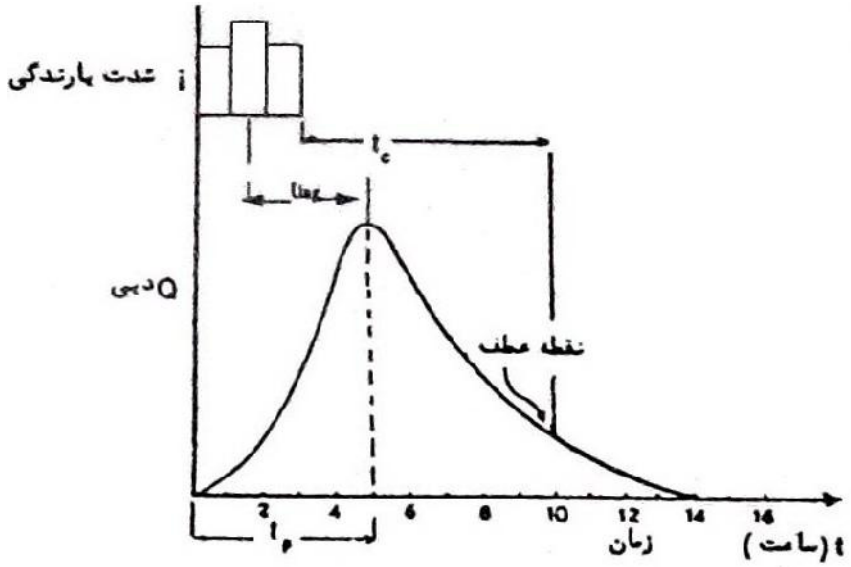
مثلا در نمودار ۵-۸ ،با باراش به مدت ۳ ساعت روی حوضه نسبتا بزرگ، زمان وقوع اوج سیل ۵ ساعت بعد از شروع بارش و زمان تمرکز حوضه برابر با ۷ ساعت (۷=۳-۱۰) است که زمان وقوع اوج هیدروگراف نسبت به مرکز بارش ۳/۵ ساعت تاخیر دارد. رسم هیدروگراف‌های سیل از چند نظر حائز اهمیت بوده که به برخی از آن ها اشاره می شود.

- از هیدروگراف می‌توان زمان شروع و پایان سیل را نسبت به آغاز بارش 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)



t = زمان
i = شدت بارش
t_c = زمان تمرکز
t_p = زمان رسیدن به اوج
t_b = زمان پایه هیدروگراف
t_{lag} = زمان تاخیر
t_r = زمان فروکش کردن سیل
Q = دبی

نمودار ۵-۸

مثال ۵-۹: در یک رودخانهٔ دبی سیل در زمان های مختلف اندازه گیری و ارقام زیر بدست آمده است.

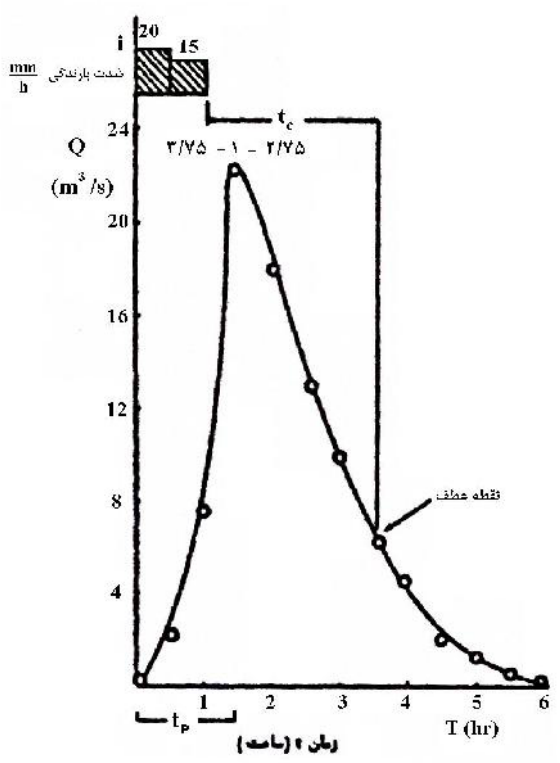
t (ساعت)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
Q(متر مکعب در ثانیه	0	3	8	23	18	13	10	7	5	3	2	1	0

این سیل ناشی از بارش یک ساعته ای است که شدت بارش در نیم ساعت اول ۲۰ و در نیم ساعت بعد۱۵ میلی‌متر در ساعت است. مشخصات سیل را بدست آورید. مساحت حوضه ۲۵ کیلومتر مربع است.

