فصلی و سیلابی) نمود. برای این منظور، معمولا از نمودار منحنی تداوم جریان یا دبی کلاسه استفاده می‌شود. این منحنی از رسم دبی رودخانه نسبت به زمان (تجمعی) به دست می‌آید. مثلا اگر متوسط دبی در هر روز از سال برای ۳۶۵ روز مطابق جدول ۵-۹ در اختیار باشد (ستون ۲) واین دبی‌ها به ترتیب نزولی در ستون سوم قرار گیرد، می‌توان تغییرات دبی (ستون ۳) وزمان تجمعی را (ستون ۱) در دستگاه محور مختصات رسم کرد که نمودار آن در نمودار ۵-۱۷ آمده است.

هر یک از نقاط منحنی ۵-۱۷ نشان دهنده تعداد روزهای از سال است که دبی رودخانه مساوی یا بیشتر از مقدار دبی معین بوده است. مثلا ارتباط ۵۰۰ متر مکعب در ثانیه مربوط با ۴۵ روز یعنی در ۴۵ روز از سال دبی رودخانه مساوی یا بیشتر از ۵۰۰ m^3/s است. با توجه به این منحنی می‌توان پارامترهای زیر را به عنوان مشخصه رودخانه به دست آورد.

(۱) دبی نرمال پر آبی: مقدار دبی که در $0.25\times365=91$ روز از سال مساوی یا بیشتر از یک مقدار معین باشد.

(۲) دبی نرمال کم آبی: مقدار دبی که در $0.75\times365=274$ روز از سال مساوی یا بیشتر از یک مقدار معین باشد.

(۳) دبی نرمال: مقدار دبی که در $0.5\times365=182$ روز (نیمی) از سال مساوی یا بیشتر از یک مقدار معین باشد.

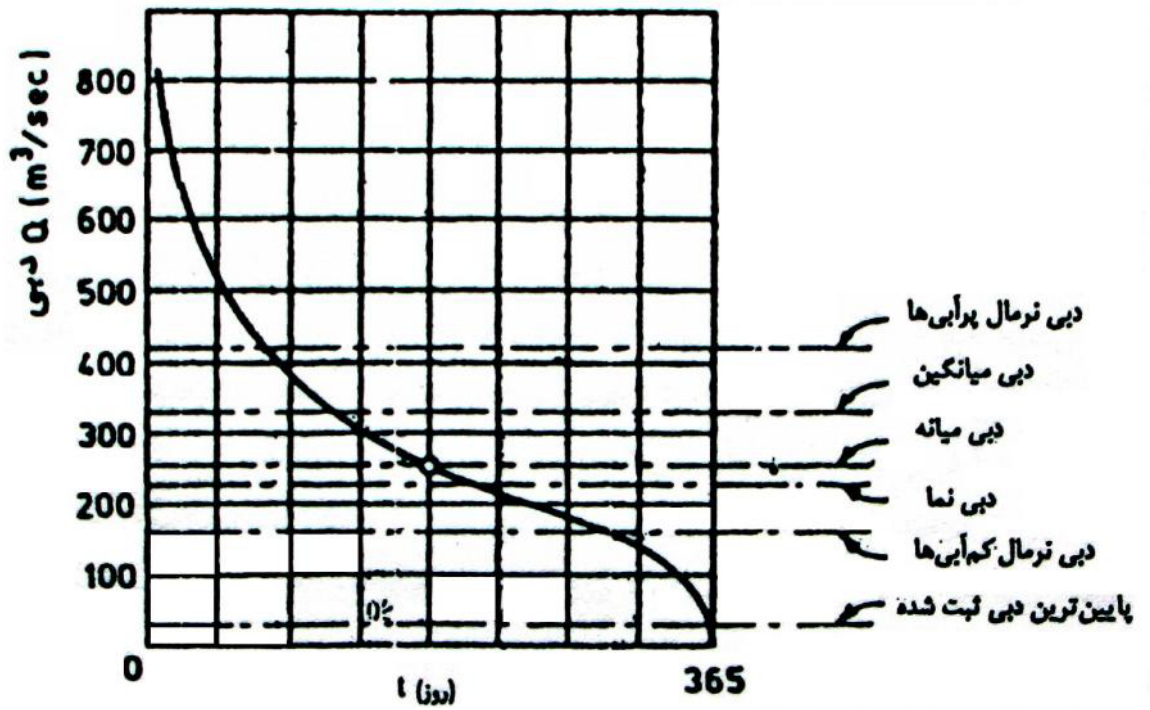
(۴) دبی میانگین (mean): عبارت است از مقدار دبی حاصل حجم آبی عبوری از رودخانه تقسیم بر مدت، $(\sum V)/t$. یعنی حجم کل آب رودخانه در سال (برحسب m^3) تقسیم بر ۳۶۵×۸۶۴۰۰=۳۱۵۳۶۰۰۰ ثانیه.

