- متوسط بارش سالانه، $P = 166\ mm$
- دمای متوسط سالانه حوضه $T = 12.2\ ^oC$

در حوضه دیگری بنام حوضه رودخانه سالار واقع در همین منطقه مشخصات فیزیکی و آبدهی سالانه آن بشرح زیر است.

- 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 اندازه گیریهای موجود ۴۰ میلیون متر مکعب
- متوسط بارش سالانه در رودخانه سالار $P = 250\ mm$
- دمای متوسط سالانه $T = 13.7\ ^oC$

**حل:** ضریب $K$ حوضه رودخانه سالار با استفاده از فرمول‌های زیر برآورد و سپس به حوضه مورد نظر تعمیم داده می شود.

$$S = \frac{H_{max} - H_{min}}{\sqrt{A}} = \frac{2.700 - 1.230}{\sqrt{2070}} = 0.03231$$

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

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

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

$$S = \frac{H_{max} - H_{min}}{\sqrt{A}} = \frac{2.787 - 1.100}{\sqrt{3230}} = 0.0296$$

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

$$W = A.R = (3230 \times 10^6) \times (0.88 \times 10^{-2}) = 28.42 \times 10^6\ m^3 = 28.42\,Mm^3$$

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

## ۳-۵ برآورد حداکثر دبی هیدروگراف سیلاب

در طراحی سازه‌های آبی علاوه بر برآورد حجم یا ارتفاع رواناب سیلابی حاصل از بارش های طوفانی (رگبار)، حداکثر شدت لحظه ای رواناب نیز مورد نظر است. در طراحی اغلب سازه های کوچک آبی (مانند پل های عبور سیلاب در رودخانه های خشک) صرفا برآورد حداکثر شدت اوج سیلاب (دبی اوج) مد نظر است. ساده ترین رابطه ای که برای تخمین این کمیت

بکار می رود معادله استدلالی (rational) نام دارد. یعنی چنانچه بارشی با شدت ثابت i روی حوضه مورد نظر با مساحت سطح حوضه A و مدت بارش برابر زمان تمرکز حوضه (یا بیشتر) ببارد، با فرض این که بارش تمام سطح A را در بر گیرد، حداکثر دبی رواناب با داشتن ضریب رواناب C از معادله زیر بدست می آید.:

$$Q = \frac{1}{36} C\ i A \qquad (۸-۵)$$

که i=شدت بارش (cm/h)، A=سطح حوضه (هکتار)، C=ضریب رواناب (جدول ۵-۳)، Q= حداکثر دبی رواناب ($m^3/s$).

چنانچه شدت بارش بر حسب میلی‌متر در ساعت و مساحت حوضه بر حسب کیلومتر مربع باشند دبی خروجی (Q) بر حسب مترمکعب در ثانیه عبارت خواهد بود از:

$$Q = 0.278 C\ i\ A \qquad (۹-۵)$$

**مثال ۵-۶:** از یک حوضهٔ آبریز که خاک آن از نوع شنی لومی‌است به عنوان مرتع استفاده می‌شود. شدت بارش طراحی (حاصل از منحنی های شدت-مدت-فراوانی) ۱۵ میلی‌متر در ساعت است. مطلوب است مقدار دبی اوج هیدروگراف سیلاب آن. شیب اراضی حوضه ۷ درصد است و مساحت حوضه ۲/۵ کیلومتر مربع است. زمان تمرکز حوضه برابر ۱/۵ ساعت فرض می شود. (از منحنی های شدت-مدت-فراوانی ایستگاه باران سنجی معینی که نزدیک محل طراحی سازه باشد برای برآورد شدت بارش طرح استفاده شده است. نمونه آن در انتهای فصل آمده است، نمودار **۵-۲۰**).

**حل:** از جدول ۵-۳ مقدار ضریب رواناب $C = 0.16$ بدست می‌آید. سپس حداکثر دبی هیدروگراف سیلاب برابر است با:

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

در این روش (استدلالی)T حداکثر دبی لحظه ای با این فرض محاسبه می‌شود که مدت بارش حداقل برابر زمان تمرکز حوضه باشد. یعنی شدت بارش در رابطه بالا (15) از مدت بارش برابر زمان تمرکز حوضه بدست می آید. برای این کار از رابطه IDF (شدت-مدت-فراوانی) و با داشتن دوره برگشت (فراوانی) استفاده می شود. در غیر این صورت (اگر مدت بارش کمتر از زمان تمرکز باشد) دبی حداکثر کمتر از مقدار مورد نظر خواهد بود. زیرا اگر مدت بارش کمتر از زمان تمرکز باشد، قبل از آنکه تمام سطح حوضه در رواناب مشارکت نماید بارش خاتمه پیدا کرده و لذا دبی به حداکثر ممکن نمی رسد.