حل: چنانچه دبی را نسبت به زمان در یک دستگاه محور مختصات رسم کنیم (نمودار ۵-۹) هیدروگراف سیل بدست می‌آید. از روی هیدروگراف مشخصات سیل به شرح زیر قابل استخراج است:

حجم سیلاب با توجه به جدول ۵-۶ که از روی داده‌های هیدروگراف بدست آمده است معادل ۱۶۷۴۰۰ مترمکعب است. 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 تجمیع دبی‌ها در ابتدا و انتهای هر دوره و تقسیم آن بر دو به دست آمده است.

برای مثال، اگر دبی در شروع بارش صفر و نیم ساعت پس از آن ۳ m^3/s باشد متوسط آن در طی 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 مدت (نیم ساعت = ۱۸۰۰ sec) به دست می آید. مثلا در دوره پنجم حجم رواناب ۲۷۹۰۰ (۱۸۰۰ × ۱۵/۵) m^3 است.



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

نمودار ۵-۹

به دلیل این که مساحت حوضه ۲۵ کیلومترمربع است ارتفاع رواناب ناشی از این بارش $(167400)/(25\times10^6) == 0.0065$ متر و یا ۶/۵ mm است که اگر متوسط ارتفاع بارش را نیز $(20+15)/2=17.5$ mm فرض شود، ملاحظه می شود که 6.5/17.5 یا ۳۷ درصد بارش به رواناب تبدیل می شود. یعنی ضریب رواناب ۰/۳۷ است.

همانطور که گفته شد بازوی بالا رونده هیدروگراف نمایه ایست که بستگی به خصوصیات هندسی، فیزیکی، پوشش سطح حوضه و ویژگی‌های بارش از قبیل شدت و مدت و یکنواختی آن دارد. حال آنکه بازوی پایین رونده هیدروگراف بستگی به فرایندهای زهکشی و تخلیه آب از حوضه دارد. پس از به نقطه اوج رسیدن هیدروگراف ممکن است مدتی در این مرحله

باقی مانده و یا بلافاصله شروع به نزول کند. پس از رسیدن دبی به نقطه اوج یا قطع بارش ابتدا دبی سیل با شدت نسبتا زیاد کاهش یافته اما پس از مدتی در منحنی بازوی پایین رونده هیدروگراف تغییر شیب یا نقطه عطف ایجاد می‌شود. فروکش سیل از این نقطه به بعد مستقل از خصوصیات بارش بوده و فقط بستگی به وضعیت زهکشی حوضه از نظر تخلیه آب زیر زمینی، رواناب های دیررس و زیر سطحی و خارج شدن آب نگهداشته شده در سطح حوضه دارد.

جدول ۵-۶

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

این بخش از هیدروگراف را منحنی فروکش (recession curve) نامند. اگر دبی در نقطهٔ عطف یا نقطه شروع فروکش Q_0 باشد، معادله بازوی فروکش منحنی (برای برآورد دبی تخلیه رواناب در هر زمان) را می توان به صورت زیر نوشت.

$$Q = Q_0 K^t \qquad (۱۵-۵)$$

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

$$Q = Q_0 e^{-at} \qquad (۱۶-۵)$$

که در آن a ضریب مربوط به خصوصیات فیزیکی حوضه (برحسب معکوس زمان) و e مبنای لگاریتم طبیعی است.

مثال ۵-۱۰: بازوی پایین رونده هیدروگراف سالانه رودخانه ای در مدت ۶ سال پیاپی مطابق با نمودار ۵-۱۰ بوده است. با توجه به این نمودار مطلوب است ضریب ثابت a برای این حوضه (معادله فروکش). دبی رودخانه ۴۰ روز پس از شروع فروکش چه مقدار پیش‌بینی می‌شود؟ در نمودار ۵-۱۰ قسمت فروکش سیل در سالهای مختلف نشان داده شده است.