(۵)- دبی میانه (median): با ترتیب بندی دبی روزانه ها بطور نزولی، عبارت است از متوسط دبی روزهای ۱۸۲و۱۸۳.

(۶)- دبی نما (mode): مقدار دبی یا محدوده ای از آن که بالاترین فراوانی وقوع را در طول سال داشته باشد.

جدول ۵-۹

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



نمودار ۵-۱۷ نمونه ای از منحنی تداوم جریان (دبی کلاسه)

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

به عنوان مثال متوسط دبی رودخانه ای در ۳۶۵ روز از سال در جدول ۵-۱۰ مورد بررسی قرار می گیرد. فراوانی وقوع آن ها را در گروه های مختلف دبی در ستون اول این جدول آمده است. تعداد روز های مشاهداتی مطابق ستون دوم است. فراوانی تجمعی و احتمال وقوع آن ها به ترتیب در ستونهای ۴ و ۵ نوشته شده است. حال چنانچه در یک کاغذ احتمالات اعداد ستون ۴ نسبت به ستون ۱ (حد وسط گروه‌ها) رسم شود منحنی تداوم جریان به دست می‌آید. در این جدول بالاترین فراوانی مربوط به گروه ۲۹۹/۹-۲۰۰ است. لذا متوسط این گروه (۲۵۰ متر مکعب در ثانیه) به عنوان دبی نمای رودخانه نامیده می‌شود.

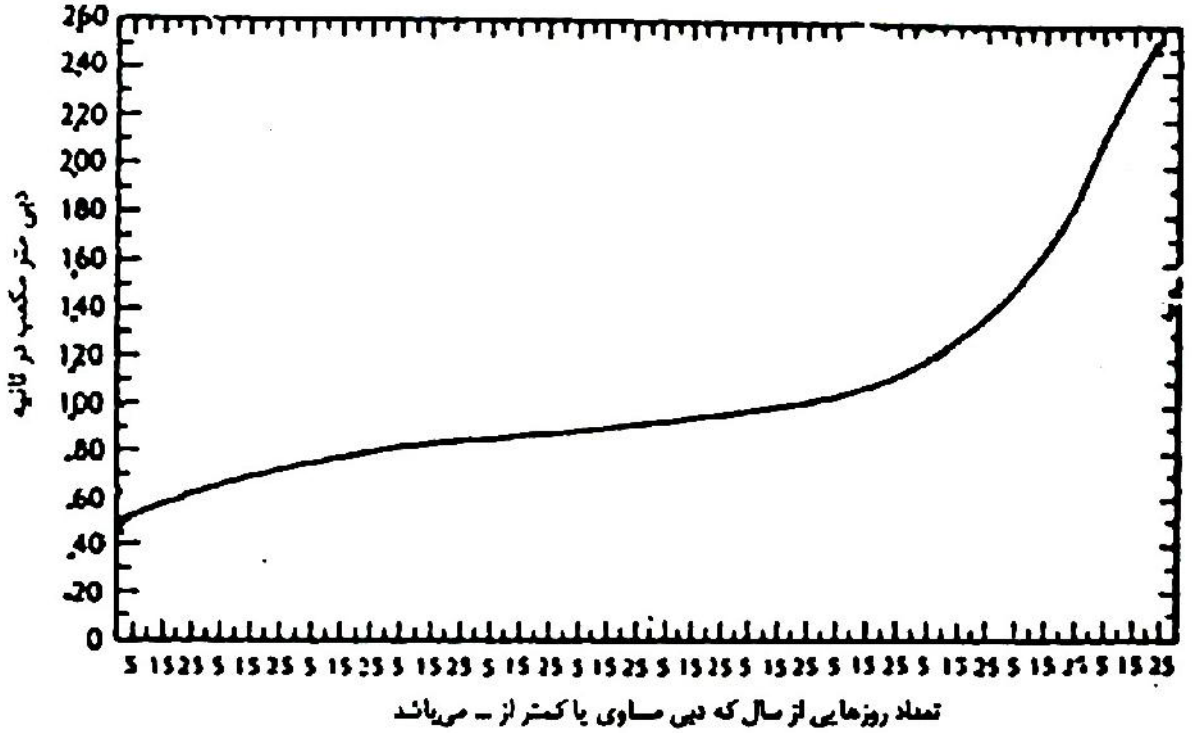
در نمودار ۵-۱۸ منحنی تداوم جریان روزانه یک رودخانه به صورت معمولی رسم شده است. مشاهده می‌شود که فقط ۱۰ درصد موارد (۳۶ روز از سال) ممکن است دبی این رودخانه از ۷۰۰ لیتر در ثانیه کمتر باشد ویا این که در ۷۵ درصد موارد (۲۷۳ روز از سال) متوسط دبی روزانه کمتر از یک مترمکعب در ثانیه است.

