فصل پانزدهم

تحلیل هیدروگراف

مقدمه
هیدروگراف واحد
استخراج هیدروگراف واحد
تغییر مدت هیدروگراف واحد
هیدروگراف واحد لحظه‌ای
هیدروگراف واحد مصنوعی
هیدروگراف واحدمصنوعی اشنایدر
هیدروگراف واحدمصنوعی SCS
هیدروگراف واحد مثلثی
تخمین جریان‌ازهیدروگراف‌واحد
مسائل
منابع برای مطالعه بیشتر

۱۵-۱ مقدمه

تحلیل هیدروگراف بخش عمده‌ای از عملیات هیدرولوژی سیل را به خود اختصاص می‌دهد. همانطور که قبلاً گفته شد هیدروگراف نموداری است که در آن رفتار حوضه در مقابل بارندگی تصویر می‌شود، لذا می‌توان از آن برای مجسم کردن وضعیت سیلهایی که در آینده اتفاق خواهد افتاد استفاده نمود. یکی از هدفهای عمده در هیدرولوژی مهندسی به کمیت در آوردن هیدروگراف است. در این مورد از اندازه‌گیریهای آب‌سنجی قبلی استفاده شده و با تجزیه و تحلیل آنها هیدروگرافی که ممکن است در آینده انتظار وقوع آن وجود داشته باشد رسم می‌شود. این هیدروگراف بعنوان *هیدروگراف* طرح در کارهای آبی بکار برده می‌شود.

۱۵-۲ هیدروگراف واحد

از مهمترین قدمهایی که در تجزیه و تحلیلهای هیدرولوژی و تهیه هیدروگراف‌های طرح برداشته شده است مفهوم *هیدروگراف واحد* (unit hydrograph) است که برای اولین‌بار در سال ۱۹۳۲ توسط یک مهندس آمریکایی بنام شرمن (Sherman) پیشنهاد گردید. برحسب تعریف، هیدروگراف واحد (UH) هیدروگرافی است که ارتفاع رواناب در آن به اندازه یک واحد طول باشد. یعنی اگر حجم رواناب این هیدروگراف را برسطح حوضه تقسیم کنیم ارتفاع حاصله از آن

یک واحد گردد. این واحد می‌تواند سانتی‌متر، میلی‌متر و یا اینچ انتخاب شود. در تعریف هیدروگراف واحد لازم است مدت بارندگی نیز مشخص گردد، بطوریکه معلوم باشد ارتفاع یک واحد رواناب، مربوط به چه مدت از بارندگی است. بنابراین هیدروگراف واحد می‌تواند مثلاً ۱، ۲، ۳ و یا چند ساعته باشد. لذا هیدروگراف واحد t ساعته یعنی هیدروگرافی که از t ساعت بارندگی حاصل شده و در ضمن ارتفاع رواناب آن نیز مثلاً یک میلی‌متر باشد. شرمن برای ارتفاع رواناب واحد اینچ را بکار برد اما واحدهای سانتی‌متر و حتی میلی‌متر هم به کار برده می‌شود. بنابراین در سیستم متریک هیدروگراف واحد هیدروگرافی است که رواناب آن یک سانتی‌متر یا یک میلی‌متر باشد. توجه داشته باشید که در هیدروگراف واحد ارتفاع رواناب موردنظر است نه ارتفاع بارندگی، منظور از رواناب در این جا بارندگی مازاد است که به جریان سطحی تبدیل شده باشد و اگر رودخانه قبلاً دارای دبی پایه بوده است نباید آن را به‌عنوان رواناب مازاد بارندگی به حساب آورد. در این تعریف چون برای مدت بارندگی (t) مقداری مشخص نشده است پس هر حوضه می‌تواند بی‌نهایت هیدروگراف واحد داشته باشد، مانند هیدروگراف واحد یک ساعته، هیدروگراف واحد ۲ ساعته و ... .

ویژگی هیدروگراف واحد آن است که اگر برای یک حوضه هیدروگراف واحد را داشته باشیم قادر خواهیم بود از روی آن هیدروگراف طرح را که قرار است سازه آبی براساس آن طراحی شود، به شرط آنکه مدت بارندگی برابر همان مدت هیدروگراف واحد در نظر گرفته شود، بدست آوریم. بنابراین تهیه هیدروگراف واحد حوضه برای تداومهای مختلف از اقدامات اساسی در هیدرولوژی است. هیدروگراف واحد یا از روی هیدروگراف‌های معمولی حوضه که قبلاً اندازه‌گیری شده‌اند استخراج می‌شود و یا در صورت عدم وجود این هیدروگراف باید بصورت مصنوعی اقدام به تهیه آن نمود.