حل:

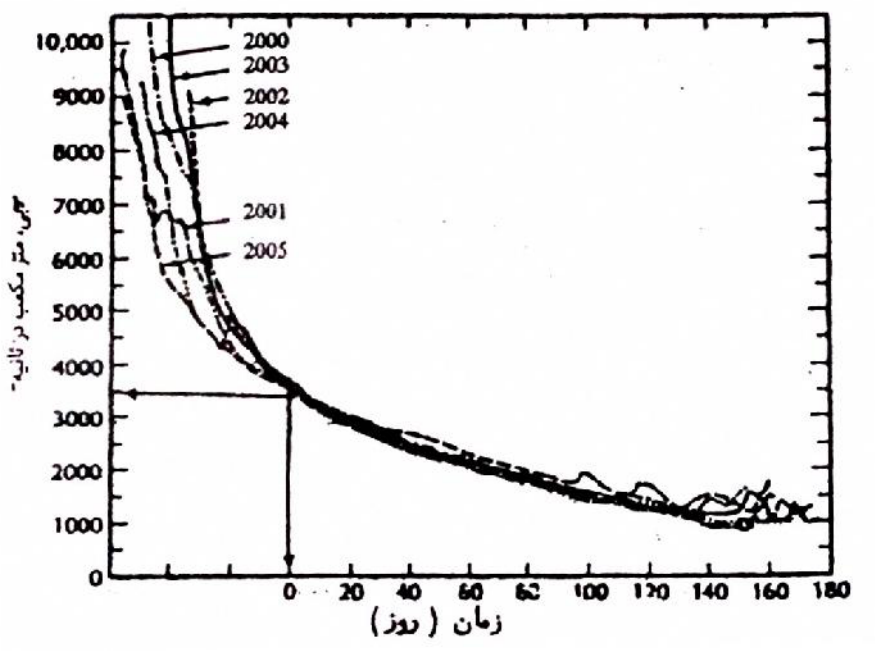
$$Q = Q_0 e^{at} \quad , \quad e^{-at} = Q/Q_0 \quad , \quad -at = \ln Q/Q_0 \quad , \quad a = -\frac{1}{t}\ln\frac{Q}{Q_0}$$

از روی نمودار ۵-۱۰ مقدار $Q_0 = 3500\,m^3/sec$ (زمان t=0) و در زمان t=100 مقدار دبی $Q = 1500\,m^3/sec$ است. لذا با داشتن این دو نقطه a را برآورد می شود.

$$a = -\frac{1}{100}\ln\frac{1500}{3500} = 8.47\times10^{-3}$$

بنابراین معادلهٔ فروکش سیل در این رودخانه به این صورت می شود: $Q = Q_0 e^{-at}, \quad Q = 3500\, e^{-(8.47\times10^{-3})t}$

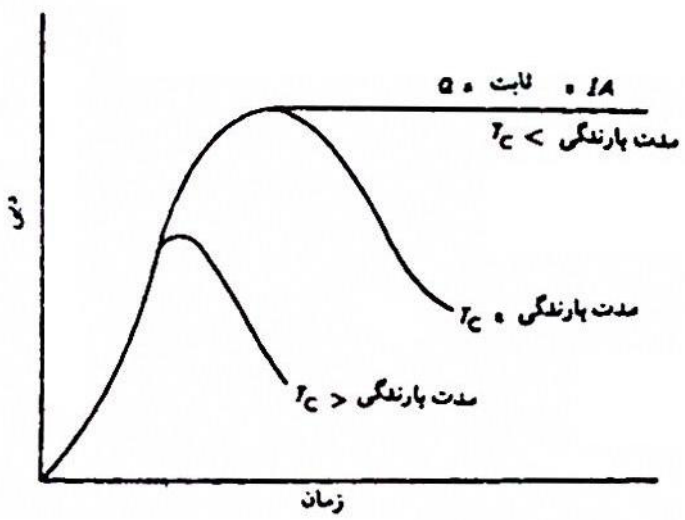
و پس از ۴۰ روز از شروع فروکش، دبی می شود: $Q = 3500\, e^{-(8.47\times10^{-3})(40)}$, $Q = 2400\, m^3/s$