جدول ۵-۱۰ گروه بندی دبی رودخانه

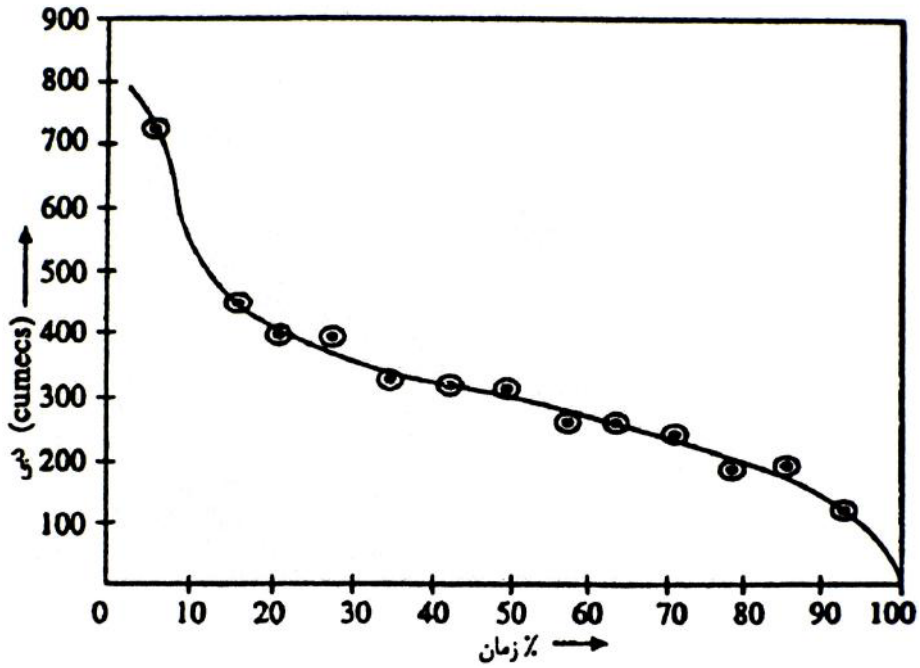
۱	۲	۳	۴	۵
ردیف	گروه بندی دبی‌ها m^3/sec	تعداد روزهای وقوع	فراوانی تجمعی	احتمال*
۱	0-99.9	62	62	16.9
۲	100-199.9	73	135	36.8
۳	200-299.9	105	240	65.5
۴	300-399.9	25	265	72.4
۵	400-499.9	44	309	84.4
۶	500-599.9	20	329	89.8
۷	600-699.9	15	344	93.9
۸	700-799.9	12	356	97.2
۹	800-899.9	6	362	98.8
۱۰	900-999.99	3	365	99.72

*** برآورد احتمال از رابطه $\frac{m}{n+1}$ (m شماره ردیف فراوانی تجمعی و n تعداد کل روزها (۳۶۵))، مثلا برای فراوانی تجمعی ۲۶۵ (ردیف ۴) $p = 265/(365+1)$ بدست می آید.**