روش دیگر برآورد حداکثر دبی، روش مدت–مساحت (time-area method) است. این روش پیشرفته تر از روش استدلالی است. با این روش وقتی شدت بارش در ساعت‌های مختلف تغییر کند، رواناب با دقت بالا قابل برآورد است. فرض

کنید در یک حوضه آبریز، بارشی به مدت چند ساعت ببارد و شدت بارش در دوره‌های زمانی t (مثلا یک ساعت) مطابق نمودار ۵-۲ به ترتیب $i_1$ و $i_2$ و $i_3$ و $i_4$، ... و $i_n$ باشد. در نمودار، خطوط هم زمان پیمایش خطوطی اند که نقاط همزمان تمرکز را به یکدیگر متصل می‌کنند. مقدار دبی خروجی حوضه در هر دوره با توجه به رابطه استدلالی عبارتست از:

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

$$Q_1 = 0.278C(A_1 i_1) \qquad (۱۰-۵)$$

- برای دورهٔ دوم $(t_2)$ که علاوه بر مساحت $A_1$، مساحت $A_2$ نیز در دبی لحظه ای دخالت دارد با توجه به اینکه مساحت $A_1$ نزدیک قسمت خروجی است لذا برای آن باید شدت بارش در ساعت دوم $(i_2)$ را در نظر گرفت و برای مساحت $A_2$ شدت مربوط به ساعت اول موثر بوده است. یعنی تاثیر مجموع این مساحت ها بصورت زیر است.

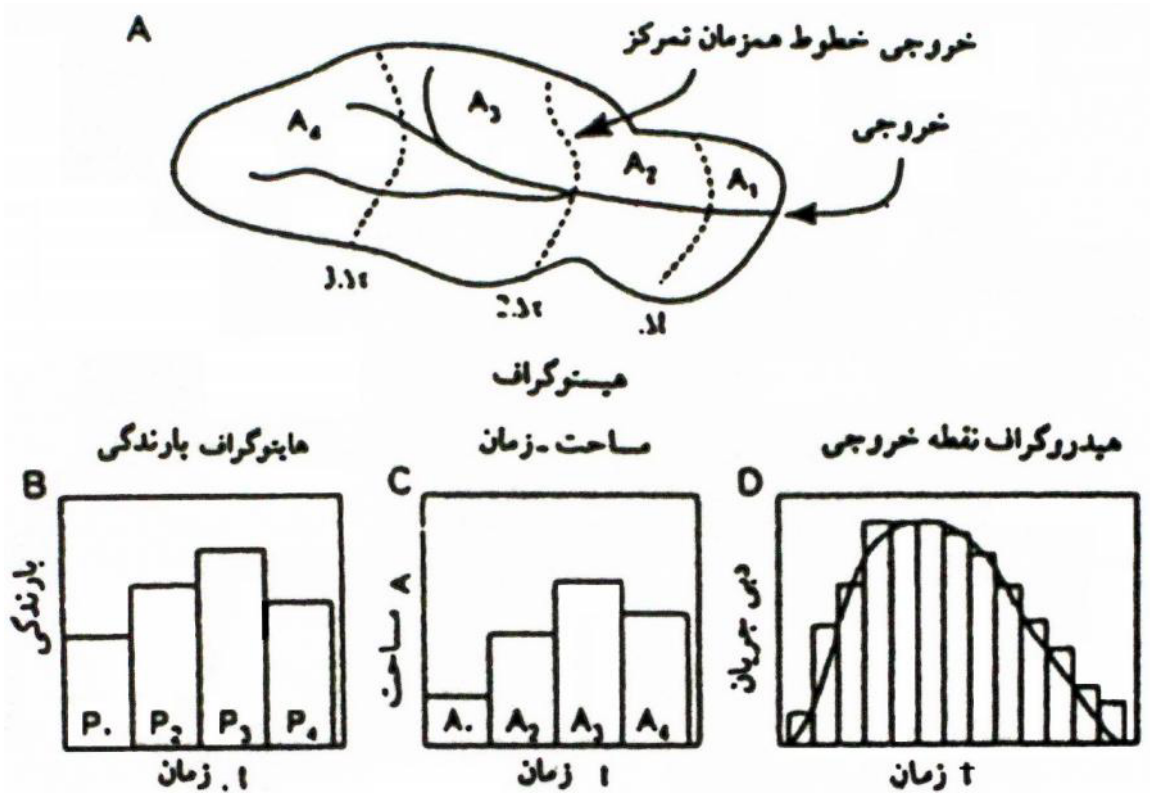
$$Q_2 = 0.278C(A_1 i_2 + A_2 i_1) \qquad (۱۱-۵)$$

