دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده کشاورزی

گروه علوم و مهندسی خاک

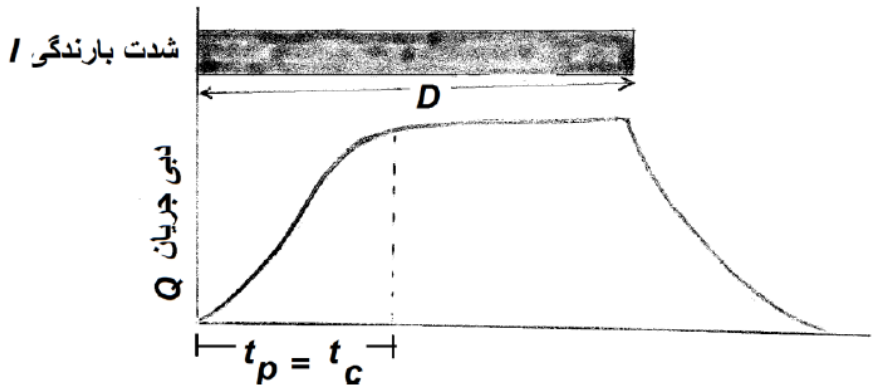
هیدرولوژی

روشهای تجربی تخمین رواناب

تهیه و تنظیم
حیدر غفاری

۱۰-۴- هیدروگراف سیلاب

هیدروگراف سیلاب نموداری است که تغییرات دبی سیلاب را نسبت به زمان نشان می‌دهد. در قسمت قبل گفته شد که اگر روی یک حوضه آبریز که زمان تمرکز آن tc است باران یکنواختی به مدت D ساعت ببارد و D>tc باشد دبی خروجی از حوضه بتدریج افزایش می یابد و در زمانی که برابر زمان تمرکز حوضه است به حداکثر خود می رسد. سپس تا زمانی که بارندگی ادامه دارد دبی ثابت باقی مانده ولی بلافاصله پس از قطع باران دبی نیز تقلیل می یابد. چنین منحنی، که تغییرات دبی در زمان های مختلف را نشان می‌دهد، هیدروگراف سیلاب می گویند. شکل ۱۰-۴ تیپ هیدروگراف‌هایی است که در آن تداوم بارندگی(D)از زمان تمرکز حوزه tc بیشتر است. در چنین وضعیتی زمان رسیدن به اوج هیدروگراف (tp) با زمان تمرکز برابر خواهد بود (tp=tc). اما اگر مدت بارندگی برابر زمان تمرکز حوضه (D=tc) باشد در شکل هیدروگراف تغییراتی بوجود می آید و قسمت اوج آن از حالت پهن بودن خارج شده و شکل قله‌ای به خود می‌گیرد. بطوریکه هیدروگراف بلافاصله پس از رسیدن به اوج دوباره نزول کرده و منحنی شکل مثلثی یا زنگوله‌ای پیدا می کند.

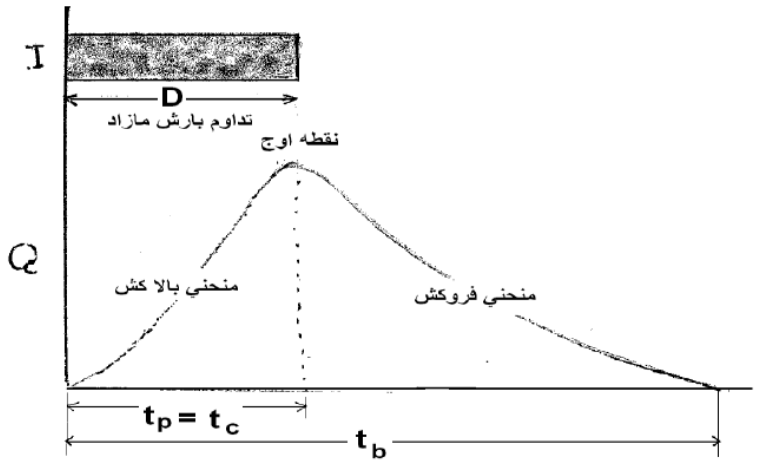


شکل ۱۰-۴- نمونه یک هیدروگراف برای وضعیت بارندگی ها با شدت ثابت

(مدت بارندگی طولانی تر از زمان تمرکز)

در چنین وضعیتی چون تداوم بارندگی دقیقاً برابر زمان تمرکز حوضه است زمان رسیدن به اوج نیز برابر زمان تمرکز خواهد بود. که این وضعیت در شکل ۱۰-۵ نشان داده شده است. این شکل برای وضعیتی است که زمان تمرکز حوضه tc و تداوم بارندگی (D) با هم برابر بوده اند. (D=tc). در نتیجه هیدروگراف در زمانی به اوج خود می‌رسد (tp) که بارندگی به اتمام رسیده باشد. در این وضعیت زمان رسیدن به اوج هیدروگراف برابر زمان تمرکز و تداوم بارندگی است. (D=tc=tp)

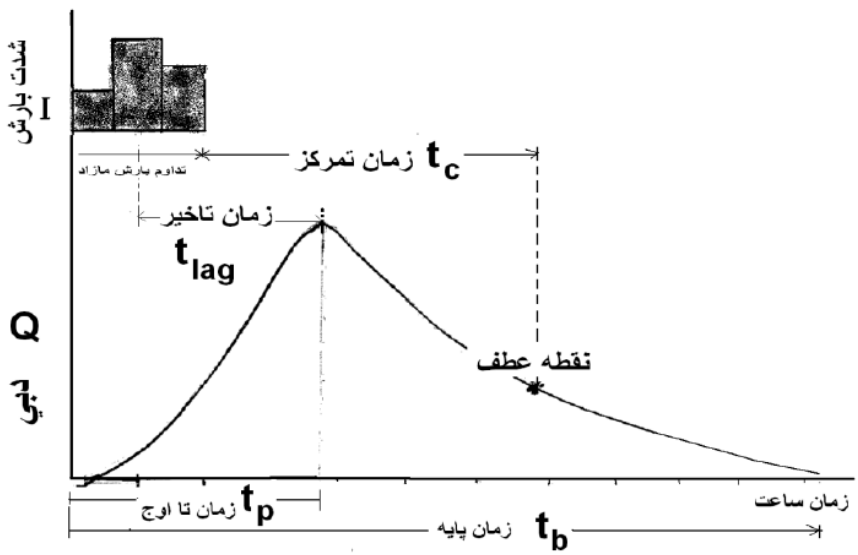
بطور کلی هر هیدروگراف از سه قسمت تشکیل شده است. (۱) بازوی بالارونده (rising limb) که نشان دهنده شدت افزایش دبی سیل نسبت به زمان است، (۲) نقطه اوج که گاهی اوقات به آن تاج هیدروگراف(crest segment) می‌گویند که بالاترین دبی است که هیدروگراف پیدا می‌کند و(۳) بازوی پایین‌رونده(falling limb) که نشان‌دهنده سرعت تخلیه سیلاب از حوضه می‌باشد. هیدروگراف از شروع تا خاتمه مدتی را سپری می کند که به آن زمان پایه هیدروگراف گفته می شود. در شکل ۱۰-۵ این مدت با tb نشان داده شده است.



