نقطهٔ C به D وصل کنید. بخشی از هیدروگراف که در بالای خط ACD قرار گیرد هیدروگراف سیل و آنچه در پایین آن قرار می‌گیرد دبی پایهٔ رودخانه محسوب می‌شود. در این‌جا توجه شود که چون N برحسب روز است محور افقی هیدروگراف نیز باید با همان واحد روز مدرج شده باشد. اگر محور افقی بر حسب واحد اندازه‌گیری مثلاً ساعت باشد ابتدا N را بر حسب روز محاسبه کنید و سپس با توجه به مقیاسی که در محور طول‌ها برای ساعت در نظر گرفته‌اید طول N را نیز بر حسب ساعت بدست آورید.



شکل ۱۳-۱۴ تجزیهٔ هیدروگراف (روش دوم)

روش سوم – در این روش قسمت انتهای بازوی پائین رونده هیدروگراف را با یک خط مستقیم و با همان شیبی که کاهش می‌یافته است بطرف بالا (عقب) امتداد می‌دهیم. سپس از نقطه عطف بازوی پایین رونده هیدروگراف یک خط عمودی به سمت پایین رسم می‌کنیم تا این خط را در نقطه‌ای مانند E (شکل ۱۳-۱۵) قطع کند. حال اگر از نقطه شروع هیدروگراف (A) و نقطه پایان هیدروگراف (B) به این نقطه (E) وصل کنیم وضعیتی مشابه آنچه در شکل ۱۳-۱۵ دیده می‌شود بوجود خواهد آمد. بخشی از هیدروگراف که در بالای AEB قرار دارد بعنوان هیدروگراف سیل که از دبی پایه مجزا شده است در نظر گرفته می‌شود.

انتخاب روش برای مجزاکردن دبی پایه از هیدروگراف بستگی به داده‌های موجود و دقت مورد نظر دارد. با این وجود در اکثر کارهای هیدرولوژی دبی پایه مقدار ثابتی درنظر گرفته می‌شود که در واقع همان روش اول می‌باشد.



شکل ۱۳-۱۵ روشهای مجزا کردن دبی پایه از هیدروگراف

● مثال ۱۳-۱۱

در یک حوضه آبریز به وسعت $6500\ km^2$ بارانی به مدت ۱۲ ساعت رخ داده و اندازه‌گیری دبی در محل خروجی حوضه طی مدت ۱۵ ساعت به صورت جدول‌زیر (۱۳-۵) بوده است:

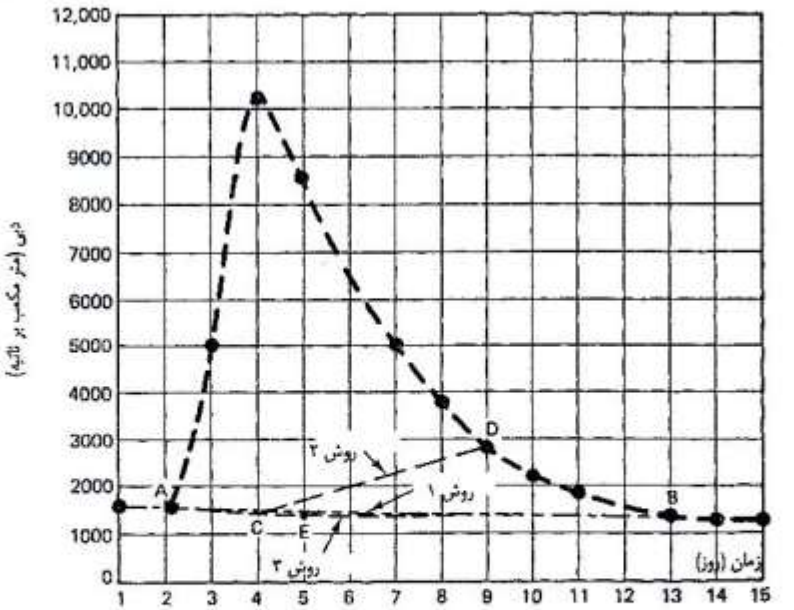
جدول ۱۳-۵

زمان (روز)	دبی (m^3/sec)	زمان (روز)	دبی (m^3/sec)
1	1600	9	2800
2	1550	10	2200
3	5000	11	1850
4	11300	12	1600
5	8600	13	1330
6	6500	14	1300
7	5000	15	1280
8	3800		

با روشهای مختلف دبی پایه را جدا و هیدروگراف جریان مستقیم را بدست آورید.