و به همین روش در انتهای ساعت های سوم و چهارم خواهیم داشت که:

$$Q_3 = 0.278C(A_1 i_3 + A_2 i_2 + A_3 i_1) \qquad (۱۲-۵)$$

$$Q_4 = 0.278C(A_1 i_4 + A_2 i_3 + A_3 i_2 + A_4 i_1) \qquad (۱۳-۵)$$

دیده می‌شود دبی در حال افزایش است تا به زمان تمرکز حوضه برسد که در آن موقع دبی به حداکثر می‌رسد. اگر شدت بارش افزایش نیابد و مدت بارش بیشتر از زمان تمرکز حوضه باشد دبی هیدروگراف با قطع بارش کاهش می یابد.




**نمودار ۵-۲ روش مدت مساحت**

مزیت روش مدت- مساحت این است که در آن فرض یکنواخت بودن بارش در طول مدت بارش وجود ندارد. از طرف دیگر شدت بارش بستگی به مدت بارش داشته و برای ما پیش بینی مدت بارش از قبل مشخص نیست. از انجایی که در اکثر موارد پیش بینی حداکثر دبی، مورد نظر است برای تخمین حداکثر جریانی که از حوضه ممکن است خارج شود می‌توان چنین فرض نمود که مدت بارش برابر زمان تمرکز حوضه ($t_c$) باشد ولی شدت بارش در هر یک از دوره‌ها ($\Delta t$) از الگوی توزیع بارش منطقه پیروی کند. اگر تغییرات شدت بارش نسبت به زمان (هایتوگراف hyetograph) در دست باشد محاسبات بیشتر با واقعیت تطبیق خواهد داشت در غیر این صورت می‌توان از الگوهای مرسوم توزیع زمانی بارش استفاده کرد (جدول ۵-۵). روش ساده تر این است که فرض شود شدت بارش در هر ساعت کمتر از قبل بوده و کاهش آن متناسب با رابطه شدت – مدت بارش‌های منطقه باشد. مثلا برای زمان تمرکز ۳ ساعت، در ساعت اول بارش شدتی معادل حداکثر شدت بارش های یک ساعته و در ساعت سوم شدتی معادل حداکثر بارش های سه ساعته را برای آن فرض نمود. البته در واقع چنین نبوده و اگر بارش سه ساعته بطور پیوسته ببارد با توجه به مطالب فوق شدت آن در ساعات اول و دوم زیادتر از معمول لحاظ شده است. این می‌تواند به عنوان ضریب اطمینان در نظر گرفته شود. بدین ترتیب می‌توان حداکثر روانابی را که از حوضه خارج می شود با اطمینان زیاد پیش‌بینی نمود. برای این منظور به ترتیب عمل زیر انجام می‌گیرد:

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

$$t_c = 0.0003 L^{0.77} S^{-0.385} \qquad (۱۴-۵)$$

در این معادله $L$ طول حوضه در مسیر رودخانه اصلی بر حسب متر، $S$ شیب آبراهه اصلی (بر حسب متر بر متر) و $t_c$ بر حسب ساعت است. برای رسم خطوط هم زمان پیمایش ساده ترین روش استفاده از تعیین سرعت حرکت آب روی شیب حوضه و بدست آوردن فاصله ای است که آب در دوره زمانی مورد نظر طی می‌کند.

۲- از روی الگوی توزیع بارش منطقه مقدار و سپس شدت بارش را برای هر یک از دوره‌های زمانی $\Delta t_1$ و $\Delta t_2$ و ... برآورد کنید. الگوی پیشنهادی سازمان هواشناسی جهانی (WMO) برای توزیع مقدار بارش در طول بارش به شرح جدول ۵-۵ است. با استفاده از این الگو امکان تغییر مقدار و شدت بارش در هر کدام از این رودها امکان پذیر است.