شکل ۱۰-۵- نمونه یک هیدروگراف

برای وضعیتی که زمان بارندگی مساوی زمان تمرکز است.

چنانچه مدت زمان بارندگی کمتر از زمان تمرکز باشد زمان رسیدن به اوج در هیدروگراف برابر زمان تمرکز نخواهد بود ولی باز هم هیدروگراف مثل شکل ۱۰-۶ حالت زنگوله‌ای خود را حفظ خواهد کرد. در این وضعیت گرچه دقیقاً نمی‌توان از روی هیدروگراف زمان تمرکز را بدست آورد. اما تجربه نشان داده است که فاصله زمانی بین انتهای بارندگی مؤثر تا نقطه ای که هیدروگراف در قسمت نزولی خود تغییر شیب می دهد. (نقطه عطف در بازوی پایین رونده) برابر زمان تمرکز حوضه خواهد بود.



(شکل ۱۰-۶) هیدروگراف سیلاب و هیتوگراف بارش مولد آن

مثلا در شکل ۱۰-۶ که بارانی به مدت ۳ ساعت روی حوضه نسبتاً بزرگ باریده است زمان وقوع دبی اوج سیل ۶ ساعت بعد از شروع بارندگی و زمان نقطه عطف ۱۱ ساعت و لذا زمان تمرکز حوضه برابر با ۸ ساعت (۸=۴-۱۱) است.

زمان وقوع اوج هیدروگراف نسبت به مرکز بارندگی (3.5ساعت) را زمان تأخیر می‌گویند. رسم هیدروگراف‌های سیل از چند نظر اهمیت دارد. که در زیر به برخی از آنها اشاره شده است.

- از روی هیدروگراف می توان زمان شروع و خاتمه سیل را نسبت به آغاز آن مشخص کرد.
- دبی اوج سیل و زمان وقوع آن از روی هیدروگراف قابل تشخیص است.
- شکل بازوی بالارونده و پایین رونده هیدروگراف مشخص کننده چگونگی افزایش و فروکش کردن سیل است.
- حجم سیلاب را می توان از روی سطح زیر منحنی هیدروگراف سیل محاسبه کرد.
- تداوم سیل برابر زمان پایه هیدروگراف است .(t_b)

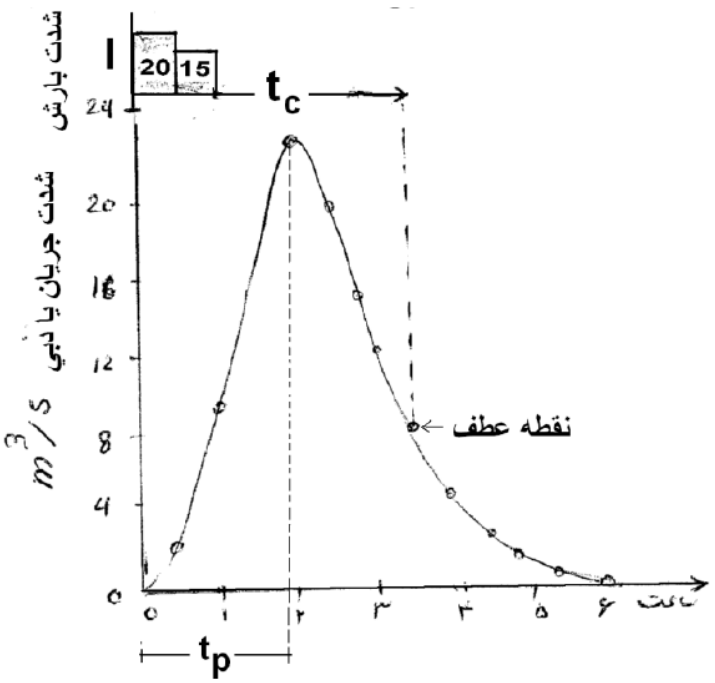
مثال ۱۰-۴- در یک رودخانه دبی سیل در زمان های مختلف اندازه گیری و ارقام زیر بدست آمده است.

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 باران یک‌ساعته‌ای است که شدت بارندگی در نیم ساعت اول ۲۰ و در نیم ساعت بعد از ۱۵ میلی‌متر در ساعت است. مشخصات سیل را بدست آورید. مساحت حوضه ۲۵ کیلومترمربع است.

حل مسئله:

چنانچه دبی نسبت به زمان در یک دستگاه محور مختصات رسم شود (شکل ۱۰-۸) هیدروگراف سیل بدست می‌آید. از روی هیدروگراف مشخصات سیل به شرح زیر قابل استخراج است:



اطلاعاتی که از شکل قابل استخراج می باشد

زمان شروع بارش $t=0$ ساعت

زمان شروع سیل $t=0$ "

زمان خاتمه بارش $t=1$ "

زمان خاتمه سیل $t=6$ "

تداوم زمانی سیل $t_b=6$ "

زمان تاخیر سیل $t_{lag}=1/5-0/5=1$

زمان پایه هیدروگراف سیل $t_b=6$

زمان رسیدن به دبی اوج سیل $t_p=1/5$

حداکثر دبی یا دبی اوج $Q_{max}=24\ m^3/s$

زمان تمرکز حوضه $t_c=2/5$

زمان فروکش کردن سیل $t_r=4/5$

حجم سیلاب با توجه به جداول ۱۰-۲ که از روی داده های هیدروگراف بدست آمده است. معادل ۱۶۷۴۰۰ متر مکعب 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 دبی‌ها در ابتدا و انتهای هر دوره و تقسیم آن بر دو به دست آمده است.