منحنی تداوم جریان (دبی کلاسه) و تعیین دبی‌های شاخص (مانند دبی عادی، دبی میانه، دبی نرمال) در برنامه ریزی‌های آب رودخانه جهت استفاده شرب و یا احداث بندهای انحرافی (مورد استفاده در کشاورزی) حائز اهمیت بوده و معمولا در مطالعات هیدرولوژی رودخانه‌ها انجام می شود. مثلا اگر قرار باشد از آب رودخانه برای کشاورزی استفاده شود، از روی این منحنی می‌توان الگو و تراکم کشت را مشخص کرد و یا در استفاده از آب برای مصارف شهری کمبودها و مازاد آب را برآورد و نسبت به ذخیره سازی آب در مواقع مازاد اقدام کرد. برای این منظور منحنی دبی کلاسه غالبا مطابق نمودار ۵-۱۹ به صورت تغییرات دبی نسبت به درصدی از زمان که دبی برابر یا بیشتر از مقدار مورد نظر باشد رسم می‌شود. مثلا از این نمودار می توان دریافت که در ۳۰ درصد سال (۱۱۰ روز از سال) دبی رودخانه ۳۵۰ مترمکعب در ثانیه یا بیشتر است و یا در ۷۰ درصد ایام سال (۲۵۵ روز) دبی رودخانه از ۲۵۰ مترمکعب در ثانیه بیشتر است.

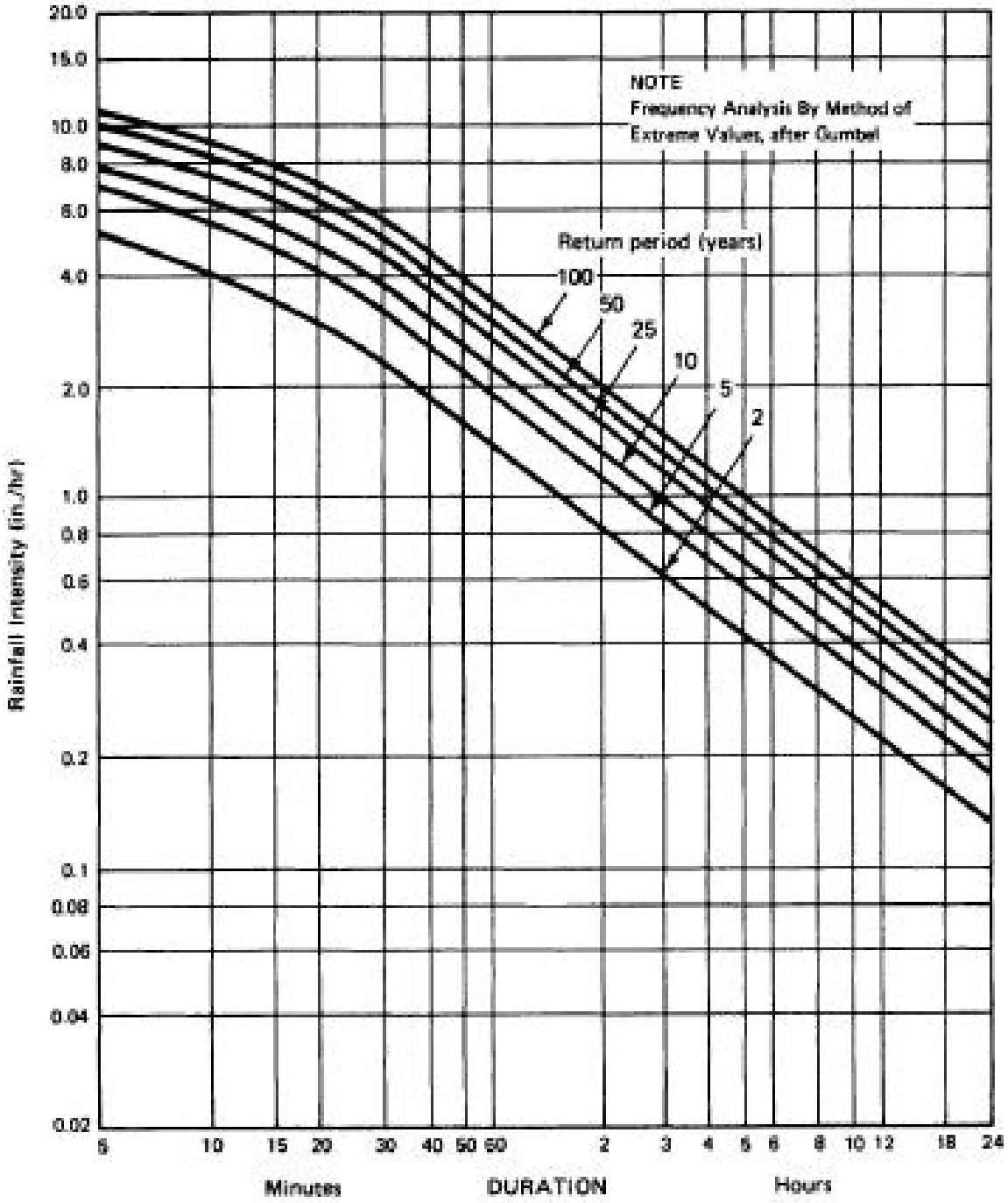


نمودار ۵-۱۸ منحنی تداوم جریان. تعداد ۳۶۵ روز سال در محور افقی (با درجه بندی ۱۰ روزه برای هر ماه (۵ و ۱۵ و ۲۵ روز)