۳- با روابط مدت – مساحت، دبی خروجی از حوضه را محاسبه کنید.

**مثال ۵-۷:** زمان تمرکز یک حوضه آبریز ۵ ساعت برآورد شده است. با توجه به منحنی شدت-مدت بارش و خطوط هم زمان پیمایش حوضه که در نمودار ۵-۳ رسم شده است حداکثر دبی که از این حوضه در اثر بارش ۸ ساعته خارج خواهد شد چقدر است (ضریب رواناب را ۰/۶ در نظر بگیرید).

**حل:** با توجه به این که زمان تمرکز $t_c = 5\,hr$ است و $\Delta t$ برابر یک ساعت انتخاب می‌شود $(\Delta t = 1\,hr)$ منحنی‌های هم زمان پیمایش حوضه را به ازای $\Delta t$های یک ساعته رسم می‌کنیم که در نمودار ۵-۳ ب نشان داده شده است. مساحت‌های محصور بین خطوط ایزوکرونال حوضه نیز در روی نمودار بر حسب کیلومتر مربع مشخص شده اند. حال از روی الگوی توزیع شدت بارش (نمودار ۵-۳ الف) شدت بارش در ساعات ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ را به دست آورده که بطور متوسط برابر خواهد بود با ۴۵، ۳۵، ۲۲، ۱۵ و ۹ میلی‌متر در ساعت. مقادیر دبی خروجی از حوضه در $\Delta t$های مختلف با توجه به رابطه $Q_2 = 0.278\,C\,i\,A$ به شرح زیر است.

**جدول ۵-۵ توزیع بارش در طول بارش بر اساس روش WMO**

| زمان بارش (٪) | | مقدار بارش (٪) |
|---|---|---|
| 0 | شروع | 0 |
| 10 | | 3 |
| 20 | | 13 |
| 30 | | 20 |
| 40 | | 16 |
| 50 | | 70 |
| 60 | | 78 |
| 70 | | 83 |
| 80 | | 90 |
| 90 | | 95 |
| 100 | پایان | 100 |

پس از $\Delta t$ (یک ساعت): $Q_1 = 0.278(0.6)(45)(10) = 75\,m^3/s$

پس از $2\Delta t$ (۲ ساعت): $Q_2 = 0.278(0.6)[(35)(10)+(45)(15)] = 170\ m^3/s$

پس از $3\Delta t$ (۳ ساعت): $Q_3 = 0.278(0.6)[(22)(10)+(35)(15)+(45)(12)] = 214\ m^3/s$

پس از $4\Delta t$ (۴ ساعت):

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

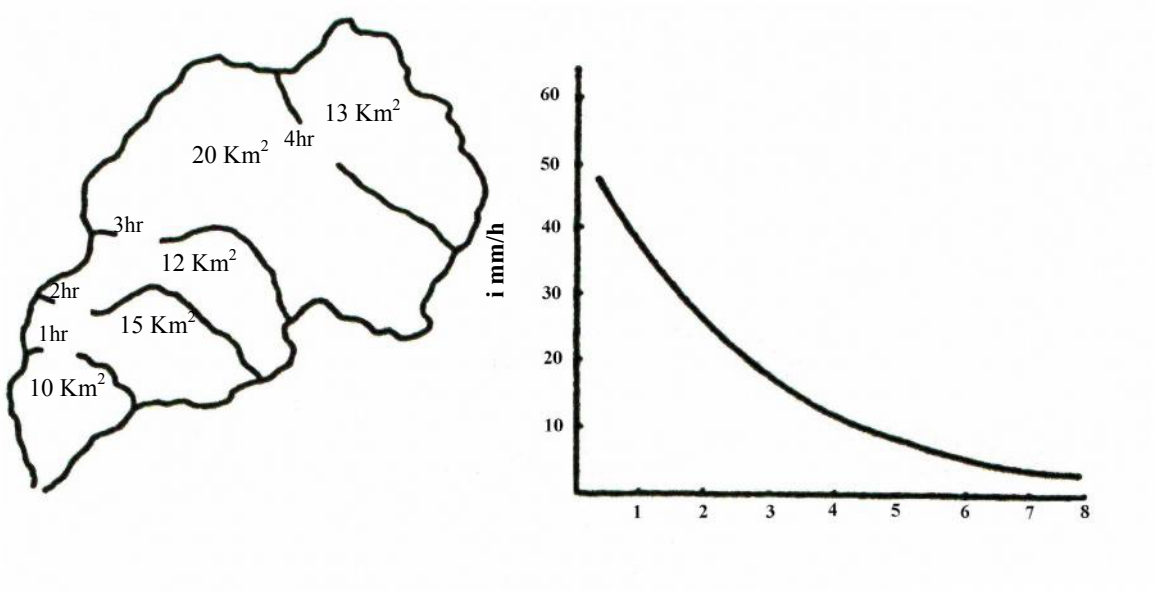
پس از $5\Delta t$ (۵ ساعت):