۱۵-۲-۱ استخراج هیدروگراف واحد

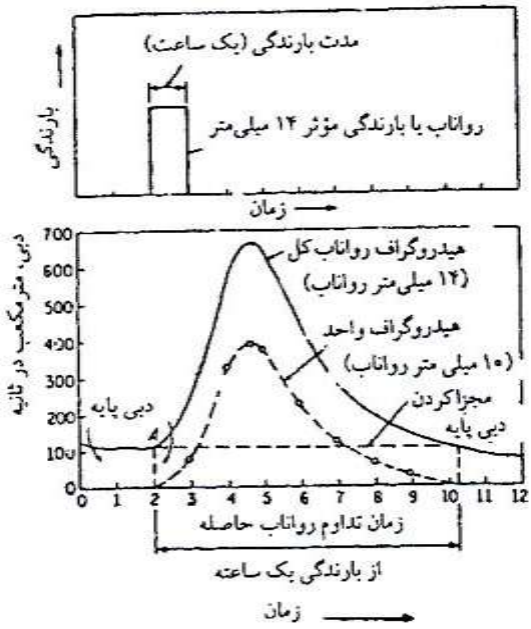
طریقه استخراج هیدروگراف واحد را از روی هیدروگراف سیل با ذکر یک مثال بهتر می‌توان تشریح کرد. فرض کنید بارانی به مدت یک ساعت روی حوضه‌ای بوقوع پیوسته و همزمان دبی رودخانه نیز اندازه‌گیری شده است که داده‌های اندازه‌گیری در ستون دوم جدول ۱۵-۱ نوشته شده است. اگر دبی پایه رودخانه طی مدت ۱۲ ساعت اندازه‌گیری سیل مطابق ارقام ستون سوم این جدول باشد از تفاضل ارقام ستون ۲ و ۳ رواناب مستقیم حاصل از این بارندگی یک ساعته بدست می‌آید، که ارقام مربوطه در ستون چهارم جدول نوشته شده است. هیدروگراف سیل رودخانه بر اساس ارقام ستون ۴ در شکل ۱۵-۱ 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 میلی‌متر بدست آمده باشد، چون ارتفاع رواناب مستقیم این بارندگی ۱۴ میلی‌متر است اگر اعداد ستون ۴ را بر ۱/۴ تقسیم کرده و نتیجه را در ستون ۵ بنویسیم ارقام این ستون، ابعاد هیدروگراف برای ۱۰ میلی‌متر (یک سانتی‌متر) رواناب خواهد بود که در واقع همان هیدروگراف واحد یک ساعته حوضه برای یک سانتی‌متر رواناب است. حال اگر این هیدروگراف را بصورت مجزا رسم کنیم وضعیتی مانند منحنی خط‌چین در شکل ۱۵-۱ بوجود خواهد آمد. این منحنی هیدروگراف واحد یک ساعته این حوضه خواهد بود که ارتفاع رواناب حاصله از آن یک واحد (یک سانتی‌متر) است. با توجه به نقطه صفر در شروع هیدروگراف واحد، زمان‌بندی این هیدروگراف ازشروع درستون ۶ جدول نوشته شده‌است.

جدول ۱۵-۱ تعیین ابعاد هیدروگراف واحد

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
زمان hr	دبی رودخانه m^3/sec	دبی‌پایه m^3/sec	رواناب مستقیم (2)-(3) m^3/sec	دبی هیدروگراف واحد (4):1.4 m^3/sec	زمان از شروع هیدروگراف واحد
1	110	110	0	0	
2	122	122	0	0	0
3	230	120	110	78.7	1
4	578	118	460	328	2
5	645	115	530	379	3
6	434	114	320	229	4
7	293	113	180	129	5
8	202	112	90	64.2	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		

بدست آوردن هیدروگراف طرح از روی هیدروگراف واحد نیز امکان‌پذیر است که جهت این امر باید بصورت عکس عمل نماییم. بعنوان مثال اگر در مورد قبل که هیدروگراف واحد یک ساعته حوضه را استخراج کرده‌ایم، بخواهیم برای باران یک ساعته‌ای به مقدار ۴۲ میلی‌متر هیدروگراف سیل را بسازیم، چنانچه ضریب رواناب را داشته باشیم کافی است این ضریب را در مقدار بارندگی ضرب کنیم تا رواناب مستقیم بدست آید. سپس ببینیم که مقدار رواناب مستقیم چند برابر رواناب مربوط به هیدروگراف واحد (که ۱۰ میلی‌متر انتخاب نموده‌ایم) است. حال بهمان نسبت ابعاد هیدروگراف واحد را بزرگ یا کوچک می‌نماییم. این موضوع در مثال ۱۵-۱ تشریح شده است.



شکل ۱۵-۱ روش استخراج هیدروگراف واحد

● مثال ۱۵-۱

هیدروگراف واحد یک ساعته حوضه‌ای مطابق ارقام ستون ۵ جدول ۱۵-۱ می‌باشد. چنانچه باران یک ساعته طرح ۴۲ میلی‌متر و ضریب رواناب حوضه ۰/۴۵ باشد هیدروگراف یک ساعته طرح در این حوضه را بدست آورید

حل

بارندگی = 42 mm

ضریب رواناب = 0.45

رواناب مستقیم = $(42) \times (0.45) = 18.9$ mm

ضریب تبدیل هیدروگراف واحد به هیدروگراف طرح = $\frac{18.9}{10} = 1.89$

بنابراین ابعاد هیدروگراف واحد را در ۱/۸۹ ضرب می‌کنیم تا هیدروگراف طرح مطابق ستون سوم جدول ۱۵-۲ بدست آید.

در این مثال مشاهده شد که برای بدست آوردن هیدروگراف طرح ابعاد هیدروگراف واحد را ۱/۸۹ برابر کردیم ولی بعضی اوقات برای بدست آوردن هیدروگراف ممکن است لازم شود ابعاد هیدروگراف واحد را کوچک کنیم. مثلاً اگر مقدار باران یک ساعته طرح ۱۵ میلی‌متر و ضریب رواناب ۰/۴۵ باشد رواناب مستقیم برابر ۶/۷۵ میلی‌متر است (۶/۷۵ = ۰/۴۵ × ۱۵) و لذا

ضریب تبدیل هیدروگراف واحد به هیدروگراف طرح ۰/۶۷۵ است ($\frac{۶/۷۵}{۱۰}$ = ۰/۶۷۵) که اگر در ابعاد هیدروگراف واحد ضرب شود هیدروگرافی کوچکتر از آن بدست خواهد آمد.

جدول ۱۵-۲ تهیه هیدروگراف طرح از هیدروگراف واحد

(1)	(2)	(3) = (2) × 1.89
زمان hr	دبی هیدروگراف واحد m^3/sec	دبی هیدروگراف طرح m^3/sec
0	0	0
1	78.7	148.6
2	328	619.92
3	379	716.31
4	229	432.81
5	129	243.81
6	64.2	121.33
7	35.7	67.47
8	8.6	16.25
9	0	0