حل

در یک دستگاه محور مختصات قائم هیدروگراف سیل رسم (شکل ۱۳-۱۶) و مشابه آنچه در بخشهای قبل گفته شد نقاط A، B، C، D و E به روشهای سه‌گانه جداکردن دبی پایه‌مشخص شده‌اند. در روش اول A و B با یک خط مستقیم شیبدار بهم وصل شده‌اند. نقطه A شروع سیل



شکل ۱۳-۱۶ جداکردن دبی پایه در مثال ۱۳-۱۰

و نقطه B پایان سیل است که بصورت چشمی از روی هیدروگراف تشخیص داده شده است. در روش دوم نقطه C در زیر قله هیدروگراف تعیین گردیده و مقدار N که بر اساس آن نقطه D بدست آمده است برابر ۵ روز بوده است زیرا:

$$N = 0.83(A)^{0.2}$$

$$N = 0.83(6500)^{0.2} \approx 5 \text{ days}$$

در روش سوم نقطه عطف بازوی پایین‌رونده هیدروگراف را مشخص کرده (که تقریباً ۵ ساعت پس از شروع بارندگی است) و نقطه E زیر آن قرار می‌گیرد. با توجه به این سه روش نتایج دبی مستقیم سیل مطابق جدول ۱۳-۶ می‌باشد.

جدول ۱۳-۶ مجزا کردن دبی پایه با روشهای مختلف

زمان (روز)	رواناب، متر مکعب در ثانیه		
	روش ۱	روش ۲	روش ۳
1	0	0	0
2	0	0	0
3	3480	3520	3500
4	9800	9900	9850
5	7150	6900	7200
6	5050	4550	5100
7	3550	2700	3600
8	2400	1250	2400
9	1420	0	1420
10	820	0	820
11	470	0	470
12	250	0	250
13	0	0	0

دبی پایه رودخانه یا به دلیل رواناب ناشی از ذوب برفهاست و یا به دلیل رواناب دیررس و تغذیه رودخانه توسط آبهای زیر زمینی. رودخانه‌ها برحسب این که دبی پایه آنها در طی سال چگونه باشد طبقه‌بندی می‌شود. برای این منظور معمولاً منحنی تداوم جریان رسم و از روی آن وضعیت رودخانه مشخص می‌گردد.

۱۳-۷ منحنی تداوم جریان

یکی‌ازپارامترهای‌مهم‌درهیدرولوژی منحنی *تداوم جریان* یا *دبی کلاسه* در رودخانه است. این منحنی از رسم دبی رودخانه نسبت به زمان (تجمعی) به دست می‌آید. مثلاً اگر متوسط دبی در هر روز از سال برای ۳۶۵ روز مطابق جدول ۱۳-۷ در اختیار باشد (ستون ۲) و این دبی‌ها را به

جدول ۱۳-۷

شماره روزها	متوسط دبی روزانه m^3/sec	متوسط دبی روزانه به ترتیب نزولی
1	2	3
1	57	820
2	42	810
3	182	800
4	520	780
5	680	750
6	820	700
7	810	680
8	750	610
9	610	520
10	520	520
-	-	-
-	-	-
-	-	-
-	-	-
-	-	-
-	-	-
-	-	-
-	-	-
-	-	-
-	-	-
364	42	5
365	47	4

ترتیب نزولی در ستون سوم قرار دهیم می‌توانیم تغییرات دبی (ستون ۳) و زمان تجمعی را (ستون ۱) در دستگاه محور مختصات رسم کنیم که نمودار آن در شکل ۱۳-۱۷ نشان داده شده است.

هر یک از نقاط منحنی ۱۳-۱۷ نشان دهندهٔ تعداد روزهایی از سال است که دبی رودخانه مساوی یا بیشتر از مقدار دبی مربوط به آن روز بوده است. مثلاً ۵۰۰ مترمکعب در ثانیه مربوط به ۴۵ روز است یعنی در ۴۵ روز از سال دبی رودخانه مساوی یا بیشتر از ۵۰۰ مترمکعب در ثانیه است. باتوجه‌به این منحنی می‌توان پارامترهای زیر را به عنوان مشخصهٔ رودخانه به دست آورد.