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

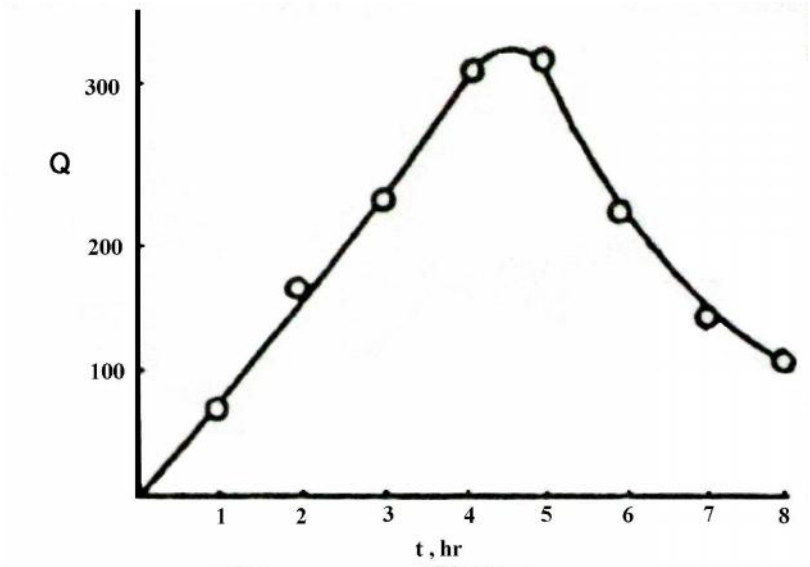
براین حداکثر دبی پس از ۵ ساعت معادل ۳۱۰ مترمکعب در ثانیه خواهد بود. چون بارش ۸ ساعت بطول انجامیده است شدت بارش در ساعات ۶، ۷، ۸ و به ترتیب $i_6 = 7\,mm/hr$، $i_7 = 6\,mm/hr$ و $i_8 = 5\,mm/hr$ است لذا رواناب در ساعتهای ۶، ۷، ۸ به ترتیب عبارت خواهد بود از:

$$Q_6 = 0.278(0.6)[(7)(10)+(9)(15)+(15)(12)+(22)(20)+(35)(13)] = 213\ m^3/sec$$
$$Q_7 = 0.278(0.6)[(6)(10)+(7)(15)+(9)(12)+(15)(20)+(22)(13)] = 143\ m^3/sec$$
$$Q_6 = 0.278(0.6)[(5)(10)+(6)(15)+(7)(12)+(9)(20)+(15)(13)] = 100\ m^3/sec$$

مشاهده می‌شود که دبی مرتب در حال نزول است. بطوریکه اگر منحنی تغییرات Q نسبت به $\Delta t$های مختلف رسم شود، مشاهده می شود که دبی ابتدا افزایش یافته، پس از ۵ ساعت به حداکثر می‌رسد و سپس دوباره کاهش می‌یابد. یعنی بالاترین مقدار دبی در زمانی ک معادل زمان تمرکز حوضه است رخ می‌دهد (نمودار ۵-۴).