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

با توجه به این که مساحت حوضه ۲۵ کیلومترمربع است ارتفاع رواناب ناشی از این بارندگی ۰/۰۰۶۵=(۲۵×۱۰۶) : (۱۶۷۴۰۰) متر و یا ۶/۵ میلی‌متر است. که اگر متوسط ارتفاع بارندگی نیز ۱۷.۵ میلی متر $\left(\frac{۲۰+۱۵.۵}{۲}\right)$ 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 ۱۰-۲

زمان ساعت	۰.۵	۱.۰	۱.۵	۲.۰	۲.۵	۳.۰	۳.۵	۴.۰	۴.۵	۵.۰	۵.۵	۶.۰
دبی M^3/s	۰.۰	۳	۸	۲۳	۱۸	۱۳	۱۰	۷	۵	۳	۲	۰
دبی متوسط M3/s	۱.۵	۵.۵	۲۰.۵	۱۵.۵	۱۱.۵	۸.۵	۶	۴	۲.۵	۱.۵	۰.۵	۰
حجم M^3	۲۷۰۰	۹۹۰۰	۲۷۹۰۰	۳۶۹۰۰	۲۷۹۰۰	۲۰۷۰۰	۱۵۳۰۰	۱۰۸۰۰	۷۲۰۰	۴۵۰۰	۲۷۰۰	۹۰۰

بازوی بالارونده هیدروگراف شاخصی است که بستگی به خصوصیات فیزیکی و پوشش سطح حوضه و ویژگیهای بارندگی از قبیل شدت–مدت و یکنواختی آن دارد حال آنکه بازوی پایین رونده هیدروگراف بستگی به فرآیندهای زهکشی و تخلیه آب 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 پایین رونده 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 نقطه عطف که شروع فروکش سیل است Q_0 باشد. معادله کلی قسمت منحنی فروکش را که با آن بتوان دبی تخلیه سیلاب را در هر زمان محاسبه کرد بصورت زیر است.

$$Q = Q_0 K' \qquad (۷-۱۰)$$

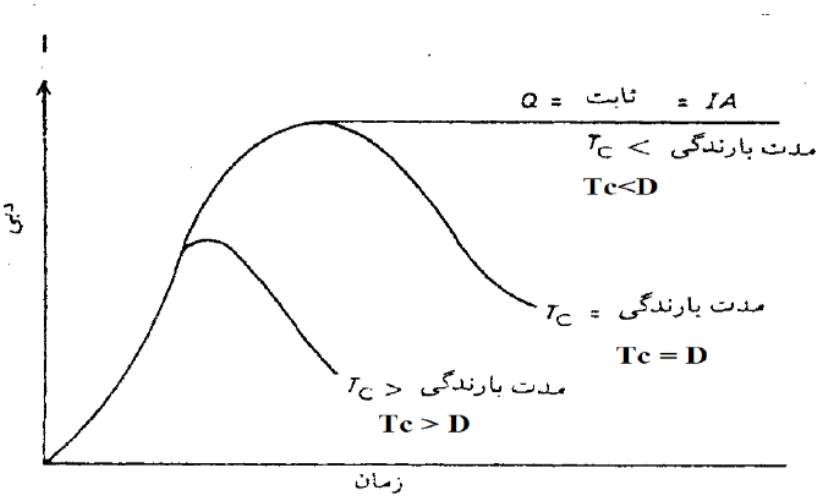
که در آن K شاخص وضعیت زهکشی حوضه، Q_0 دبی در زمان شروع فروکش سیل(نقطه عطف منحنی بازوی پایین‌رونده هیدروگراف) و t زمان شروع فروکش سیل می‌باشد. با توجه به ثابت بودن K برای حوزه‌های آبریز معادله فوق را می توان بصورت معادله نمایی زیر نوشت:

$$Q = Q_0 e^{-at} \qquad (۸-۱۰)$$

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

۱۰-۴- تفکیک مؤلفه های هیدروگراف سیلاب

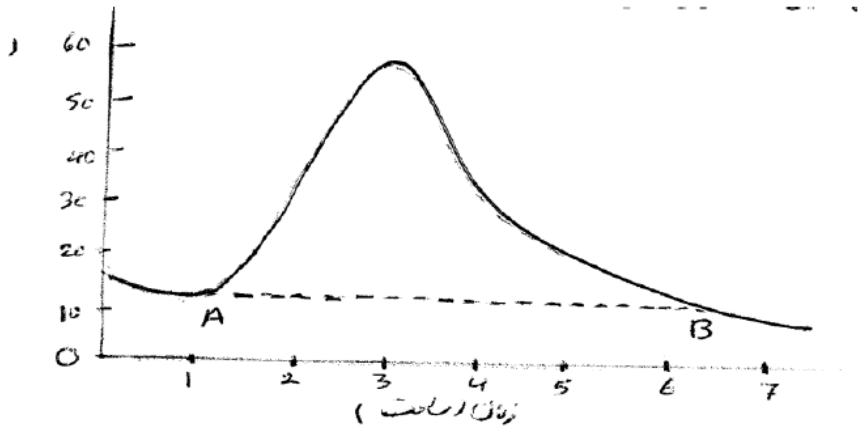
همانگونه که اشاره شد بطور کلی بسته به اینکه مدت بارندگی مساوی یا کوچک تر از زمان تمرکز باشد شکل هیدروگراف متفاوت خواهد بود که این حالت ها در شکل ۱۰-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۷-۱۰- هیدروگراف حوضه با فرض یکنواخت بودن بارش