نمودار ۵-۱۹ تیپ منحنی تداوم جریان

توجه شود که در نمودار ۵-۱۹ در محور افقی بجای درصد ایام سال (100-0) می‌توان تعداد روزهای سال (360-0) را قرار داد و یا محورعمودی اعداد را از زیاد به کم نوشت که در این صورت منحنی معکوس خواهد شد.



نمودار ۵-۲۰ منحنی های شدت-مدت-فراوانی حاصل از یک ایستگاه معین

مسائل

۵-۱ مقدار دبی در یک رودخانه در ساعات مختلف اندازه گیری شده است. در بین ساعات اندازه گیری که در جدول زیر نشان داده شده است سیلی به وقوع پیوسته است. هیدروگراف سیل را به سه روشی که قبلا ذکر شد تجزیه کنید و هیدروگراف مجزا شدهٔ سیل را در سه حالت رسم نمایید. مساحت حوضه ۱۰ کیلومتر مربع است.

زمان ساعت	۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰	۵۵	۶۰	۶۵
دبی (m^3/s)	۱۸	۱۶	۱۴	۳۵	۳۲	۲۵	۲۰	۱۸	۱۵	۱۳	۱۰	۸	۵	۳

۵-۲ متوسط دبی‌های روزانه یک رودخانه را در گروههای زیر دسته بندی 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/s)	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

۵-۳ زمان تمرکز در یک حوضه کمتر از مدت بارش است آیا رواناب محاسبه شده با روش استدلالی:

أ. کمتر از دبی اوج رواناب خواهد بود.

ب. در دبی اوج ثابت خواهد شد.

ج. مساوی دبی رودخانه خواهد بود.

د. محسوس نیست.

(جواب – ب)

۵-۴ در روش استدلالی ضریب رواناب برابر است با:

أ. کمتر از یک.

ب. یک.

ج. بیشتر از یک.

د. هیچکدام.

(جواب – الف)

۵-۵ اگر زمان تمرکز بیشتر از مدت بارش باشد با روش استدلالی:

أ. میتوان حجم رواناب را حساب کرد.

ب. می‌توان دبی رواناب را محاسبه کرد.

ج. می‌توان دبی اوج رواناب را محاسبه کرد.

د. نمی‌توان دبی اوج را محاسبه کرد.

(جواب – د)

فصل ششم: تحلیل هیدروگراف سیلاب

تحلیل هیدروگراف سیلاب بخش مهمی از مطالعات سیلاب را به خود اختصاص می‌دهد. مطابق یک تعریف، هیدروگراف (نمودار تغییرات دبی در مقابل زمان) در یک مقطع رودخانه (آبراهه) نموداری است که در آن عکس العمل حوضه آبریز نسبت به بارش در خروجی آن (که حوضه آبریز آن در بالادست آن مقطع رودخانه قرار دارد) تصویر می‌شود. بدین ترتیب، می‌توان از هیدروگراف سیلاب برای برآورد سیلاب هایی که در آینده روی خواهد داد نیز استفاده نمود. یکی از هدف های عمده در هیدرولوژی مهندسی برآورد این هیدروگراف است که به عنوان هیدروگراف طراحی هم مطرح می شود. در این مورد، با تحلیل مقادیر اندازه گیری (مشاهداتی) هیدروگراف سیلاب در خروجی حوضه آبریز و بارش های انجام گرفته روی حوضه آبریز بالادست می توان هیدروگراف واحد حوضه آبریز را استخراج نمود. سپس، می توان هیدروگراف موردنظر، که در آینده احتمال وقوع آن است، را بدست آورد. هیدروگراف طراحی بدست آمده می تواند در طراحی سازه های آبی مورد استفاده قرار گیرد.