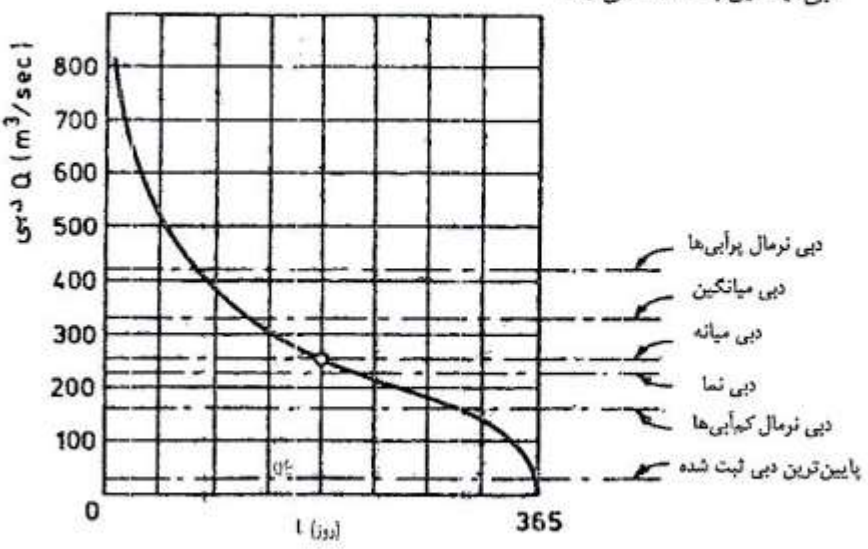
(۱)- **دبی نرمال در حالت پرآبی**: مقدار جریانی است که در $\frac{۱}{۴} \times ۳۶۵ = ۹۱$ روز از سال دبی مساوی یا بالاتر از آن باشد.

(۲)- **دبی نرمال در حالت کم‌آبی**: مقدارجریانی است که در $\frac{۳}{۴} \times ۳۶۵ = ۲۷۴$ روز از سال دبی رودخانه مساوی یا بالاتر از آن است.

(۳)- **دبی عادی** (normal): مقدار جریانی است که نیمی از روزهای سال یعنی $\frac{۱}{۲} \times ۳۶۵ = ۱۸۲$ روز دبی مساوی یا بالاتر از آن است.

(۴)- **دبی میانگین** (mean): مقدار جریانی است که از حاصل‌جمع حجم آبی که از رودخانه عبور می‌کند و تقسیم آن بر زمان عبور $(\frac{\Sigma V}{t})$ به‌دست می‌آید. مثلاً اگر حجم کل آب‌رودخانه در سال (m^3) را بر $۳۶۵ \times ۸۶۴۰۰ = ۳۱۵۳۶۰۰۰$ ثانیه تقسیم کنیم

دبی میانگین به دست می‌آید.



شکل ۱۳-۱۷ نمونه‌ای از منحنی تداوم جریان (دبی کلاسه)

(۵)- **دبی میانه** (median): اگر دبی هر روز را به ترتیب نزولی ردیف کنیم متوسط دبی در روزهای ۱۸۲ و ۱۸۳ دبی میانه خواهد بود.

(۶)- **دبی نما** (mode): مقدار جریان یا محدوده‌ای از دبی است که بالاترین فراوانی وقوع را در طول سال داشته باشد.

بدست آوردن منحنی تداوم جریان طی سالهای آماری طولانی (مثلاً ۲۰ سال یا بیشتر) این امکان را به دست می‌دهد که بتوان روی داده‌ها تحلیل آماری انجام داده و چنین منحنیهایی را برای دوره‌های برگشت مختلف رسم نمود. در بسیاری موارد بجای این که روی محور افقی تعداد روزها را مشخص کنیم احتمالات تجمعی وقوع داده‌ها منظور می‌شود.