● **مثال ۱۵-۲**

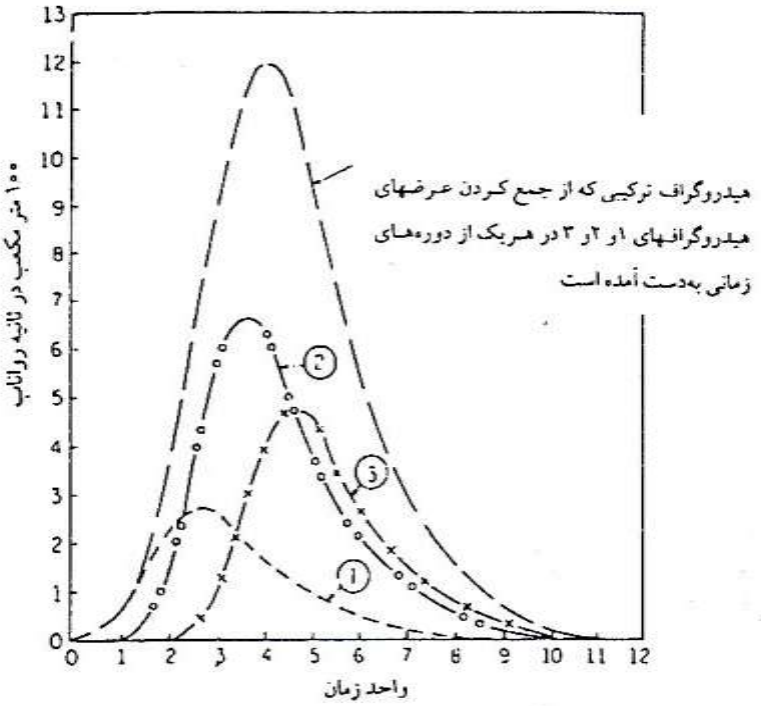
در جدول ۱۵-۱ هیدروگراف واحد یک ساعته برای حوضه‌ای استخراج شده است (ارقام ستون ۵). چنانچه سه رگبار متوالی که تداوم هر کدام یک ساعت ولی مقادیر رواناب آنها به ترتیب ۰/۷، ۱/۷ و ۱/۲ سانتی‌متر باشد در حوضه اتفاق افتد هیدروگراف کلّی حاصله از این سه بارندگی را بدست آورید.

حل

براساس ابعاد هیدروگراف واحد یک ساعته حوضه جدول ۱۵-۳را تشکیل و سپس شکل ۱۵-۲ را رسم می‌کنیم. در این جدول ارقام ستون ۲ ابعاد هیدروگراف واحد است. ستون ۳ شماره رگبارها در ساعت وقوعشان و ستون ۴ مقادیر رواناب هرکدام از رگبارها است. اگر هر رگبار را با توجه به زمان وقوع بارندگی بطور جداگانه در نظر بگیریم در واقع سه هیدروگراف مجزا حاصل می‌شود. چنانچه مقادیر رواناب هرکدام از رگبارها با توجه به موقعیت زمانی خود که در ساعتهای ۱ ، ۲ و ۳ اتفاق افتاده‌اند در ابعاد هیدروگراف واحد ضرب شوند ارقام ستونهای ۵ و ۶ و ۷ بدست می‌آید. مثلاً ارقام ستون ۵ از حاصلضرب ارقام ستون ۲ در ۰/۷ بدست آمده و ارقام ستون ۶ حاصلضرب ارقام ستون ۲ در ۱/۷ است که با یک ساعت تأخیر نسبت به ستون ۱ نوشته شده و همین طور ارقام ستون ۷ حاصلضرب ستون دوم در ۱/۲ است که با یک ساعت تأخیر نسبت به‌ارقام ستون ۶ در نظر گرفته شده‌اند. ستون هشتم این جدول مجموع ستونهای ۵،

جدول ۱۵-۳ کاربرد هیدروگراف واحد

				عرض نقاط هیدروگراف برای بارانهای ۱ و ۲ و ۳ و مجموع			
(۱)	(۲)	(۳)	(۴)	(۵)	(۶)	(۷)	(۸)
زمان	ابعاد هیدروگراف واحد	شماره رگبار	رواناب مازاد	باران ۱	باران ۲	باران ۳	مجموع
0	0			0			0
1	78.7	1	0.7	55	0		55
2	328	2	1.7	229	133.8	0	362.8
3	379	3	1.2	265	557.6	94.4	917.0
4	229			160	644	393.6	1197.6
5	129			90.5	389.3	454.8	934.6
6	64.2			44.9	219.3	274.8	539.0
7	35.7			24.8	109.1	154.8	288.7
8	8.6			6	60.7	77	143.7
9	0			0	14.6	42.8	57.4
					0	10.3	10.3



شکل ۱۵-۲ ترکیب هیدروگراف‌های حاصله از هیدروگراف واحد به روش نموداری

۶ و ۷ بوده که هیدروگراف کلی حاصل از سه رگبار یک ساعته را نشان می‌دهد. ترکیب این هیدروگراف‌ها نیز در شکل ۱۵-۲ نشان داده شده است.

● مثال ۱۵-۳

بارانی به مدت دو ساعت روی حوضه‌ای که مساحت آن ۵۰ کیلومترمربع است صورت گرفته ارتفاع بارش در این مدت ۱۲۸ میلی‌متر بوده است. دبی سیل ناشی از این بارندگی نیز اندازه‌گیری شده و مقادیر آن به شرح جدول زیر می‌باشد، هیدروگراف واحد ۲ ساعته این حوضه را بدست آورید. با فرض این که دبی پایه صفر باشد ضریب رواناب چقدر است.

t (hr)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Q (m^3/sec)	0	5	12.9	34.9	48.1	42.3	31.5	20.8	13.3	8.3	4.8	3	0

حل

برای استخراج هیدروگراف واحد ابتدا ارتفاع رواناب حاصله از این حوضه را محاسبه می‌کنیم. حجم رواناب مطابق با جدول ۱۵-۴ قابل محاسبه است در این جدول ارقام ستون اول زمان، ستون دوم دبی هیدروگراف، ستون سوم متوسط دبی در هر دوره (۵ ساعته) و ستون چهارم حجم رواناب در هر ۵ ساعت است که از حاصلضرب ارقام ستون ۳ در ۱۸۰۰۰ ثانیه (۳۶۰۰ × ۵) بدست آمده است. ارتفاع رواناب از تقسیم حجم رواناب بر سطح حوضه به دست می‌آید.