**نمودار ۵-۳-الف- منحنی شدت – مدت، نمودار ۵-۳-ب- حوضه آبریز و منحنیهای ایزوکرون**




**نمودار ۵-۴**

در معادله استدلالی آنچه مهم است تخمین ضریب C و شدت بارش (I) است. شدت بارش تابعی از مدت بارش و دوره برگشت آن است. اگر مقدار بارش (F) و مدت (t) معلوم باشد ساده ترین روش برای برآورد شدت بارش (با درجه اطمینان بالا) بجای تقسیم F بر t استفاده از رابطه $I = F / 2 + 1 / t$ است. مثلا اگر مدت بارش ۳ ساعت و مقدار آن ۲۶ میلی‌متر باشد با استفاده از رابطه فوق شدت بارش ۱۳/۳ mm/h در ساعت خواهد بود در حالیکه با تقسیم F بر t مقدار آن ۸/۶ mm/h بدست می‌آید. اما اگر فقط مدت زمان تمرکز در اختیار باشد توصیه می‌شود برای تخمین شدت بارش و استفاده از آن در معادله استدلالی از معادلات زیر استفاده شود. در این روابط I بر حسب mm/h و t بر حسب min است.

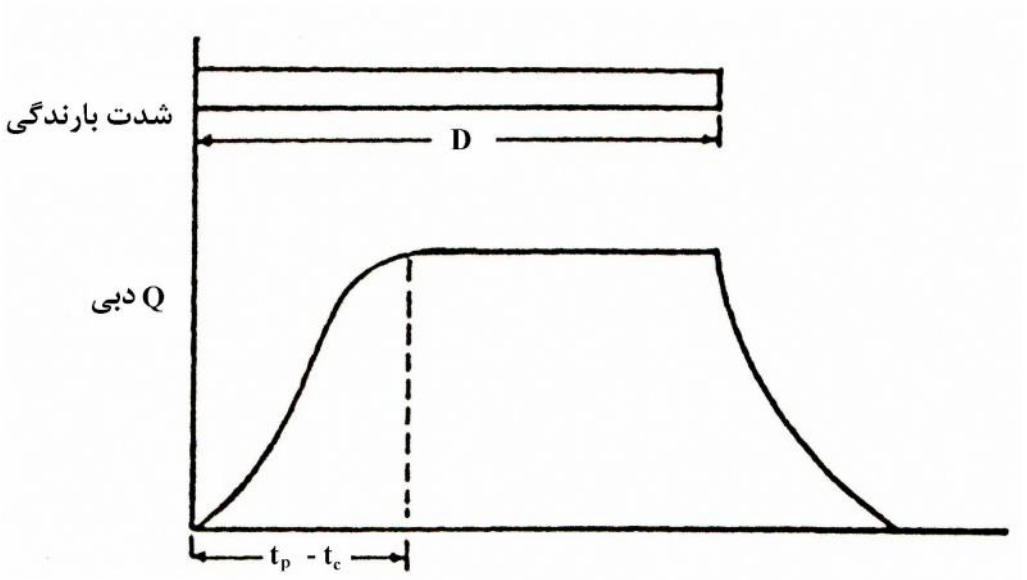
- برای بارش‌های معمولی $I = 30.48 / t^{0.5}$
- برای بارش‌های معمولی تا شدید $I = 63.8 / t^{0.687}$
- برای بارش‌های آرام و زمستانی $I = 15.24 / t^{0.5}$
- برای بارش‌های با دورهٔ بازگشت ۱۰ سال $I = (1045 / t)^{0.5}$
- برای بارش‌های با دورهٔ بازگشت ۱۵ سال $I = (2090 / t)^{0.5}$
- برای بارش‌های با حداکثر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

مثلا اگر زمان تمرکز ۲۵ min باشد، شدت بارش با این روابط به ترتیب ۶/۱، ۶/۹، ۳/۱، ۶/۵، ۹/۱، ۱۰/۸ mm/h می شود.