نمودار ۵-۱۰ منحنی فروکش دبی سالانه

۵-۵ تجزیه هیدروگراف سیلاب مشاهداتی به رواناب مستقیم و جریان پایه

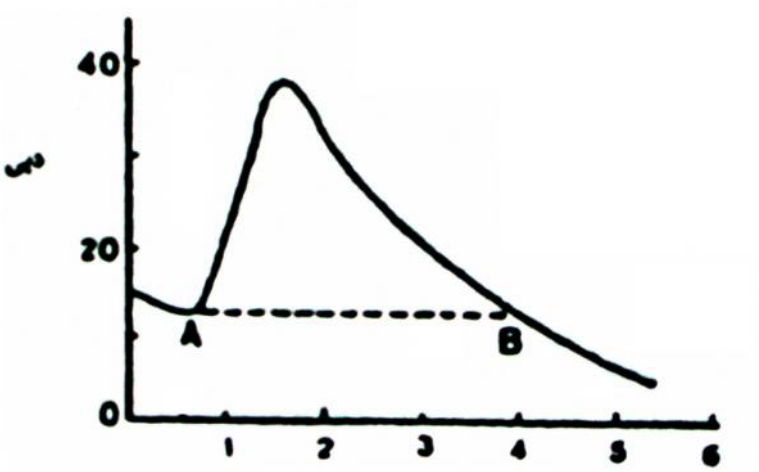
بسته به بیشتر، مساوی و یا کمتر بودن مدت بارش از زمان تمرکز، شکل هیدروگراف حاصل متفاوت است (نمودار ۵-۱۱).



نمودار ۵-۱۱ شکل هیدروگراف حوضه با فرض ثابت بودن شدت بارش

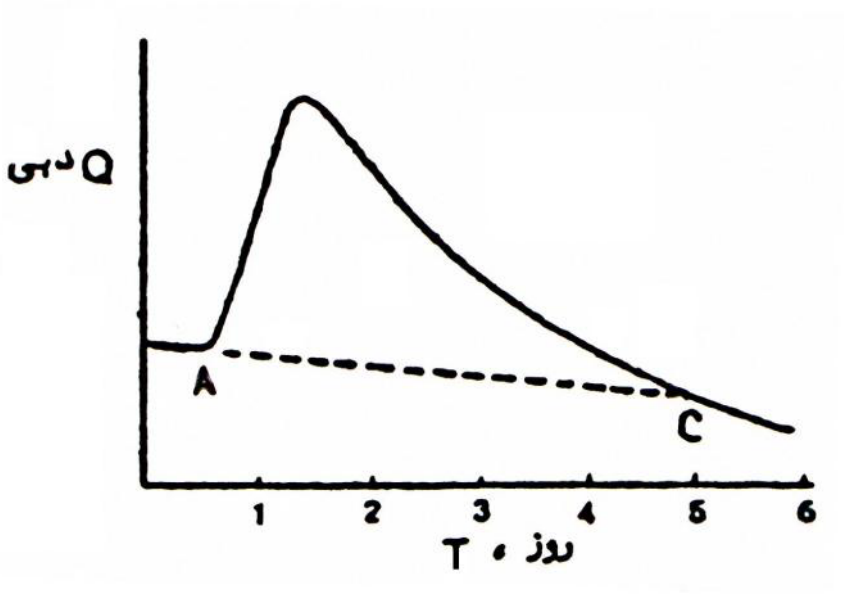
این هیدروگراف فقط مربوط به بارش اخیر است. اما اگر قبل از وقوع بارش جدید، رودخانه به دلیل بارش های قبلی آبدار (رودخانه در مرحله تخلیه سیل قبلی) باشد، هیدروگراف رودخانه جمع رواناب ناشی از بارش جدید و بارش قبلی می‌شود. لذا همواره بخشی از دبی رودخانه مربوط به بارش های قبلی است که اگر هدف برآورد هیدروگراف سیل رودخانه ناشی از فقط بارش جدید باشد لازم است دبی قبلی رودخانه (بنام دبی یا جریان پایه یا base flow) از آن کسر شود. این فرایند را جدا سازی یا تجزیه هیدروگراف (hydrograph separation) گویند و منظور از آن جدا ساختن جریان پایه (جریان موجود در رودخانه ناشی از بارش های قبلی) از هیدروگراف کل سیلاب مشاهداتی در رودخانه است. به عبارت دیگر، در تجزیه هیدروگراف سیلاب مشاهداتی، قسمتی مربوط به بارش های قبلی (جریان پایه) و بقیه ناشی از بارش سیلاب زای اخیر (بنام رواناب مستقیم) است. بطورکلی، دبی پایه را به سه روش زیر می توان از کل هیدروگراف مشاهداتی جدا کرد. طبیعی است جداسازی در رودخانه های خشک بی معنی است زیرا هیدروگراف مشاهداتی برابر است با رواناب مستقیم.