$$\text{حجم رواناب} = 4129200\ m^3$$

$$\text{سطح حوضه} = 50\ km^2 = 50 \times 10^6\ m^2$$

$$\text{ارتفاع رواناب} = \frac{\text{حجم رواناب}}{\text{سطح حوضه}} \times 1000 = \frac{4129200 \times 1000}{50 \times 10^6} = 82.5\ mm$$

ملاحظه می‌شود که ارتفاع رواناب ۸۲/۵ میلی‌متر است چون ارتفاع رواناب در هیدروگراف واحد ۱۰ میلی‌متر یا ۱ سانتی‌متر تعریف می‌شود. لذا ارقام ستون دوم جدول ۱۵-۴ را بر ۸/۲۵ = (۸۲/۵ / ۱۰) تقسیم نموده و در ستون پنجم می‌نویسیم. چنانچه ارقام ستون ۵ را در یک دستگاه محور مختصات رسم کنیم هیدروگراف واحد دو ساعته حوضه به دست می‌آید. بنابراین مشاهده می‌شود که بارانی معادل ۱۲۸ میلی‌متر روانابی برابر ۸۲/۵ میلی‌متر را تولید نموده و لذا ضریب رواناب ۰/۶۴ = $C = \frac{۸۲/۵}{۱۲۸}$ (یا ۶۴ درصد) است.

جدول ۱۵-۴ استخراج هیدروگراف واحد ۲ ساعته

1	2	3	4	5
زمان ساعت	دبی m^3/sec	متوسط دبی در دوره زمانی m^3/sec	حجم آب در هر دوره زمانی m^3/sec	ابعاد هیدروگراف واحد (m^3/sec)
0	0			0
		2.5	45,000	
5	5			0.6
		8.95	161,100	
10	12.9			1.6
		26.15	470,700	
15	39.4			4.8
		43.75	787,500	
20	48.1			5.8
		45.20	813,600	
25	42.3			5.1
		36.90	664,200	
30	31.5			3.8
		26.15	470,700	
35	20.8			2.5
		17.05	306,900	
40	13.3			1.6
		10.80	194,400	
45	8.3			1.0
		6.55	117,900	
50	4.8			0.6
		3.90	70,200	
55	3			0.4
		1.50	27,000	
60	0			0
			$\Sigma = 4,129,200$	

● **مثال ۱۵-۴**

در حوضه‌ای به وسعت ۵۰ کیلومتر مربع که هیدروگراف واحد دو ساعته آن مطابق جدول ۱۵-۴ محاسبه شده است بارانی به مدت ۲ ساعت و به ارتفاع ۶۲ میلی‌متر می‌بارد هیدروگراف ناشی ازاین باران را محاسبه کنید.

حل

با توجه به ابعاد هیدروگراف که در ستون دوم جدول ۱۵-۴ نوشته شده است و ارقام ستونهای ۳ و ۴ جدول مذکور چون حجم رواناب مطابق محاسباتی که در جدول ۱۵-۴ انجام شده است ۴،۱۲۹،۲۰۰ مترمکعب بوده و با توجه به وسعت حوضه (۵۰ کیلومترمربع) ارتفاع رواناب ۸۲/۵ میلی‌متر و ضریب رواناب ۰/۶۴ است، لذا از ۶۲ میلی‌متر بارندگی ۳۹/۶ میلی‌متر (۳۹/۶ = ۰/۶۴ × ۶۲) یا حدود ۴۰ میلی‌متر به رواناب تبدیل می‌شود که این مقدار ۴ برابر ارتفاع هیدروگراف واحد ۲ ساعته حوضه است. لذا برای بدست آوردن ابعاد هیدروگراف سیل ناشی از بارندگی باید ارقام ستون ۵ جدول ۱۵-۴ را در ۴ ضرب نمود تا هیدروگراف سیل ۲ ساعته مورد نظر بدست آید (جدول ۱۵-۵).

جدول ۱۵-۵ استخراج هیدروگراف طرح از هیدروگراف واحد ۲ ساعته

زمان (hr)	دبی هیدروگراف واحد (m^3/sec)	دبی هیدروگراف طرح m^3/sec
0	0	0
5	0.6	2.4
10	1.6	6.4
15	4.8	19.2
20	5.8	23.2
25	5.1	20.4
30	3.8	15.2
35	2.5	10
40	1.6	6.4
45	1.0	4
50	0.6	2.4
55	0.4	1.6
60	0	0

ارقام ستون سوم این جدول از حاصلضرب اعداد ستون دوم در ۴ بدست آمده‌اند.

از مطالب بالا چنین نتیجه‌گیری می‌شود که برای استخراج هیدروگراف واحد حوضه لازم است قبلاً یک هیدروگراف واقعی سیل برای همان مدت مورد نظر موجود باشد. به عبارت دیگر اگر بخواهیم هیدروگراف واحد یک ساعتهٔ حوضه‌ای را به دست آوریم باید قبلاً بارانی به مدت یک ساعت در حوضه باریده باشد و آمار اندازه‌گیری هیدروگراف آن موجود باشد تا بتوانیم براساس آمار موجود، هیدروگراف واحد یک ساعته را استخراج کنیم. این امر استفاده از کاربرد مستقیم هیدروگراف واحد را مشکل می‌سازد زیرا ممکن است اگر هدف مثلاً یک هیدروگراف واحد دو ساعته باشد هیچ‌وقت چنین بارانی در سطح حوضه اتفاق نیفتاده و یا در صورت وقوع اندازه‌گیری نشده باشد تا با استفاده از دبی حاصله از آن، هیدروگراف واحد دو ساعته حوضه را بدست آوریم. حال ببینیم در این شرایط چگونه باید عمل کرد.

الف - فرض کنید برای یک حوضه هیدروگراف واحد مثلاً ۲ ساعته را در اختیار داریم ولی هدف ما داشتن هیدروگراف واحد ۳ ساعته یا یک ساعته است یعنی هیدروگراف واحدی به غیراز هیدروگراف واحدی که در اختیار داریم.

ب - در وضعیتی که اصولاً هیچگونه هیدروگراف واحدی برای حوضه در اختیار نداریم ولی می‌خواهیم مثلاً هیدروگراف واحد ۲ ساعته برای آن داشته باشیم تا بتوانیم اگر بارانی به مدت ۲ ساعت روی این حوضه ببارد بدانیم سیل چگونه هیدروگرافی را بوجود خواهد آورد.