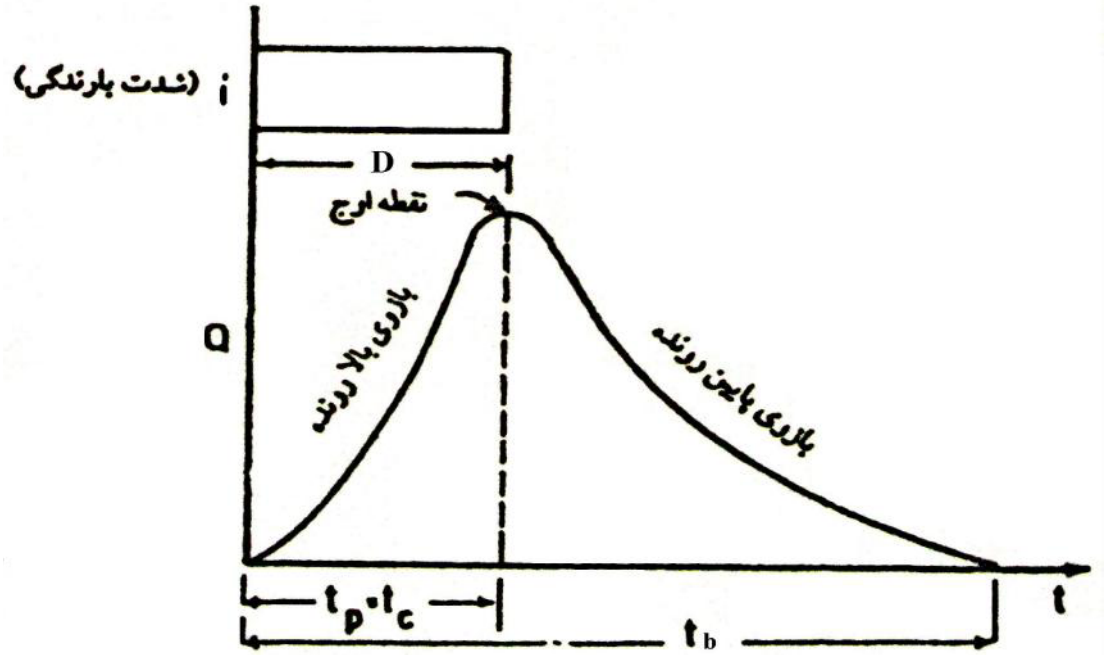
## ۵-۴ برآورد تمامی شکل هیدروگراف سیلاب

هیدروگراف نموداری معرف تغییرات دبی رواناب نسبت به زمان است. قبلا گفته شد که اگر روی یک حوضه آبریز (با زمان تمرکز $t_c$) بارش یکنواختی به مدت D ساعت ببارد و $D > t_c$ باشد دبی خروجی از حوضه بتدریج افزایش می‌یابد و در زمانی برابر زمان تمرکز حوضه به حداکثر خود می‌رسد. تا زمانی که بارش ادامه دارد دبی ثابت باقی مانده ولی بلافاصله پس از قطع بارش دبی نیز تقلیل می‌یابد. چنین منحنی که تغییرات دبی را در زمان های مختلف نشان می‌دهد هیدروگراف S نام داشته و زمان اوج $(t_p)$ با زمان تمرکز حوضه برابر می شود $(t_p = t_c)$. اما اگر مدت بارش برابر زمان تمرکز حوضه $(D = t_c)$ باشد، شکل هیدروگراف دارای اوج یا قله خواهد داشت. هیدروگراف می تواند پس از رسیدن به اوج نزول می کند. در چنین وضعیتی چون دوام بارش دقیقا برابر زمان تمرکز حوضه است زمان رسیدن به اوج نیز برابر زمان تمرکز خواهد بود (نمودار ۵-۶). این نمودار برای وضعیتی است که زمان تمرکز حوضه $t_c$ و تداوم بارش (D) با هم برابر است. $(t_c = D)$. در این وضعیت زمان رسیدن به اوج در هیدروگراف برابر زمان تمرکز و تداوم بارش است $(t_p = t_c = D)$.

اگر مدت بارش کوتاهتر از زمان تمرکز حوضه باشد باز هم هیدروگراف شکل زنگوله ای خود را حفظ خواهد کرد ولی هیدروگراف پس از یک تاخیر زمانی به نقطه اوج می‌رسد (نمودار ۵-۷) فاصله زمانی بین مرکز بارش تا نقطه اوج هیدروگراف را زمان تاخیر (lag time) می‌گویند. ($t_l$ در نمودار ۵-۷ و یا $t_{lag}$ در نمودار ۵-۸).