روش اول- ساده ترین روش برای جدا کردن دبی پایه هیدروگراف رودخانه، ترسیم یک خط افقی از نقطه ی شروع طغیان آب (A) تا محل تقاطع با بازوی فروکش (B) است. بخشی از هیدروگراف بالای خط AB هیدروگراف رواناب مستقیم نام دارد. معمولا خط AB که ابتدا و پایان سیل را به هم وصل می‌کند یک خط شیبدار است که با مشخص نبودن نقطه پایان سیل یعنی B خط افقی رسم می شود. آنچه در پایین خط AB واقع می‌شود دبی یا جریان پایه رودخانه نام دارد. در این جا فرض می شود دبی پایه در طول سیل ثابت باقی می‌ماند. مثلا در نمودار ۵-۱۲ دبی پایه حدود ۱۲/۵ متر مکعب در ثانیه است. لذا از تمام دبی‌ها باید رقم ۱۲/۵ به عنوان دبی پایه کسر شود تا هیدروگراف رواناب مستقیم بدست آید. بطور خلاصه، در این روش دبی رودخانه قبل از شروع سیل به عنوان دبی پایه در نظر گرفته می‌شود.



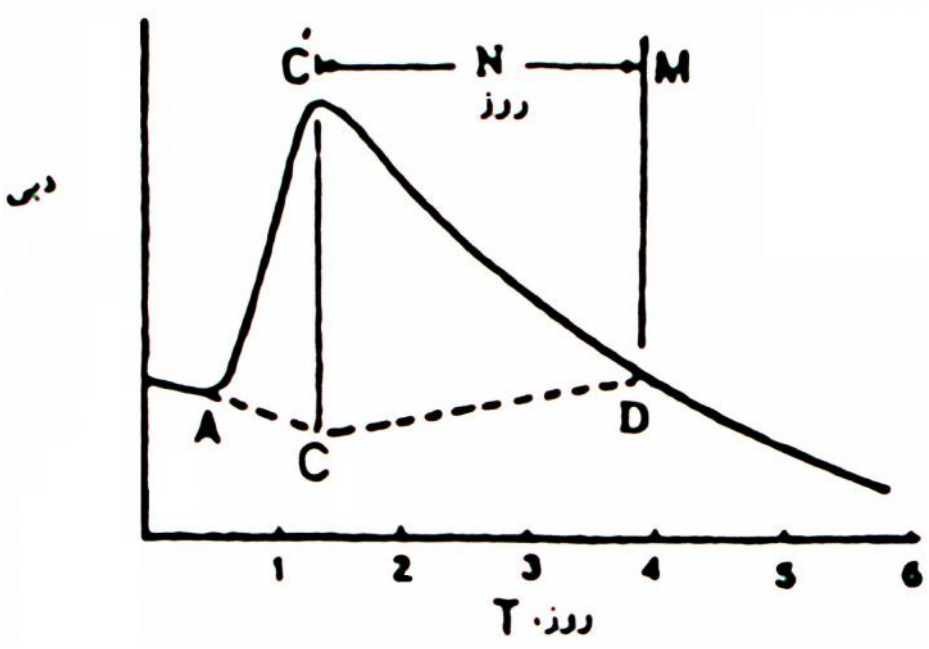
نمودار ۵-۱۲ تجزیه هیدروگراف (نقطه A شروع و نقطه B پایان سیل). با نا مشخص بودن نقطه B، خط AB افقی رسم می‌شود