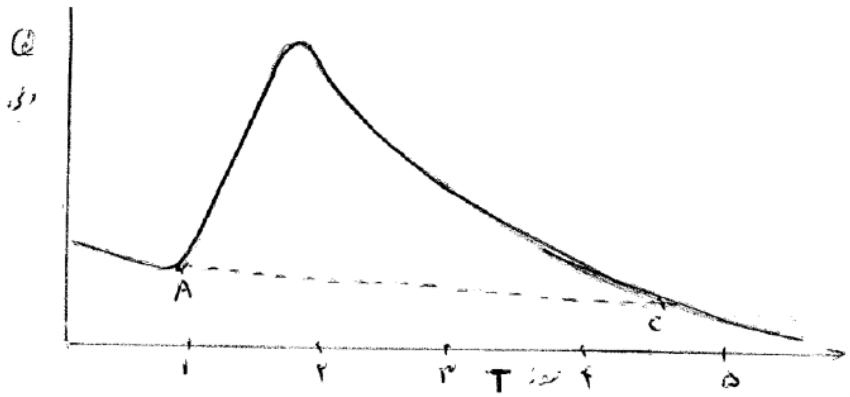
اگر قبل از وقوع یک بارندگی در سطح حوضه رودخانه ای جریان آب وجود داشته باشد و یا به دلیل بارندگی قبلی، هنوز جریان سیلاب در مرحله فروکش ادامه داشته باشد و در این وضعیت بار دیگر بارندگی صورت گیرد سیلاب جدید با دبی قبلی رودخانه مخلوط می شود بطوری که بخشی از دبی رودخانه مربوط به جریان عادی یا سیلاب قبلی است. در این صورت اگر قصد بررسی هیدروگراف سیلاب جدید باشد، لازم است ابتدا دبی قبلی رودخانه که بنام دبی پایه[۱۱۶] نامیده می‌شود از آن کسر شود. این فرآیند را مجزا کردن یا جدا سازی هیدروگراف[۱۱۷] گویند و همانطور که گفته شد، منظور از مجزا کردن هیدروگراف جدا ساختن جریان پایه قبل از وقوع سیل جدید در رودخانه میباشد زیرا در تحلیل هیدروگراف جدید نباید آن را به حساب دبی سیل منظور کرد. با توجه به شکل۱۰-۱۱ که در آن هیدروگرافی با جریان پایه رسم شده است، می توان 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 از نقطه‌ای در هیدروگراف که سیلاب شروع می‌شود(A) یک خط مستقیم به نقطه ای که سیلاب خاتمه پیدا می کند (B) رسم شود. بخشی از هیدروگراف که بالای خط AB قرارگیرد هیدروگراف رواناب مستقیم یا سیلاب جدید است. معمولاً خط AB که ابتدا و انتهای سیل را به هم وصل می کند یک خط شیبدار خواهد بود ولی چنانچه نقطه پایان سیل یعنی B مشخص نباشد و نتوان آنرا به دقت تعیین کرد از نقطه ای که هیدروگراف شروع به افزایش می کند(A) یک خط مستقیم افقی رسم می شود تا مؤلفه پایین رونده هیدروگراف را در نقطه B قطع کند. بخشی از هیدروگراف که در بالای این خط افقی (AB) قرار گیرد هیدروگراف سیل است که می توان آن را بصورت 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 ۱۰-۱۱ دبی پایه حدود ۱۲/۵ متر مکعب 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 می شود.

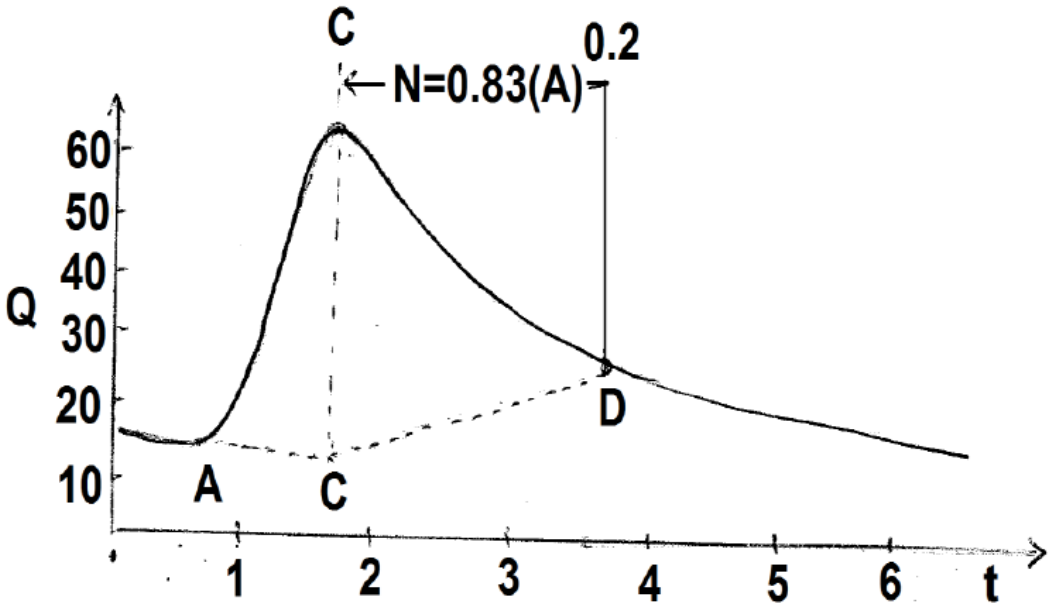


(نقطه شروع A و نقطه B پایان سیل است. اگر نقطه B نامشخص باشد خط AB افقی رسم می‌شود.)

گاهی اوقات دبی پایه قبل از شروع سیل با همان شیبی که قبلا داشته است با یک خط مستقیم ادامه داده می‌شود تا مؤلفه پایین رونده را در نقطه‌ای قطع نماید. بخشی از منحنی که در بالای این خط (AC در شکل ۱۰-۱۲) قرار گیرد به عنوان هیدروگراف سیل محسوب می شود. در این روش بر خلاف حالت قبل که دبی پایه در طول تداوم سیل ثابت فرض شده بود بتدریج و با شیبی که قبلا داشته کاهش می یابد. ولی مشکلی که اکثراً پیدا می شود این است که چون شیب خط دبی پایه قبل از شروع سیل معمولا تند است اگر آن را به همان صورت ادامه دهیم ممکن است هیچ وقت بازوی پایین رونده را قطع نکند در این صورت بهتر خواهد بود برای جدا سازی هیدروگراف از این روش استفاده نشود.



روش دوم- در این روش محور زمان در هیدروگراف بر حسب روز در نظر گرفته می شود. سپس از نقطه شروع سیلاب (A) دبی پایه با همان شیبی که قبل از شروع سیل داشته است ادامه می یابد تا خط عمودی را که از نقطه اوج هیدروگراف به طرف پایین رسم شده است در نقطه C قطع کند (شکل ۱۰-۱۳). از نقطه اوج یک خط افقی به گونه ای رسم می شود که طولی معادل $N=0.83(A)^{0.2}$ روز داشته باشد (A مساحت حوضه بر حسب کیلومترمربع وN بر حسب روز و مشابه مقیاس محور افقی هیدروگراف میباشد). حال از نقطه انتهایی این خط(M)عمود دیگری به سمت پایین رسم می شود تا منحنی فروکش هیدروگراف را در نقطه D قطع کند. خط ACD تغییرات دبی پایه را نشان می دهد.