در حالت اول با روشهایی که ذیلاً بحث خواهد شد می‌توان مدت هیدروگراف واحد موجود را تغییر داده و از آن یک هیدروگراف واحد بلندمدت‌تر یا کوتاه مدت‌تر بسازیم اما برای حالت دوم باید اقدام به‌استخراج هیدروگراف‌های واحد ساخته‌ای یا مصنوعی کرد.

۱۵-۲-۲ تغییر مدت هیدروگراف واحد

الف - استخراج هیدروگراف واحد بلندمدت از یک هیدروگراف واحد کوتاه‌مدت اگر هیدروگراف حاصله از یک باران t ساعته حوضه‌ای موجود باشد، این امکان وجود دارد که از روی آن بتوان برای آن حوضه هیدروگراف واحد t ساعته یا nt ساعته بسازیم (n می‌تواند هر عدد صحیحی باشد). مثلاً اگر آمار هیدروگراف حاصله از باران دو ساعتهٔ حوضه‌ای در دست باشد ابتدا برای آن حوضه مطابق آنچه در بخش ۱۵-۲-۱ گفته شد هیدروگراف واحد دو ساعته می‌سازیم و سپس به ترتیبی که در مثال زیر آمده است از روی هیدروگراف واحد دو ساعته خواهیم توانست هیدروگراف واحد ۴، ۶، ۸، ... و یا بعبارت دیگر 2n ساعته حوضه را استخراج کنیم. این موضوع با ذکر یک مثال تشریح شده است.

مثال ۱۵-۵

باران یک ساعته‌ای که رواناب مازاد (مؤثر) آن (رواناب مستقیم) ۱/۴ سانتی‌متر است روی حوضه‌ای باریده است. دبی‌سیل در ساعات مختلف اندازه‌گیری شده است که مقادیر مشاهده شدهٔ آن در جدول ۱۵-۶ (ستون ۲) ذکر گردیده است با توجه به دبی پایهٔ رودخانه (ارقام ستون ۳) می‌خواهیم هیدروگراف واحد دو ساعتهٔ این حوضه را رسم کنیم.

حل

درابتدا باید هیدروگراف واحد یک ساعته را استخراج کنیم. همانطور که قبلاً این کار را انجام دادیم ، در اینجا نیز عملیات زیر را انجام می‌دهیم

(۱)- دبی پایه را از رواناب رودخانه کسر می‌کنیم تا رواناب مستقیم حاصل شود. این ارقام در ستون ۴ جدول ۱۵-۶ نوشته شده است.

(۲)- چون رواناب حاصله از بارندگی ۱۴ میلی‌متر است، لذا ارقام ستون ۴ را بر ۱/۴ تقسیم می‌کنیم تا دبی هیدروگراف واحد یک ساعته محاسبه شود. ارقام بدست آمده در ستون ۵ نوشته شده است. بدین‌ترتیب هیدروگراف واحد یک ساعته را بدست می‌آوریم. حال برای تبدیل آن به هیدروگراف واحد دو ساعته فرض می‌کنیم پس از خاتمهٔ این بارندگی یک ساعته باران مشابه جدیدی با همان خصوصیات و به مدت یک ساعت دیگر شروع شود، لذا هیدروگراف واحد آن مشابه هیدروگراف واحد باران یک ساعتهٔ قبلی ولی با یک ساعت تأخیر خواهد بود. ابعاد این هیدروگراف در ستون ۶ جدول با یک ساعت تأخیر نسبت به هیدروگراف اولی نوشته شده است. حال اگر ارقام ستون ۵ و ۶ را جمع کنیم و در ستون ۷ بنویسیم هیدروگراف دو ساعته‌ای به دست می‌آید که از جمع دو هیدروگراف یک ساعته حاصل شده است. اما ارتفاع رواناب در این هیدروگراف جدید حاصل جمع ارتفاع دو هیدروگراف واحد قبل است.

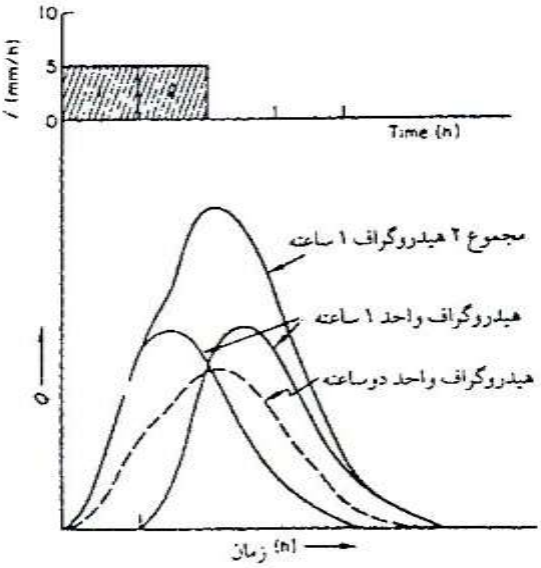
جدول ۱۵-۶ طریقهٔ استخراج هیدروگراف واحد دو ساعته از هیدروگراف یک ساعته

1	2	3	4	5	6	7	8
زمان ساعت	رواناب کل مترمکعب در ثانیه	دبی پایه مترمکعب در ثانیه	رواناب مستقیم یامؤثر،مترمکعب درثانیه	عرض هیدروگراف واحد ۱/۲ : (۴)	هیدروگراف واحد بایک ساعت تأخیر	جمع ستونهای ۵ و ۶ (۵) + (۶)	عرض هیدروگراف واحد دو ساعته ۲ : (۷)
1	110	110	0	0		0	0
2	122	122	0	0	0	0	0
3	230	120	110	78.7	0	78.7	39.3
4	578	118	460	328	78.7	406.7	203.3
5	645	115	530	379	328	707	353.5
6	434	114	320	229	379	608	304
7	293	113	180	129	229	358	179
8	202	112	90	64.2	129	193.2	96.6
9	160	110	50	35.7	64.2	99.9	49.9
10	117	105	12	8.6	35.7	44.3	22.1
11	90	90	0	0	8.6	8.6	4.3
12	80	80	0	0	0	0	0
					0	0	0

این دو هیدروگراف جمعاً ۲۰ میلی‌متر رواناب دارند که یک واحد یا ۱۰ میلی‌متر آن از هیدروگراف اول و یک واحد دیگر از هیدروگراف دوم تامین شده‌است. بنابراین اگر ارقام این هیدروگراف را بر ۲ تقسیم کنیم هیدروگراف واحد دو ساعته‌ای به دست می‌آید که رواناب حاصله از آن یک واحد (۱۰میلی‌متر) می‌باشد. بنابراین ارقام ستون ۸ جدول ابعاد هیدروگراف واحد دو ساعته‌ای را نشان می‌دهد که از هیدروگراف واحد یک ساعته ساخته شده است.