گاهی دبی پایه با ترسیم خط مستقیم شیب دار مماس بر نقطهء قبل طغیان سیلاب تا محل تقاطع با بازوی پایین رونده مجزا می شود. بدین ترتیب، بخشی از منحنی که بالای این خط (AC در نمودار ۵-۱۳) قرار می‌گیرد به عنوان هیدروگراف رواناب مستقیم محسوب می‌شود. در این روش بر خلاف حالت قبل که دبی پایه در طول تداوم سیل ثابت فرض شده بود به تدریج وبا شیبی که قبلا داشته است کاهش می‌یابد. مشکل اغلب این است که چون شیب خط دبی پایه قبل از طغیان سیلاب معمولا آسان بدست نمی آید، ممکن است خط شیب دار بازوی پایین رونده هیدروگراف را قطع نکند. در این صورت بهتر خواهد بود که برای جدا کردن هیدروگراف از این شیوه استفاده نشود.



نمودار ۵-۱۳ تجزیه هیدروگراف (خط AC با شیب قبلی خود رسم شده است)

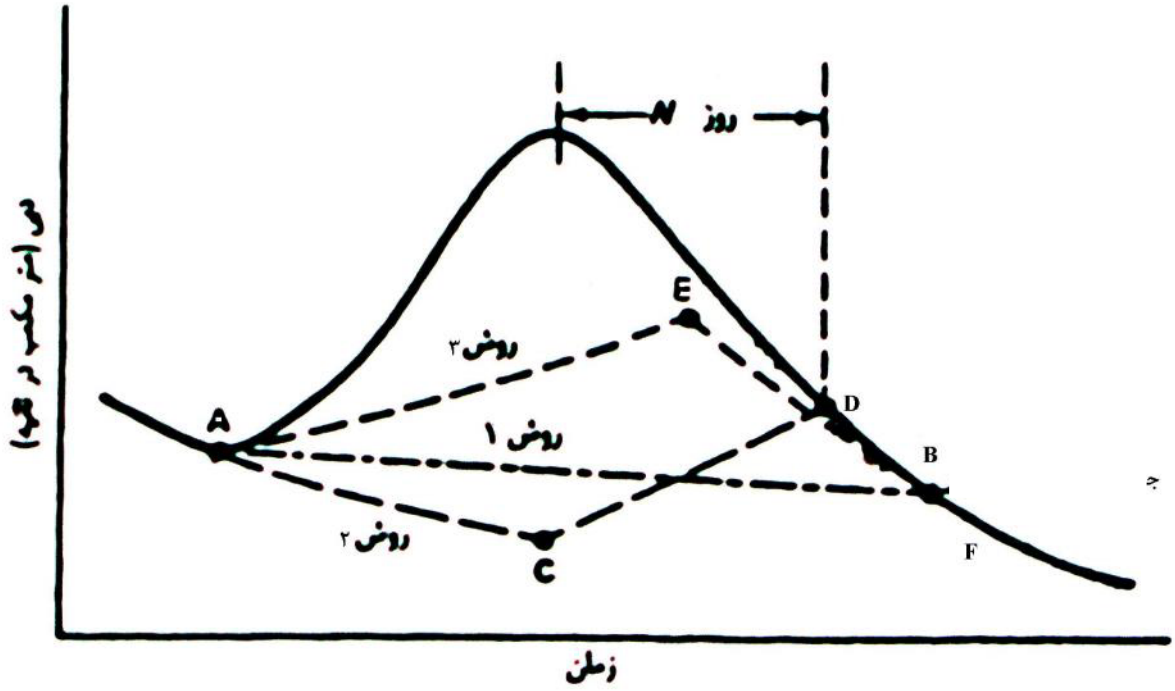
روش دوم – در این روش، ابتدا با رسم هیدروگراف مشاهداتی در یک دستگاه محور مختصات، سعی می شود خط مستقیمی با همان شیبی که قبل از طغیان آب داشته است رسم تا خط عمودی مار بر نقطه اوج هیدروگراف (و عمود بر محور افق) را در نقطه ای بنام C قطع کند (نمودار ۵-۱۴). سپس از نقطه اوج یک خط افقی نیز اخراج کرده ودر روی آن طولی را که معادل $N = 0.83A^{0.2}$ روز مشخص کرده (A مساحت حوضه حسب کیلومترمربع و N بر حسب روز) و از این نقطه انتهایی این خط (M) عمود دیگری به سمت محور افق اخراج تا بازوی پایین رونده هیدروگراف را در نقطه D قطع کند. با وصل نقطه C به نقطه D مرز تفکیک جریان پایه از هیدروگراف رواناب مستقیم بدست می آید. در اینجا توجه شود چون N بر حسب روز است محور افقی هیدروگراف نیز بهتر است با همان واحد روز مدرج شده باشد. اگر محور افقی بر حسب واحد اندازه گیری دیگری مثلا ساعت باشد، ابتدا N را بر حسب روز برآورد سپس با توجه به مقیاسی که در محور طول‌ها در نظر گرفته شده است طول N را نیز بر حسب همان مقیاس برآورد می شود.