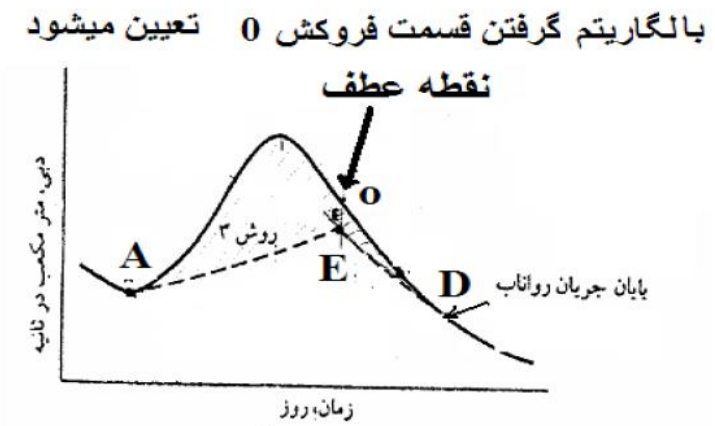


بخشی از هیدروگراف که در بالای خط ACD قرار گیرد هیدروگراف سیلاب و آنچه در پایین آن قرار دارد دبی پایه رودخانه محسوب می-شود.

روش سوم- در این روش قسمت انتهایی بازوی پایین رونده هیدروگراف را با یک خط مستقیم و با همان شیبی که کاهش می‌یافته است بطرف بالا(عقب) امتداد می‌دهیم سپس از نقطه عطف هیدروگراف یک خط عمودی به سمت پایین رسم می کنیم تا این خط را در نقطه‌ای مانند E (شکل ۱۰-۱۴) قطع کند.

حال اگر نقطه شروع هیدروگراف یعنی (A) به نقطه پایان هیدروگراف(E) وصل شود وضعیتی مشابه به آنچه در شکل۱۰-۱۴ دیده می-شود، بوجود خواهد آمد. بخشی از هیدروگراف که در بالای AEB قرار دارد بعنوان هیدروگراف سیلاب است که از دبی پایه مجزا شده است.

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



۱۱-۱ تعریف هیدروگراف واحد[۱۵۰]

هیدروگراف واحد یک حوزه آبریز یا آبخیز عبارت است از هیدروگراف رواناب مستقیم[۱۵۱] ناشی از بارش مؤثری[۱۵۲] به عمق واحد (یک اینچ یک سانتی‌متر) که به صورت کاملاً یکنواخت با نرخ ثابت در یک مدت زمان معین بر روی کل حوزه باریده است. شرمن در ابتدا از کلمه واحد به منظور بیان واحد زمان استفاده نمود، ولی بعد از آن از کلمه واحد برای بیان واحد عمق بارش مؤثر استفاده کرد. شرمن رواناب را به دو دسته سطحی[۱۵۳] و زیرسطحی[۱۵۴] تقسیم نمود و به طور صریح بیان نمود که هیدروگراف واحد فقط در مورد رواناب سطحی مصداق دارد. هیدروگراف واحد یک مدل خطی[۱۵۵] ساده می‌باشد که از آن می‌توان برای استخراج هیدروگراف ناشی از هر مقدار بارش خالص استفاده نمود (چو و همکاران، ۱۹۸۸).

از ویژگی‌های هیدروگراف واحد آن است که در صورت وجود هیدروگراف واحد برای یک حوزه امکان ساخت هیدروگراف سیلاب طرح, مشروط به آنکه مدت بارندگی برابر مدت هیدروگراف واحد در نظر گرفته شود، وجود دارد. لذا تهیّه هیدروگراف واحد برای تداوم‌های مختلف از اقدامات اساسی در هیدرولوژی است. هیدروگراف واحد یا از روی هیدروگراف‌های معمولی حوضه که قبلا اندازه گیری شده‌اند، استخراج می‌شود و یا در صورت عدم وجود این هیدروگراف باید به صورت مصنوعی تهیّه شود.

۱۱-۲- هیدروگراف واحد طبیعی

۱۱-۲-۱ طرز تهیه هیدروگراف واحد حاصل از یک رگبار منفرد

در این روش باید اطلاعات مربوط به بارش و جریان رواناب مستقیم حاصل از آن مانند شکل (۱۱-۱) وجود داشته باشد. برای تهیه هیدروگراف واحد به ترتیب زیر عمل می‌شود.

۱- رسم هیدروگراف حاصل از بارش

۲- تفکیک جریان پایه از هیدروگراف مشاهداتی با استفاده از یکی روش‌های مناسب (مانند شکل ۱۱-۲)

۴- محاسبه مساحت زیر هیدروگراف مستقیم که برابر با حجم رواناب سطحی است

۴- حجم رواناب بر مساحت حوضه تقسیم می‌شود (مطابق رابطه ۱۱-۱) تا عمق بارش یکنواخت در حوضه بدست آید.

$$Q_t = \frac{K.V}{A} \qquad (۱-۱۱)$$

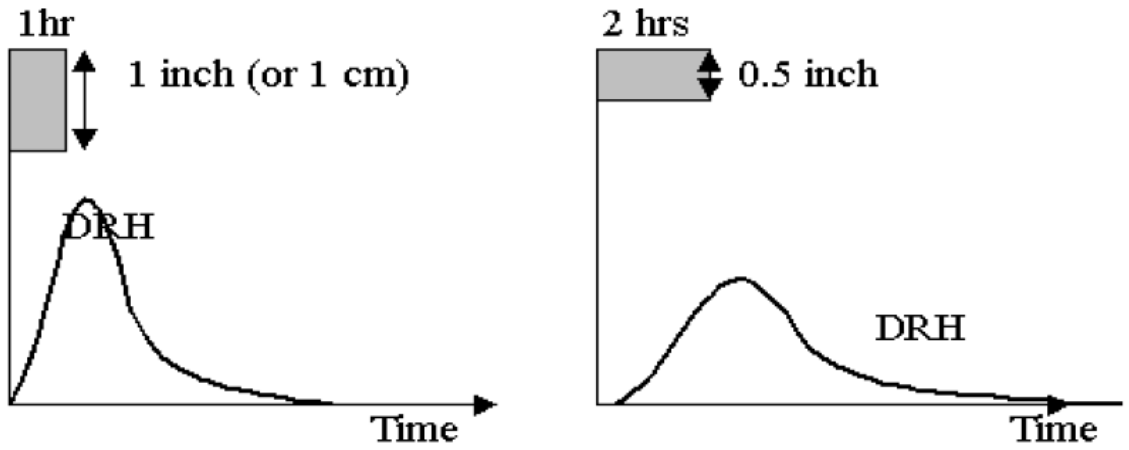
Q_t عمق رواناب مستقیم حاصل از بارش در بازه زمانی t ساعته

K فاکتور تبدیل واحدها است که بستگی به واحد زمان، سطح و بارش دارد.