در شکل ۱۵-۳ روش استخراج هیدروگراف بلندمدت (۲ ساعته) از هیدروگراف کوتاه‌مدت (یک ساعته) به صورت نموداری نشان داده شده است. با انجام ترکیبات مختلف می‌توان انواع هیدروگراف‌های واحد را ساخت، مثلاً اگر هیدروگراف واحد یک ساعته را داشته باشیم می‌توانیم سه‌تای آنها را که هرکدام نسبت به قبلی یک ساعت تأخیر داشته باشد نوشته و سپس مجموع آنها را بر سه تقسیم کنیم. تا هیدروگراف واحد سه ساعته حوضه به دست آید.

ب - استخراج هیدروگراف واحد کوتاه‌مدت از یک هیدروگراف واحد بلندمدت برای تبدیل یک هیدروگراف واحد بلندمدت به کوتاه‌مدت از روش منحنی S یا **هیدروگراف مجموع** استفاده می‌شود. در این مورد ابتدا لازم است هیدروگراف مجموع یا S ساخته و سپس آن را به مدت موردنظر تبدیل کرد. اگر هیدروگراف واحد t ساعته‌ای را داشته باشیم و فرض شود که پس



شکل ۱۵-۳ طرز تهیهٔ هیدروگراف واحد ۲ ساعته از هیدروگراف واحد ۱ ساعته

از پایان t ساعت باران مشابه دیگری به همان مدت t ساعت ببارد و باز پس از تمام شدن آن، باران مشابه دیگری آغاز شود هیدروگراف‌های واحد این بارانها نیز با تأخیر بطور مشابه تکرار خواهند شد که اگر با همدیگر جمع شوند سرانجام دبی ثابت خواهد شد زیرا در واقع مثل آن است که باران یکنواختی بطور دائم ادامه دارد. برای مثال در جدول ۱۵-۷ هیدروگراف واحد باران ۴ ساعته‌ای را داریم که دبی آن در زمانهای مختلف در ستون دوم نوشته شده است (مترمکعب در ثانیه). باران مشابهی که پس از پایان این باران شروع شود هیدروگراف مشابهی با ۴ ساعت تأخیر ایجاد خواهد کرد که در ستون ۳ مقادیر مربوط به آن با ۴ ساعت تأخیر نوشته شده‌است.به‌همین‌ترتیب بارانهای دیگری که هرکدام با ۴ ساعت تأخیر می‌بارند دبی‌های آنها نیز با ۴ ساعت تأخیرنسبت‌به‌هم‌تکرارمی‌شود.دراین جدول ۶ باران ۴ ساعته متوالی تکرار شده‌اند تا اینکه سرانجام دبی ثابت شده است.مجموع‌این‌هیدروگراف‌ها، هیدروگراف مجموع یا S را تشکیل می‌دهد که در ستون ۸ جدول نوشته شده است. مشاهده می‌شود که در این ستون دبی در حد۲۰۷مترمکعب‌درثانیه ثابت باقی مانده است. اگر زمان پایهٔ هیدروگراف واحد t ساعته برابر T ساعت باشد برای رسیدن به هیدروگراف S لازم است حداقل تعداد T/t بار (در این مثال $۵ = \frac{۲۱}{۴}$) هیدروگراف واحد را با هم جمع کنیم تا هیدروگراف مجموع بدست آید. بنابراین اگر هیدروگراف واحد t ساعته‌ای را داشته باشیم که زمان پایهٔ آن T باشد لازم است حداقل تعداد T/t هیدروگراف‌های واحد را با زمان تأخیر t ساعت با هم جمع کنیم تا دبی ثابت شود (شکل ۱۵-۴).

جدول ۱۵-۷ تهیه هیدروگراف واحد کوتاه‌مدت از هیدروگراف واحد بلندمدت

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
زمان از شروع هیدروگراف h	دبی هیدروگراف m^3/sec	دبی هیدروگراف با ۴ ساعت تأخیر	دبی هیدروگراف با ۲ × ۲ ساعت تأخیر	دبی هیدروگراف با ۲ × ۳ ساعت تأخیر	دبی هیدروگراف با ۲ × ۴ ساعت تأخیر	دبی هیدروگراف با ۲ × ۵ ساعت تأخیر	هیدروگراف مجموع جمع ستونهای ۲ تا ۷	هیدروگراف مجموع با سه ساعت تأخیر	تفاضل دو هیدروگراف مجموع: تفاضل ستون ۸ و ۹	هیدروگراف واحد سه ساعت $\frac{۳}{۴}$ × ستون ۱۰
0	0	-	-				0	-	0	0
1	6	-	-				6	-	6	8
2	36	-					36	-	36	48
3	66	-					66	0	66	88
4	91	0	-				91	6	85	112
5	106	6	-				112	36	76	101
6	93	36	-				129	66	63	84
7	79	66	-				145	91	54	72
8	68	91	0	-			159	112	47	63
9	58	106	6	-			170	129	41	55
10	49	93	36	-			178	145	22	44
11	41	79	66	-			186	159	27	26
12	34	68	91	0	-		192	170	23	31
13	27	58	106	6	-		197	178	19	25
14	23	49	93	36	-		201	186	15	20
15	17	41	79	66	-		203	193	10	13.5
16	13	34	68	91	0	-	206	197	9	12.5
17	9	27	58	106	6	-	206	201	5	6.5
18	6	23	49	93	36	-	207	203	4	5.5
19	3	17	41	79	66	-	206	206	0	0
20	1.5	13	34	68	91	0	207	206	0	
21	0	9	27	58	106	6	206	207	0	
		6	23	49	93	36	207	206	0	
		3	17	41	79	66	206	207		
		1.5	13	34	68	91	207	206		
		0	9	27	58	106	206	207		

ستون ۱- زمان برحسب ساعت از شروع هیدروگراف واحد ۴ ساعته.