۶-۱ هیدروگراف واحد

از مهمترین قدمهایی که در تجزیه و تحلیلهای هیدرولوژی و تهیه هیدروگراف طرح برداشته شده است، مفهوم هیدروگراف واحد (unit hydrograph) است که برای اولین بار در سال ۱۹۳۲ توسط یک مهندس آمریکایی به نام شرمن (Sherman) پیشنهاد گردید. برحسب تعریف، هیدروگراف واحد (UH) هیدروگراف رواناب مستقیمی است که ارتفاع هیتوگراف بارش مازاد آن یک واحد (مثلا ۱۰ میلیمتر) باشد. یعنی اگر حجم رواناب این هیدروگراف (مساحت زیر هیدروگراف) بر سطح حوضه تقسیم شود ارتفاع حاصله یک واحد شود. این واحد می‌تواند سانتی متر، میلی متر و یا اینچ انتخاب شود. در تعریف هیدروگراف واحد لازم است مدت بارش مازاد نیز مشخص شود. یعنی ارتفاع یک واحد رواناب مستقیم مربوط به چه مدت از بارش مازاد است. بنابراین هیدروگراف واحد می‌تواند مثلا ۱، ۲، ۳ و یا چند ساعته باشد. هیدروگراف واحد T ساعته یعنی هیدروگرافی که از T ساعت بارش مازاد واحد حاصل شده و ارتفاع رواناب مستقیم آن نیز واحد (مثلا ده میلی متر) باشد. اولین بار شرمن برای ارتفاع بارش مازاد واحد از واحد اینچ استفاده نمود که واحدهای سانتی متر و میلی متر هم به کار برده می‌شود. توجه شود که در هیدروگراف واحد ارتفاع رواناب مستقیم (بارش مازاد) مد نظر است نه ارتفاع کل بارش.

هیدروگراف رواناب مستقیم حاصل تفاضل هیدروگراف رواناب مشاهداتی رودخانه و جریان پایه آن است. هیتوگراف بارش مازاد نیز از تفاضل هیتوگراف کل بارش و هیتوگراف تلفات بارش بدست می آید. توجه شود در این تعریف، برای مدت بارش (T) مقداری مشخص شده است که همواره لازم است مقدار آن پس از کلمه هیدروگراف واحد ذکر شود. بنابراین، هر حوضه در مقطع خروجی خود (یا در هر مقطع رودخانه) می‌تواند بی‌نهایت هیدروگراف واحد داشته باشد، مانند هیدروگراف واحد یک ساعته، هیدروگراف واحد ۲ ساعته و هیدروگراف واحد نیم ساعته. ولی هیدروگراف واحد T ساعته برای هر حوضه آبریز در مقطع خروجی آن (یا در هر مقطع رودخانه ای) منحصر به فرد است.

با داشتن هیدروگراف واحد T ساعته یک حوضه آبریز می توان از آن هیدروگراف طرح را که قرار است سازه آبی براساس آن طراحی شود، با فرض برابری مدت گام زمانی (ضربان) بارش با مدت (T) هیدروگراف واحد، بدست آورد. بنابراین تهیه هیدروگراف واحد حوضه برای مدت (تداوم) های مختلف از اقدامات مهم در هیدرولوژی است. هیدروگراف واحد یا از روی هیدروگراف‌های سیلاب اندازه گیری شده حوضه استخراج می‌شود و در صورت نبود این نوع هیدروگراف ها، باید هیدروگراف واحد مصنوعی حوضه آبریز را استخراج نمود که شرح آن در کتب هیدرولوژی آمده است.

۶-۱-۱ محدودیت‌های تئوری هیدروگراف واحد

کاربرد تئوری هیدروگراف واحد با دو محدودیت اساسی، یکی در یکنواخت فرض کردن شدت بارش مازاد در زمان و دیگری یکنواخت فرض کردن بارش در کل سطح حوضه روبرو است. اغلب بارش‌ها چه به صورت زمانی و چه مکانی، به ویژه در حوضه‌های بزرگ، یکنواخت نبوده و لذا تئوری هیدروگراف واحد اصولا در حوضه‌های آبریز کوچک قابل کاربرد است. برای حوضه‌های آبریز بزرگ، نیاز است که آنرا به زیر حوضه‌های کوچکتر تقسیم و در هر زیر حوضه از هیدروگراف واحد مربوط به خود استفاده کرد. هیدروگراف واحد برای حوضه‌های با مساحت کمتر از (km^2) ۵۰۰۰ به کار می رود. همچنین تئوری هیدروگراف واحد برای مساحت‌های بسیار کوچک نیز مناسب نیست. عموما توصیه می‌شود در حوضه‌هایی به مساحت ۴.۵ تا ۲۵۰۰ کیلومتر مربع از هیدروگراف واحد استفاده شود. در عمل تبدیل بارش مازاد به رواناب مستقیم، بر خلاف تئوری هیدروگراف واحد، خطی نبوده و می‌تواند خطایی در برآورد شکل و یا دبی اوج هیدروگراف سیلاب، برای هیتوگراف‌های ترکیبی ایجاد کند. فرض خطی بودن سیستم هیدروگراف واحد در کتب هیدرولوژی تشریح شده است.