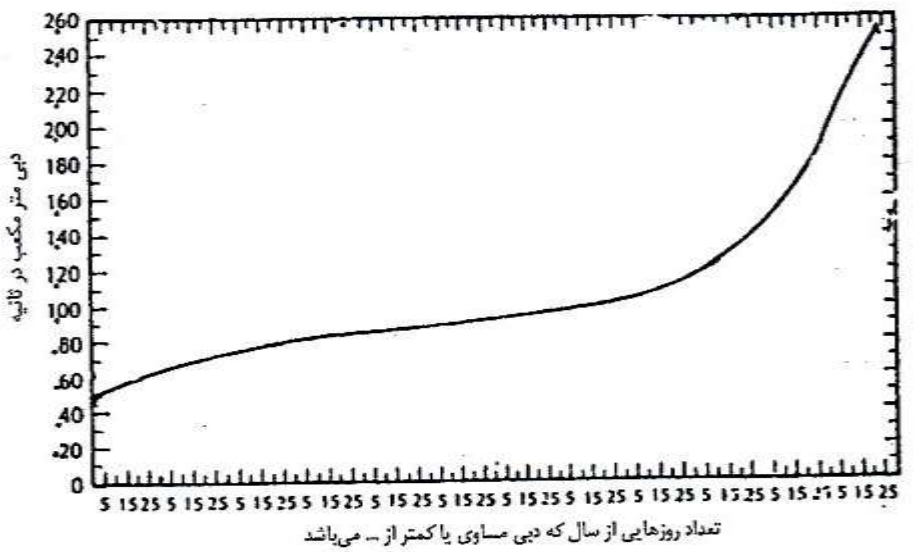
بعنوان مثال متوسط دبی رودخانه‌ای را در ۳۶۵ روز از سال بررسی نموده و فراوانی وقوع آنها را در گروههای مختلف دبی که در ستون اول جدول ۱۳-۸ نوشته شده است بررسی کرده‌ایم. اگر تعداد روزهای مشاهده شده مطابق ستون دوم باشد فراوانی تجمعی و احتمال وقوع آنها به ترتیب در ستونهای ۳ و ۴ نوشته شده است. حال چنانچه در یک کاغذ احتمالات اعداد ستون ۴ را نسبت به ستون ۱ (حدوسط گروهها) رسم کنیم منحنی تداوم جریان به دست می‌آید. در شکل ۱۳-۱۸ منحنی تداوم جریان روزانه یک رودخانه بصورت معمولی رسم شده است. بطوری مشاهده می‌شود مثلاً فقط ۱۰ درصد موارد (۳۶ روز سال) ممکن است دبی این رودخانه از ۷۰۰ لیتر در ثانیه کمتر باشد و یا این که در ۷۵ درصد موارد (۲۷۳ روز از سال) متوسط دبی روزانه

کمتر از یک متر مکعب در ثانیه است. در جدول ۱۳-۸ بالاترین فراوانی مربوط به گروه ۲۹۹/۹-۲۰۰ است،

جدول ۱۳-۸ گروه‌بندی دبی رودخانه

گروه‌بندی دبی‌ها m^3/sec	تعداد روزهای وقوع	فراوانی تجمعی	احتمال*
1	2	3	4
0-99.9	62	62	16.9
100-199.9	73	135	36.8
200-299.9	105	240	65.5
300-399.9	25	265	72.4
400-499.9	44	309	84.4
500-599.9	20	329	89.8
600-699.9	15	344	93.9
700-799.9	12	356	97.2
800-899.9	6	362	98.9
900-999.9	3	365	99.72

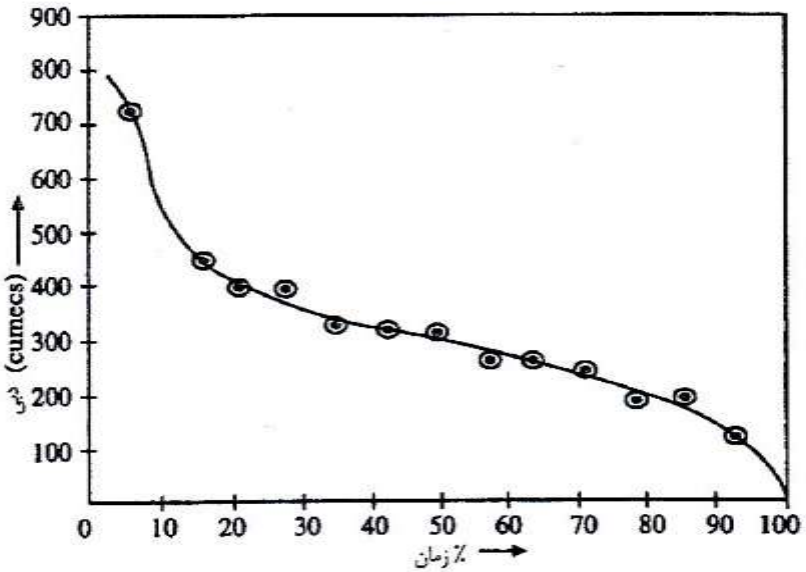
* احتمال از فرمول $\frac{m}{n+1}$ محاسبه شده است m شماره ردیف فراوانی و n تعداد کل روزها (۳۶۵) است مثلاً برای فراوانی ۲۶۵ در ردیف چهارم بصورت $\frac{۲۶۵}{۳۶۵+۱}$ محاسبه شده است.



شکل ۱۳-۱۸ منحنی تداوم جریان. تعداد روزهای سال در محور افقی ۳۶۵ روز می‌باشد که با درجه‌بندی ۱۰ روزه برای هر ماه (۵ و ۱۵ و ۲۵ روز آن) مشخص شده‌اند.

لذا متوسط این گروه (۲۵۰ مترمکعب در ثانیه) به عنوان دبی نمای رودخانه نامیده می‌شود.