**نمودار ۵-۵ نمونه یک هیدروگراف برای وضعیت بارش با شدت ثابت و مدت طولانی تر از زمان تمرکز است**




**نمودار ۵-۶ نمونه یک هیدروگراف برای وضعیتی که زمان بارش مساوی زمان تمرکز است.**

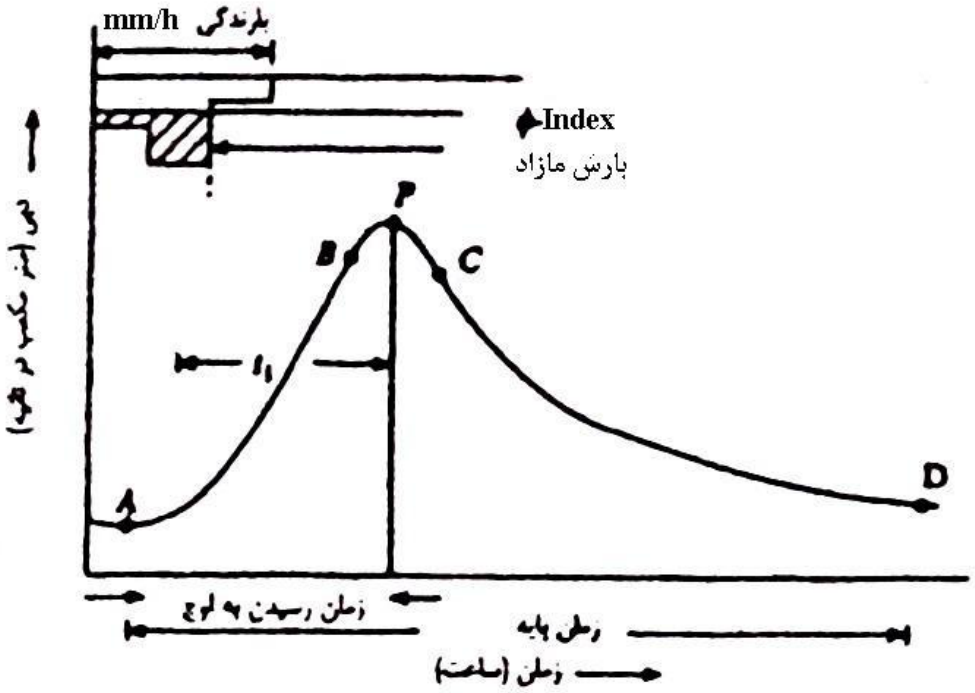
بطور کلی هر هیدروگراف از سه قسمت اساسی تشکیل شده است که عبارتند از:

- **بازوی بالارونده یا طغیان(rising limb)**: در هیتوگراف نمودار ۵-۷، مازاد بارش پس کسر تلفات به مقدار نمایه $\phi$ در سطح حوضه و رودخانه جاری شده و هیدروگراف نمودار را شکل می دهد. قسمت A تا B بازوی بالا رونده هیدروگراف

بوده که نشان دهنده چگونگی طغیان دبی خروجی از حوضه پس از بارش است. بدین ترتیب، تمام سطح حوضه در رواناب خروجی مشارکت نمود هیدروگراف به نقطه اوج می‌رسد.

- **اوج (peak) یا تاج (crest segment)**: حداکثر دبی هیدروگراف معمولا یک نقطه نیست بلکه بخشی از منحنی هیدروگراف است که در نمودار ۵-۷ از B تا C است. با این وجود همیشه هیدرولوژیست‌هاعلاقمند هستند که یک نقطه مشخص را مانند P در هیدروگراف مشخص کنند تا از آن به عنوان حداکثر دبی استفاده نمایند.

- **بازوی پایین رونده یا فروکش (recession limb)**: بخش C تا D را روی نمودار ۵-۷ بازوی پایین رونده هیدروگراف گویند. این بخش نشان دهنده چگونگی تخلیه آب ذخیره شده در حوضه پس از بارش است. یعنی تا نقطه C آب در حوضه ذخیره شده و از آن پس تخلیه می‌شود. نقطه D جایی است که از آن پس آب جاری در رودخانه عمدتا ناشی از آب‌های زیر زمینی و زیر سطحی است. فاصله زمانی A تا P روی نمودار ۵-۷ زمان رسیدن به اوج (time to peak) و فاصله ی A تا D زمان پایه هیدروگراف (base time) نام دارد. زمان رسیدن به اوج با $t_p$و زمان پایه هیدروگراف با علامت $t_b$ نشان داده می‌شود. چنانچه مدت بارش کمتر از زمان تمرکز باشد، از روی هیدروگراف زمان تمرکز قابل برآورد نیست. بطور تقریبی و تجربی فاصله زمانی بین انتهای بارش موثر تا نقطه ی عطف روی بازوی پایین رونده را می توان برابر زمان تمرکز گرفت (نمودار ۵-۸).




**نمودار ۵-۷ وضعیت هیدروگراف در شرایط که مدت بارش کوتاهتر از زمان تمرکز حوضه باشد.**