نمودار ۵-۱۴ تجزیه هیدروگراف (روش دوم)

روش سوم – در این روش، با ترسیم یک خط مستقیم از انتهای سمت راست بازوی فروکش هیدروگراف (در صورت ترسیم هیدروگراف مشاهداتی روی دستگاه مختصات با محور قایم لگاریتمی از نوع نپرین) به سمت چپ (و با همان شیبی که کاهش می‌یافته) و امتداد تا نقط E بدست آید (شکل ۵-۱۵). نقطه E محل تقاطع این خط با خط مار بر نقطه عطف (روی بازوی پایین رونده هیدروگراف) و عمود بر محور افق است. حال اگر از نقطه شروع هیدروگراف (A) به این نقطه (E) وصل شود وضعیتی مشابه نمودار ۵-۱۵ (روش ۳) ایجاد می شود. بخشی از هیدروگراف که بالای AEB قرار دارد به عنوان هیدروگراف رواناب مستقیم (مجزا شده از دبی پایه) در نظر گرفته می‌شود. نقطه B نقطه ایست که خط مستقیم امتداد یافته به سمت چپ (حاصل از انتهای سمت راست بازوی فروکش هیدروگراف در صورت ترسیم هیدروگراف مشاهداتی روی دستگاه نیمه لگاریمی مذکور) از بازوی فروکش جدا می شود.

انتخاب هر کدام از این روش ها به شرایط حوضه آبریز از نظر قدرت ذخیره سازی بارش، منعکس شده روی جریان پایه، بستگی دارد که با ترسیم هیدروگراف سیلاب مشاهداتی (با بررسی داده‌های مورد استفاده و دقت مورد نیاز) قابل ارزیابی است. بااین وجود در اکثر مطالعات سیلاب و با فرض سیلاب شدید (مخصوصا در حوضه آبریز شهری) جریان پایه با مقدار ثابت در نظر گرفته می‌شود که در واقع همان روش اول است.