V حجم زیر هیدروگراف

A مساحت حوزه آبخیز

۵- هر یک از مؤلفه‌های رواناب مستقیم بر عمق بارش (Q_t) بر حسب واحد (اینچ یا میلی‌متر) تقسیم می‌شود تا مؤلفه‌های هیدروگراف واحد با تداوم بارش مشاهده شده، بدست آید.

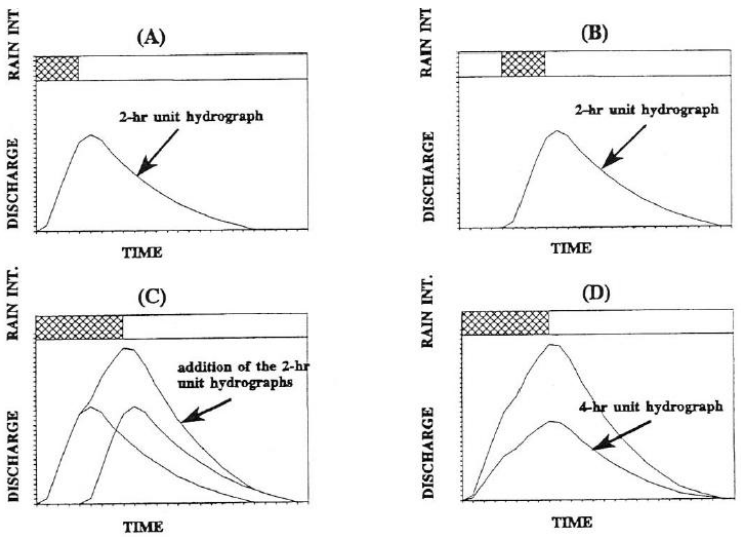


۱۱-٤ تعیین هیدروگراف واحد با تداوم‌هاي مختلف

هر هیدروگراف واحدی که برای یک حوضه تهیه شده با توجه به تداوم زمانی بارش مازاد مولد آن بدست می‌آید، ولی بدلیل متغیر بودن ویژگی‌های بارندگی نظیر تداوم، توزیع مکانی و زمانی و شدت بارندگی حتی با وجود ثابت بودن ویژگی‌های فیزیکی حوضه، نمی توان از آن برای بارش‌های مازاد با تداوم زمانی مختلف استفاده نمود بلکه ابتدا بایستی آنرا به یک هیدروگراف واحد معادل با تداوم بارش مازاد مورد نظر تبدیل کرد. دو روش کلی برای انجام این کار وجود دارد که به شرح زیر می‌باشد.

۱۱-۴-۱ روش تاخیری

در صورتی‌که $D'>D$ و نسبت $(D'/D)=n$ باشد، به تعدا n هیدروگراف واحد D ساعته را با تاخیرD ساعت نسبت به هم نوشته و سپس ابعاد آنها با هم جمع می‌شود و ابعاد هیدروگراف مجموع در نسبت D/D' ضرب می‌گردد. برای مثال در شکل (۱۱-۵) طرز تهیه هیدروگراف ۴ساعته از ۲ ساعته و در جدول (۱۱-۱) طرز تهیه هیدروگراف واحد ۶ ساعته ($D'=۶$) از یک هیدروگراف دو ساعته ($D=۲$) را نشان می‌دهد. با استفاده از ستون ۱ و ۷ هیدروگراف ۶ ساعته حوضه رسم می‌شود.



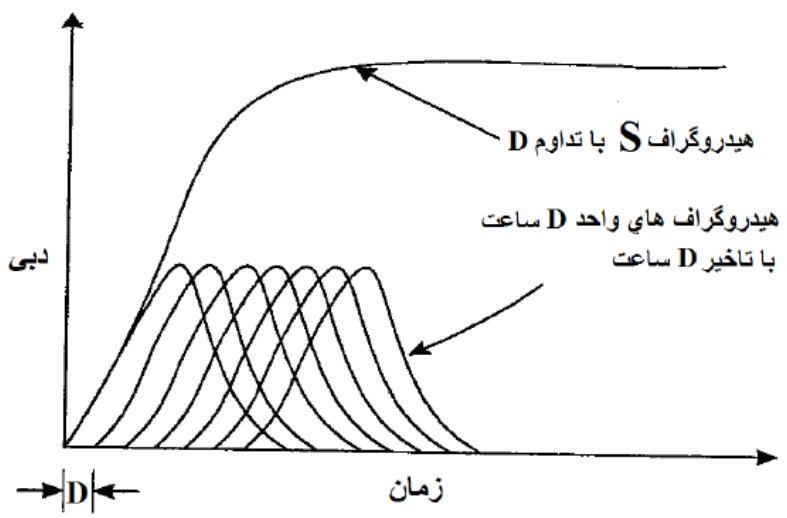
شکل (۱۱-۵) طرز تهیه هیدروگراف واحد ۴ ساعته از ۲ ساعته با روش تاخیری(McCuen R.H., 1989)

جدول (۱۱-۱) تهیه هیدروگراف واحد ۶ ساعته از هیدروگراف واحد ۲ ساعته با روش تاخیری

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
زمان ساعت	UH(2h) هیدروگراف ۲ ساعته (مترمکعب در ثانیه)	UH(2h)سه تا با تاخیر ۲ ساعت			مجموع (۴+۳+۲)	= UH(6h)×۶) (D/D')(هیدروگراف ۶ ساعته(مترمکعب در ثانیه)
۰	۰	–	–	–	۰	۰
۱	۱.۴۲	۱.۴۲	–	–	۱.۴۲	۰.۴۷
۲	۸.۵	۸.۵	۰	–	۸.۵	۲.۸۳
۳	۱۱.۳	۱۱.۳	۱.۴۲	–	۱۲.۷۲	۴.۲۴
۴	۵.۶۶	۵.۶۶	۸.۵	۰	۱۴.۱۶	۴.۷۲
۵	۱.۴۵	۱.۴۵	۱۱.۳	۱.۴۲	۱۴.۱۷	۴.۷۲
۶	۰	۰	۵.۶۶	۸.۵	۱۴.۱۶	۴.۷۲
۷	–	–	۱.۴۵	۱۱.۳	۱۲.۷۵	۴.۲۵
۸	–	–	۰	۵.۶۶	۵.۶۶	۱.۸۹

۱۱-۴-۲ روش منحنی تجمعی S

در این روش سری هیدروگراف‌های واحد با تداوم D ساعت با تاخیر زمانی ۲ ساعت نسبت به یکدیگر مرتب و در هر سطر جدول با یکدیگر جمع می‌شوند تا تشکیل یک هیدروگراف تجمعی به شکلS بدست آید(شکل ۱۱-۶). برای بدست آوردن هیدروگراف 'D ساعت باید دو هیدروگراف تجمعی را با تاخیر 'D ساعت نسبت به یکدیگر نوشت و آنها را از هم کم کرد. سپس اعداد بدست آمده را باید در نسبت (D/D') ضرب کرد تا هیدروگراف واحد 'D ساعت بدست آید. جدول (۱۱-۲) برای نمونه طرز تهیه هیدروگراف ۶ ساعته (D'=۶) از یک هیدروگراف دو ساعته (D =۲) را با روش منحنی S نشان می‌دهد.