ستون ۲- دبی برحسب مترمکعب در ثانیه در هیدروگراف واحد ۴ ساعته.

ستون ۳- تکرار دبی‌های هیدروگراف واحد ۴ ساعته با ۴ ساعت تأخیر نسبت به ستون ماقبل.

ستون ۴- تکرار دبی‌های هیدروگراف واحد ۴ ساعته با ۴ ساعت تأخیر نسبت به ستون ماقبل.

ستون ۵- تکرار دبی‌های هیدروگراف واحد ۴ ساعته با ۴ ساعت تأخیر نسبت به ستون ماقبل.

ستون ۶- تکرار دبی‌های هیدروگراف واحد ۴ ساعته با ۴ ساعت تأخیر نسبت به ستون ماقبل.

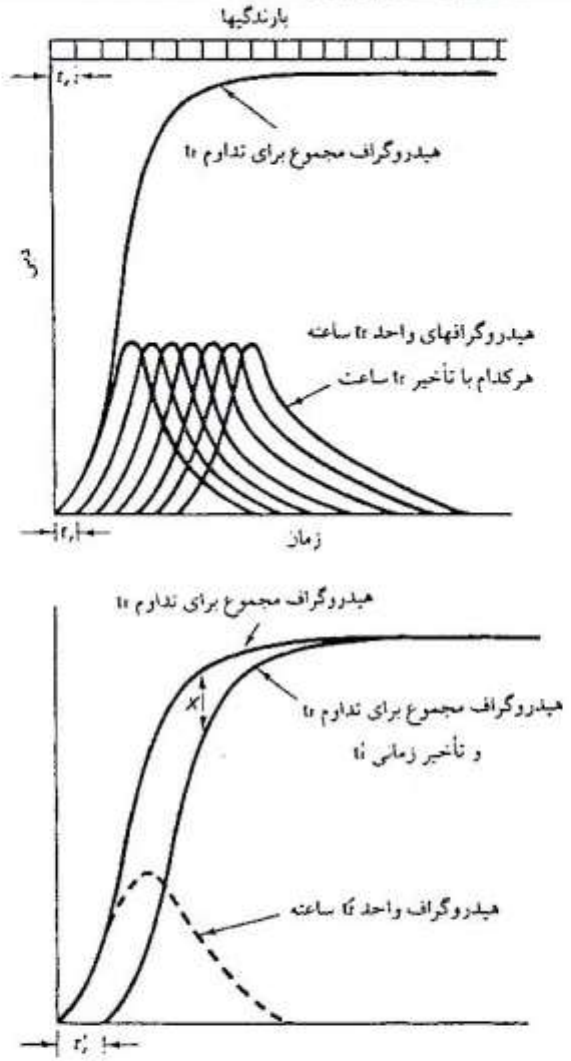
ستون ۷- تکرار دبی‌های هیدروگراف واحد ۴ ساعته با ۴ ساعت تأخیر نسبت به ستون ماقبل.

ستون ۸- هیدروگراف مجموع یا S حاصل جمع هیدروگراف ستونهای ۲ تا ۷.

ستون ۹- هیدروگراف مجموع با سه ساعت تأخیر نسبت به ستون قبل.

ستون ۱۰- اختلاف ستون ۸ و ۹.

ستون ۱۱- حاصلضرب ستون ۱۰ در $\frac{۳}{۴}$ که دبی هیدروگراف واحد سه ساعته می‌باشد.



شکل ۱۵-۴ مفهوم هیدروگراف مجموع (S-curve)

حال اگر بخواهیم از هیدروگراف واحد ۴ ساعته که منحنی مجموع را برای آن ساخته‌ایم مثلاً هیدروگراف واحد ۳ ساعته بسازیم، هیدروگراف S یا ستون ۸ جدول ۱۵-۷ را با سه ساعت تأخیر تکرار می‌کنیم (ستون ۹). پس از آن ستون ۹ را از ستون ۸ کسر می‌کنیم تا ارقام ستون ۱۰ که تفاضل آنهاست حاصل شود. ارقام ستون ۱۰ که تفاضل ستون ۹ و ۸ می‌باشد در واقع روانابی است که از سه ساعت بارندگی حاصل شده است ولی چون ستون ۱۰ از تفاضل دو ستون ۹ و ۸ به‌دست آمده است که هرکدام در مدت ۴ ساعت یک سانتی‌متر رواناب تولید می‌کردند اگر بخواهیم هیدروگراف ستون ۱۰ در مدت ۳ ساعت همان ۱۰ میلی‌متر رواناب را تولید کند باید

ارقام ستون ۱۰ را در $\frac{۴}{۳}$ ضرب کنیم. ستون ۱۱ از حاصلضرب ارقام ستون ۱۰در $\frac{۴}{۳}$ به دست آمده است که هیدروگراف واحد ۳ ساعته حوضه را نشان می‌دهد. این هیدروگراف ۳ ساعته در واقع از هیدروگراف واحد ۴ ساعته حاصل شده است. طرز استخراج هیدروگراف واحد کوتاه‌مدت از هیدروگراف واحد بلندمدت در شکل ۱۵-۴ به صورت نمودار نیز نشان داده شده است. حال اگر ارقام ستون ۹ را بجای این که با ۳ ساعت تأخیر تکرار کنیم با ۵ ساعت تأخیر تکرار کرده بودیم و ارقام ستون ۱۰ را که تفاضل هیدروگراف مجموع با ۵ ساعت تأخیر می‌باشد در $\frac{۴}{۵}$ ضرب می‌کردیم هیدروگراف واحد ۵ ساعته بدست می‌آمد. یعنی در واقع از هیدروگراف مجموع می‌توان هم هیدروگراف بلندمدت‌تر و هم هیدروگراف کوتاه‌تر مدت بدست آورد. زیرا به هر تعداد ساعت که بخواهیم می‌توانیم ستون ۹ را تشکیل دهیم.