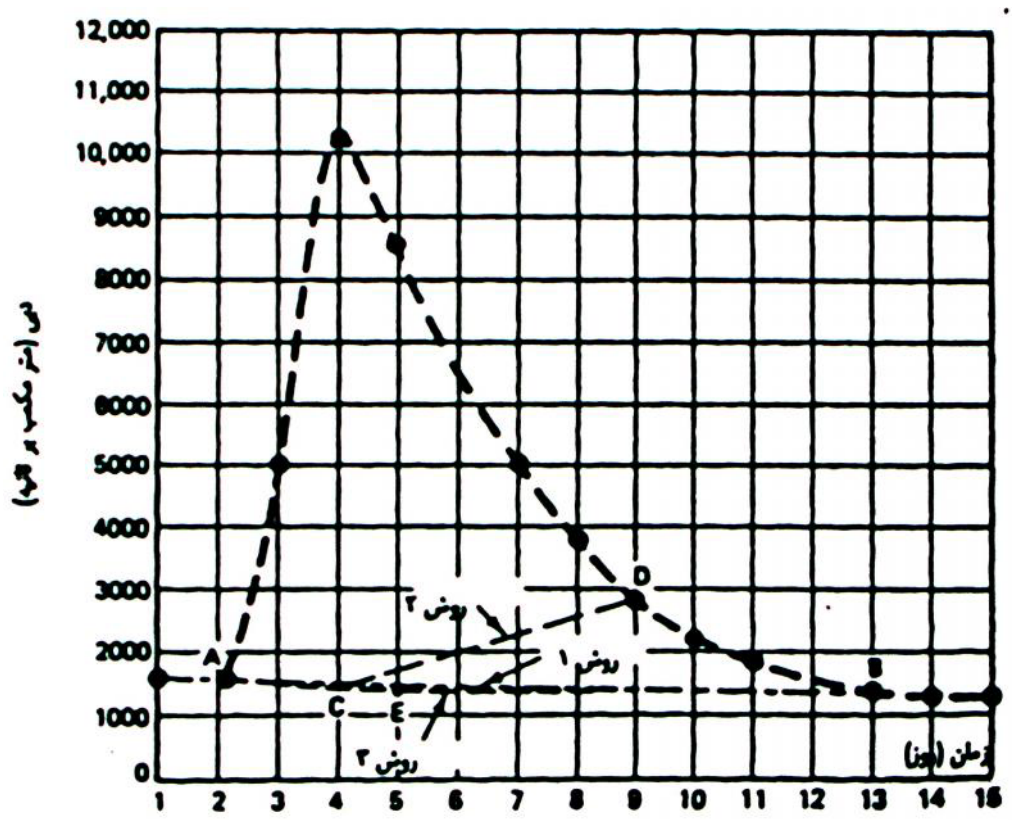
نمودار ۵-۱۵ روش های جدا سازی جریان پایه از هیدروگراف مشاهداتی سیلاب

مثال ۵-۱۱: در یک حوضه آبریز به وسعت $6500\ km^2$ بارشی به مدت ۱۲ ساعت رخ داده و دبی مشاهداتی در خروجی حوضه طی مدت ۱۵ روز در جدول زیر است. با روش های مختلف دبی پایه را جدا کرده هیدروگراف جریان مستقیم را بدست آورید.

حل: در یک دستگاه محور مختصات هیدروگراف سیل رسم (نمودار ۵-۱۶) و نقاط A, B, C, D, E به روشهای سه گانه جدا کردن دبی پایه (قبلا آمد) مشخص شده اند. در روش اول A,B با یک خط مستقیم شیبدار به هم وصل شده اند. نقطه A شروع سیل و نقطه B پایان سیل که به صورت چشمی از روی هیدروگراف تشخیص داده شده است. در روش دوم نقطه C درزیر قله هیدروگراف تعیین گردیده ومقدار N که بر اساس آن نقطه D بدست امده است برابر ۵ بوده است زیرا: $N = 0.83(A)^{0.2} = 0.83(6500)^{0.2} \approx 5\ days$

جدول ۵-۷

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		



نمودار ۵-۱۶ جدا کردن دبی پایه در مثال ۵-۱۰

در روش سوم نقطه عطف بازوی پایین رونده هیدروگراف را مشخص کرده (تقریبا ۵ روز پس از شروع بارش) که نقطه E زیر آن قرار می‌گیرد. با استفاده از این سه روش، نتایج رواناب مستقیم مطابق جدول ۵-۸ است.

جدول ۵-۸ رواناب مستقیم حاصل از جدا سازی جریان پایه با ۳ روش تعریف شده

زمان (روز)	رواناب مستقیم (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

۵-۶ منحنی تداوم جریان

جریان پایه رودخانه یا به دلیل رواناب ناشی از ذوب برف‌ها و یا به دلیل رواناب دیررس (تغذیه رودخانه توسط آبهای زیر زمینی) و یا هر دو است. رودخانه‌ها را، بر حسب چگونگی جریان پایه آن ها در طول سال، می توان طبقه بندی (دائمی،