جدول (۱۱-۲) تهیه هیدروگراف واحد ۶ ساعته از روی هیدروگراف واحد ۲ ساعته با روش منحنیS

(McCuen R.H., 1989)

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
زمان(ساعت)	Uh(2h)	Uh(2h)	Uh(2h)	Uh(2h)	Sمنحنی	Sتفاضل ۲ منحنی	هیدروگراف واحد ۶ ساعته
۱	۰	–	–	۰	–	۰	۰
۲	۱.۴۲	–	–	۱.۴۲	–	۱.۴۲	۰.۴۷
۳	۸.۵	۰	–	۱۲.۷۳	–	۸.۵	۲.۸۳
۴	۱۱.۳	۱.۴۲	۰	۱۴.۱۶	–	۱۲.۷۲	۴.۲۴
۵	۵.۶۶	۸.۵	۱.۴۲	۱۴.۱۷	۰	۱۴.۱۶	۴.۷۲
۶	۱.۴۵	۱۱.۳	۸.۵	۱۴.۱۶	۱.۴۲	۱۴.۱۷	۴.۷۲
۷	۰	۵.۶۶	۱۱.۳	۱۴.۱۷	۸.۵	۱۲.۷۵	۴.۷۲
۸	–	۱.۴۵	۵.۶۶	۱۴.۱۶	۱۲.۷۳	۵.۶۶	۴.۲۵
۹	–	۰	۱.۴۵	۱۴.۱۷	۱۴.۱۶	۱.۴۵	۱.۸۹
۱۰	–	–	۰	۱۴.۱۷	۱۴.۱۷	۰	۰.۴۸
۱۱	–	–	–	۱۴.۱۷	۱۴.۱۷	۰	۰

۱۱-۵ تهیه هیدروگراف سیلاب و دبي اوج آن با استفاده از هیدروگراف واحد

پس از آن‌که هیدروگراف واحد حوضه برای تداوم‌های مختلف بدست آمد، می توان هر طوفان طراحی (مثلا بـا دوره بازگشـت ۱۰، ۲۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله) را به هیدروگراف جریان تبدیل نمود و دبی اوج آنرا مشخص کرد. برای مثال اگر هیدروگراف واحد ۱ ساعته یک حوضه به مساحت ۲۲۵.۵ کیلومتر مربع به صورت ستون دوم جدول (۷-۱۶) باشد و یک طوفان که تداوم بارش مازاد آن به صورت یک هیتـوگراف ۴ ساعته مطابق ستون سوم جدول (۷-۱۶) باشد، هیدروگراف سیلاب ناشی از آن به صورت ستون جدول مذکور خواهد شـد. توجـه شـود کـه وقتی هیتوگراف یک باران مازاد در دسترس باشد، می توان از هیدروگراف واحد با تداوم معادل با واحدهای زمـانی هیتـوگراف بـه صـورت ماتریسی مانند مثال بالا استفاده نمود. در صورتی از هیدروگراف ۴ ساعته می توان استفاده کرد که کل بارش مازاد ۴ ساعته به صورت یـک مقدار یکنواخت فرض شود.

مراحل انجام محاسبات در مثال بالا به ترتیب زیر می‌باشد:

۱- ابعاد هیدروگراف واحد را در مقدار باران مازاد مربوط به ساعت اول ضرب و به عنوان هیدروگراف جریان ساعت اول در ستون چهارم های درج می شود.

۲- ابعاد هیدروگراف واحد را در مقدار باران مازاد مربوط به ساعت دوم ضرب و با یکساعت تاخیر به عنوان هیدروگراف جریان ساعت دوم در ستون پنجم درج می شود. اینکار برای باران مازاد در ساعت های سوم وچهارم انجام و هر کدام با یکساعت تاخیر در ستون‌های ششم و هفتم درج می شود.

۳- در ستون هشتم حاصل جمع اعداد چهارم تا هفتم هر سطر وارد می‌شود. اعداد این ستون هیدروگراف سیلاب می باشد.

۴- دبی اوج این سیل ۵۶۹.۹۱ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد.

جدول (۷-۱۶) تهیه هیدروگراف سیلاب ناشی از باران مازاد با استفاده از هیدروگراف واحد

زمان	هیدروگراف واحد یک ساعته	باران مازاد	هیدروگراف سیلاب (مترمکعب بر ثانیه)				
(ساعت)	(مترمکعب بر ثانیه)	(میلی‌متر)	هیدروگراف ناشی از باران ساعت اول	هیدروگراف ناشی از باران ساعت دوم	هیدروگراف ناشی از باران ساعت سوم	هیدروگراف ناشی از باران ساعت چهارم	هیدروگراف کامل
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱	۱.۹	۳۵.۸	۶۸.۰۲	۰	۰	۰	۶۸.۰۲
۲	۵.۹	۳۶	۲۱۱.۲۲	۶.۸۴	۰	۰	۲۱۸.۰۶
۳	۱۰.۴	۱.۳	۳۷۲.۳۲	۲۱.۲۴	۲.۴۷	۰	۳۹۶.۰۳
۴	۱۴.۵	۳.۰	۵۱۹.۱	۳۷.۴۴	۷.۶۷	۵.۷	۵۶۹.۹۱
۵	۱۱.۳		۴۰۴.۵۴	۵۲.۲	۱۳.۵۲	۱۷.۷	۴۸۷.۹۶
۶	۷.۰		۲۵۰.۶	۴۰.۶۸	۱۸.۸۵	۳۱.۲	۳۴۱.۳۳
۷	۴.۴		۱۵۷.۵۲	۲۵.۲	۱۴.۶۹	۴۳.۵	۲۴۰.۹۱
۸	۲.۷		۹۶.۶۶	۱۵.۸۴	۹.۱	۳۳.۹	۱۵۵.۵
۹	۱.۷		۶۰.۸۶	۹.۷۲	۵.۷۲	۲۱	۹۷.۳
۱۰	۱.۱		۳۹.۳۸	۶.۱۲	۳.۵۱	۱۳.۲	۶۲.۲۱
۱۱	۰.۷		۲۵.۰۶	۳.۹۶	۲.۲۱	۸.۱	۳۹.۳۳
۱۲	۰.۴		۱۴.۳۲	۲.۵۲	۱.۴۳	۵.۱	۲۳.۳۷
۱۳	۰		۰	۱.۴۴	۰.۹۱	۳.۳	۵.۶۵
۱۴	۰		۰	۰	۰.۵۲	۲.۱	۲.۶۲