همچنین اصل تغییر ناپذیری با زمان (که در هیدروگراف واحد لحاظ می شود)، به دلیل تغییرات فصلی در مشخصات حوضه‌های آبریز (مانند تغییر کاربری اراضی توسط انسان و تغییر مشخصات توپوگرافی حوضه به مرور زمان)، همواره صادق نبوده و می‌تواند خطایی را در ثابت فرض کردن هیدروگراف واحد t ساعته در طول زمان ایجاد کند. از طرف دیگر،

وقتی قسمت اعظم بارش به صورت برف باشد، نمی‌توان از روش هیدروگراف واحد استفاده نمود، زیرا فرآیند تبدیل برف به رواناب، دارای یک مرحله میانی تبدیل برف به آب و سپس به رواناب است، که تابع عوامل محیطی و جوی از جمله دما و رقوم ارتفاعی سطح پوشیده از برف است.

۶-۱-۲ استخراج هیدروگراف واحد

استخراج هیدروگراف واحد از روی هیدروگراف سیل را با ذکر یک مثال بهتر می‌توان تشریح کرد. فرض کنید بارشی به مدت یک ساعت روی حوضه‌ای بوقوع پیوسته و هم زمان دبی رودخانه نیز اندازه گیری شده است (ستون دوم جدول ۶-۱). اگر دبی پایه رودخانه طی مدت ۱۲ ساعت اندازه گیری سیل مطابق ارقام ستون سوم این جدول باشد از تفاضل ارقام ستون ۲و۳ رواناب مستقیم حاصل از این بارش یک ساعته بدست می‌آید، که ارقام مربوطه در ستون چهارم این جدول آمده است. هیدروگراف سیل رودخانه براساس ارقام ستون ۴ در نمودار ۶-۱ رسم شده است. حال با توجه به مقادیر رواناب در هر ساعت می‌توان حجم رواناب در هر ساعت و لذا حجم کل سیلاب را در مدت تداوم سیل از مجموع رواناب‌های ساعتی بدست آورد. حال چنانچه این حجم را بر سطح حوضه تقسیم کنیم ارتفاع رواناب بدست می‌آید. با توجه به وسعت حوضه فرض کنید ارتفاع رواناب ۱۴ میلی متر (۱/۴ سانتی متر) بدست آمده باشد. چون ارتفاع رواناب مستقیم این بارش ۱/۴ سانتی متر است، اگر اعداد ستون ۴ را بر ۱/۴ تقسیم شود نتیجه (ستون ۵ جدول مذکور) معرف ابعاد هیدروگراف برای ۱۰ میلی متر رواناب یعنی همان هیدروگراف واحد یک ساعته حوضه (یک سانتی متر ارتفاع رواناب) است. حال اگر این هیدروگراف به صورت مجزا رسم شود وضعیتی مانند منحنی خط چین در نمودار مذکور حاصل می شود با توجه به نقطه صفر در شروع هیدروگراف واحد، زمان بندی این هیدروگراف از شروع در ستون ۶ جدول مذکور آمده است.

جدول ۶-۱ تعیین ابعاد هیدروگراف واحد

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
زمان hr	دبی رودخانه m^3/s	دبی پایه m^3/s	رواناب مستقیم (2)-(3) m^3/s	دبی هیدروگراف واحد (4):1.4 m^3/s	زمان از شروع هیدروگراف واحد
1	110	110	0	0	
2	122	122	0	0	0
3	230	120	110	78.6	1
4	578	118	460	328.6	2
5	645	115	530	378.6	3
6	434	114	320	228.6	4
7	293	113	180	128.6	5
8	202	112	90	64.3	6
9	160	110	50	35.7	7
10	117	105	12	8.6	8
11	90	90	0	0	9
12	80	80	0		