منحنی تداوم جریان یا دبی کلاس‌بندی شده و تعیین دبی‌های شاخص (مانند دبی‌عادی ، دبی میانه ، دبی نرمال) در برنامه‌ریزی‌های آب رودخانه جهت استفاده‌های شرب و یا احداث بندهای انحرافی برای استفاده درکشاورزی حائز اهمیت بوده وباید در هر طرح هیدرولوژی برای رودخانه‌هاانجام‌شود. مثلا اگر قرار باشد از آب رودخانه برای کشاورزی استفاده شود از روی این منحنی می‌توان الگو وتراکم کشت را مشخص کرد و یا در استفاده از آب برای مصارف شهری کمبودها و مازاد آب را برآورد و به ذخیره‌سازی آب در مواقع مازاد اقدام کرد. برای این منظور منحنی دبی کلاسه غالباً مطابق شکل ۱۳-۱۹ بصورت تغییرات دبی نسبت به درصدی از زمان که دبی برابر یا بیشتر از مقدار مورد نظر می‌باشد رسم می‌گردد. مثلاً در شکل ۱۳-۱۹ مشاهده می‌گرددکه در ۳۰ درصد ایام سال (۱۱۰ روز از سال) دبی رودخانه ۳۵۰ متر مکعب در ثانیه یا بیشتر است و یا در ۷۰ درصد ایام سال (۲۵۵ روز) دبی رودخانه از ۲۵۰ متر مکعب در ثانیه بیشتر می‌باشد.



شکل ۱۳-۱۹ تیپ منحنی تداوم جریان

توجه شودکه در شکل ۱۳-۱۹ در محور افقی بجای درصد ایام سال (100-0) می‌توان تعداد روزهای سال (360-0) را قرار دادو یا محور عمودی بر عکس اعداد را از زیاد به کم نوشت که در این صورت منحنی بر عکس خواهدشد.

مسائل

۱۳-۱ مقدار دبی در یک رودخانه در ساعات مختلف اندازه‌گیری شده است. در بین ساعات اندازه‌گیری که در جدول زیر نشان داده شده است سیلی به وقوع پیوسته است. هیدروگراف سیل را به سه روشی که قبلاً ذکر شد تجزیه کنید و هیدروگراف مجزا شدهٔ سیل را در سه حالت رسم نمایید. مساحت حوضه ۱۰ کیلومترمربع است.

زمان ساعت	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
دبی (m^3/s)	18	16	14	35	32	25	20	18	15	13	10	8	5	3

۱۳-۲ متوسط دبی‌های روزانه یک رودخانه را در گروههای زیر دسته‌بندی و تعداد روزهایی که دبی در هر گروه قرار می‌گیرد در جدول زیر مشخص شده است. منحنی تداوم جریان را برای این رودخانه رسم کنید.

دبی، m^3/sec	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80
تعداد روزها	32	43	125	80	42	17	21	5

۱۳-۳ زمان تمرکز در یک حوضه کمتر از مدت بارندگی است آیا رواناب محاسبه شده با روش استدلالی:

الف - کمتر از دبی اوج رواناب خواهد بود.

ب - در دبی اوج ثابت خواهد شد.

ج - مساوی دبی رودخانه خواهد بود.

د - محسوس نمی‌باشد.

(جواب - ب)

۱۳-۴ در روش استدلالی ضریب رواناب برابر است با:

الف - کمتر از یک

ب - یک

ج - بیشتر از یک

د - هیچکدام

(جواب - الف)

۱۳-۵ اگر زمان تمرکز بیشتر از مدت بارندگی باشد. با روش استدلالی:

الف - می‌توان حجم رواناب را محاسبه کرد.

ب - می‌توان دبی رواناب را محاسبه کرد.

ج - می‌توان دبی اوج رواناب را محاسبه کرد.

د - نمی‌توان دبی اوج رواناب را محاسبه کرد.

(جواب - د)

منابع برای مطالعه بیشتر

1- Chow, V.T., *Hand book of applied hydrology,* McGraw Hill, New York, 1964.
2- Fetter, C., *Applied hydrogeology,* Merrill Book Co. Columbus, Ohio, 1982.
3- Kinori, B.Z. and J. Mevorach, *Stream flow,* Dover., N. Y. Surface drainage Engineering volume 11, Elsevier, New York, 1964.
4- Nedeco, P., *River studies,* North Holland, Amsterdam, 1959.
5- Nemec, J., *Engineering hydrology,* McGraw Hill, London, 1964.
6- Raudkivi, A. J., *Hydrology,* Pergamon press, London, 1979.
7- Show, E., *Hydrology in practice,* Van Nostrand Reinhold. London, UK, 1988.