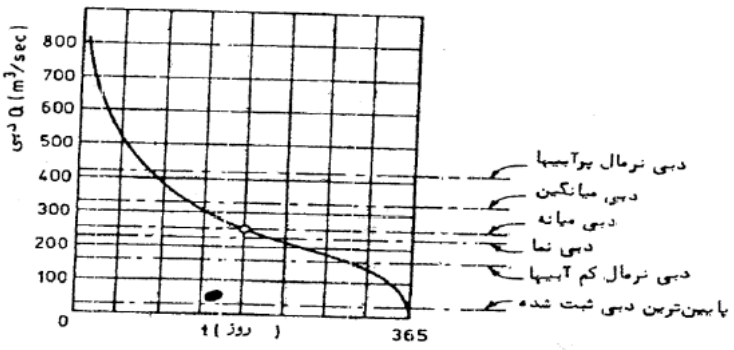
۱۰-۵- منحنی تداوم جریان

یکی از پارامترهای مهم در هیدرولوژی تداوم جریان یا دبی کلاسه در رودخانه است. این منحنی از رسم تجمعی دبی رودخانه نسبت به زمان به دست می آید. مثلا اگر متوسط دبی در هر روز از سال (۳۶۵ روز) مطابق جدول ۱۰-۵ در اختیار باشد (ستون ۲) و این دبی‌ها به ترتیب نزولی در ستون سوم قرار گیرد، می‌توان تغییرات دبی (ستون ۳) و زمان تجمعی را (ستون ۱) در دستگاه محور مختصات مانند نمودار ۱۰-۱۶ ترسیم کرد .

جدول ۱۰-۵ متوسط دبی روز یک رودخانه

روز	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	ادامه	۳۵۴	۳۶۵
متوسط دبی روزانه(m^3/s)	۸۲۰	۸۱۰	۸۰۰	۷۸۰	۷۵۰	۷۰۰	۶۸۰	۶۱۰	۵۲۰	۵۲۰	ادامه	۵	۴

دبی های مرتب شده	۵۷	۴۲	۱۸۲	۵۲۰	۶۸۰	۸۲۰	۸۱۰	۷۵۰	۶۱۰	۵۲۰	ادامه	۴۲	۴۷



هر یک از نقاط منحنی ۱۰-۱۶ نشان دهنده تعداد روزهایی از سال است که دبی رودخانه مساوی یا بیشتر از مقدار دبی مربوط به آن روز بوده است. مثلا ۵۰۰ متر مکعب در ثانیه مربوط به ۴۵ روز است یعنی در ۴۵ روز از سال دبی رودخانه مساوی یا بیشتر از ۵۰۰ متر مکعب در ثانیه است. با توجه به این منحنی می توان پارامترهای زیر را بعنوان مشخصه رودخانه به دست آورد.

دبی نرمال در حالت پرآبی: مقدار جریانی که در $\frac{1}{4}\times 365 = 91$ روز از سال دبی مساوی یا بالاتر از آن است.

دبی نرمال در حالت کم آبی: مقدار جریانی که در $\frac{3}{4}\times 365 = 275$ روز از سال دبی مساوی یا بالاتر از آن است.

دبی عادی: مقدار جریانی که نیمی از روزهای سال یعنی $\frac{1}{2}\times 365 = 182$ روز از سال دبی مساوی یا بالاتر از آن است.

دبی میانگین: مقدار جریانی که از حاصل جمع حجم آبی که از رودخانه عبور می‌کند و تقسیم آن بر زمان عبور $\frac{\sum V}{t}$ به دست می‌آید.

مثلا اگر حجم کل آب رودخانه در سال (m3) را بر ۳۱۵۳۶۰۰۰=۳۶۵×۸۶۴۰۰ ثانیه تقسیم کنیم دبی میانگین به دست می آید.

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

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

منحنی تداوم جریان یا دبی کلاسه شده و تعیین دبی‌های (مانند دبی عادی، دبی میانه و دبی نرمال) در برنامه‌ریزی‌های آب رودخانه جهت استفاده‌های شرب و یا احداث بندهای انحرافی برای استفاده در کشاورزی حائز اهمیت بوده و باید در هر طرح هیدرولوژی برای رودخانه ها انجام شود. مثلا اگر قرار باشد آب رودخانه برای کشاورزی استفاده شود از روی این منحنی می‌توان الگوی و تراکم کشت را مشخص کرد یا در استفاده از آب برای مصارف شهری کمبودها و مازاد آب را برآورد و به ذخیره سازی آب در مواقع مازاد اقدام کرد.

بدست آوردن منحنی تداوم جریان طی سال‌های آماری طولانی (مثلا ۲۰ سال یا بیشتر) این امکان را به دست می‌دهد که بتوان روی داده‌ها تحلیل آماری انجام داده و چنین منحنی‌هایی را برای دوره های 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 در ۳۶۵ روز از سال بررسی نموده و فراوانی وقوع آنها در گروه‌های مختلف دبی که در ستون اول جدول۱۰-۶ نوشته شده است بررسی کرده ایم. اگر تعداد روزهای مشاهده شده مطابق ستون دوم باشد فراوانی تجمعی و احتمال وقوع آنها به ترتیب در ستون های ۳ و ۴ نوشته شده است. حال چنانچه در یک کاغذ احتمالات اعداد ستون ۴ را نسیب به ستون ۱ (حد وسط گروه ها) رسم کنیم منحنی تداوم جریان بدست می آید. در شکل ۱۰-۱۷ منحنی تداوم جریان روزانه یک رودخانه بصورت معمولی رسم شده است. بطوری که مشاهده می شود مثلا فقط ۱۰ درصد موارد (۳۶ روز سال) ممکن است دبی روزانه کمتر از یک متر مکعب در ثانیه باشد. در جدول ۱۰-۶ بالاترین فراوانی مربوط به گروه ۲۹۷.۹-۲۰۰ است.

جدول ۱۰-۶- گروه بندی 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

توضیح: احتمال از رابطه ویبول محاسبه شده است