بطور خلاصه برای این که از یک هیدروگراف t_r ساعته هیدروگراف t_r' ساعته را به روش منحنی S بسازیم ابتدا چند هیدروگراف t_r ساعته را با زمان تأخیر t_r با یکدیگر جمع می‌کنیم تاپس از ثابت شدن دبی منحنی S بدست آید. سپس منحنی S را با زمان تأخیر t_r' رسم می‌کنیم تا دو منحنی جداگانه مطابق شکل ۱۵-۴ بدست آید. اگر اختلاف این دو منحنی را در هریک از زمانهای مربوطه در $\frac{t_r}{t_r'}$ ضرب کنیم هیدروگراف حاصله هیدروگراف واحد t_r' ساعته بدست خواهد آمد.

● مثال ۱۵-۶

هیدروگراف واحد ۲ ساعته برای حوضه‌ای به شرح زیر در اختیار است هیدروگراف واحد ۶ ساعته این حوضه را به روش منحنی S بدست آورید.

زمان (hr)	0	1	2	3	4	5	6
Q (m^3/sec)	0	1.42	8.50	11.30	5.66	1.45	0

حل

چون t_r= 2 hr است و می‌خواهیم هیدروگراف واحد ۶ ساعته را استخراج کنیم (t_r'=6 hr) لازم خواهد بود اول هیدروگراف منحنی- S را بسازیم. برای این کار لازم است ۳ هیدروگراف ۲ ساعته را با زمان تأخیر ۲ ساعت با هم جمع کنیم زیرا:

$$n = \frac{(\text{ساعت})\,6}{(\text{ساعت})\,2} = 3$$

ستونهای ۳ و ۴ جدول ۱۵-۸ دو هیدروگراف مشابه ۲ ساعته هستند که هرکدام با زمان تأخیر ۲ ساعت نسبت به هیدروگراف اول (ستون ۲) رسم شده‌اند. مجموع هیدروگراف‌های ستونهای ۲ ، ۳ و ۴ در ستون ۵ نوشته‌شده‌است که‌مشاهده‌می‌شود.دبی‌تقریباًدر ۱۴/۱۶ مترمکعب‌درثانیه‌ثابت می‌شود. اگر جمع کردن این هیدروگراف‌ها را ادامه می‌دادیم این رقم ثابت باقی می‌ماند. که در

این ستون رقم ۱۴/۱۶ تکرار و نشان دهندهٔ مجموع ثابت هیدروگراف‌ها است. حال ارقام ستون ۵ را با ۶ ساعت تأخیر تکرار می‌کنیم که نتیجه در ستون ۶ نوشته شده است. چنانچه ارقام ستون ۶ را از ستون ۵ کسر کنیم (ارقام ستون ۷) آنچه به دست می‌آید ابعاد هیدروگرافی است که از اختلاف دو هیدروگراف که هر کدام در مدت ۲ ساعت یک واحد رواناب ایجاد کرده‌اند بدست آمده است و اگر بخواهیم این هیدروگراف در مدت ۶ ساعت یک واحد رواناب تولید کند باید ابعاد آن را در عدد $\frac{۲}{۶}$ ضرب کنیم ($\frac{tr}{tr'} = 2/6$) (ارقام ستون ۸).

جدول ۱۵-۸ هیدروگراف مجموع و تبدیل هیدروگراف واحد ۲ ساعته به هیدروگراف واحد ۶ ساعته

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
زمان (hr)	Q m^3/sec	UH× 1 با ۲ ساعت تأخیر	UH × 1 با ۲ ساعت تأخیر	هیدروگراف مجموع	هیدروگراف مجموع با ۶ ساعت تأخیر	هیدروگراف ۶ ساعته	هیدروگراف واحد ۶ ساعته
0	0			0		0	0
1	1.42			1.42		1.42	0.47
2	8.50	0		8.50		8.50	2.83
3	11.30	1.42		12.72		12.72	4.24
4	5.66	8.50	0	14.16		14.16	4.72
5	1.45	11.30	1.42	14.17		14.17	4.72
6	0	5.66	8.50	14.16	0	14.16	4.72
7		1.45	11.3	14.16	1.42	11.3	3.77
8		0	5.66	14.16	8.50	5.66	1.89
9			1.45	14.16	12.72	1.45	0.48
10			0	14.16	14.16	0	0
11					14.17	0	0
12					14.16		
13					14.16		
14					14.16		
15					14.16		
16					14.16		

ستون ۶: هیدروگراف مجموع که از جمع تعداد زیادی هیدروگراف با ۲ ساعت تأخیر بدست آمده است.
ستون ۷: هیدروگراف مجموع با ۶ ساعت تأخیر

۱۵-۳ هیدروگراف واحد لحظه‌ای

در مفهوم هیدروگراف واحد مشاهده شد که اگر در یک حوضه مثلاً هیدروگراف واحد ۲ ساعته آن را داشته باشیم برای هر باران ۲ ساعته‌ای که بخواهیم هیدروگراف سیل را بسازیم در واقع همان هیدروگراف واحد را بزرگ و کوچک می‌کنیم بدون آنکه زمان پایه آن را تغییر دهیم و یا اگر بخواهیم هیدروگراف‌های بلند مدت‌تر و کوتاه‌مدت‌تر بسازیم علاوه بر بزرگ و کوچک کردن ابعاد هیدروگراف زمان پایه آن را نیز تغییر می‌دهیم. از طرف دیگر هیدروگراف‌های واحدی که با تداومهای مختلف در یک حوضه ساخته می‌شوند شکل متفاوت دارند. در روشی که بنام ***هیدروگراف واحد لحظه‌ای*** (instantaneous unit hydrograph) پیشنهاد شده است و با علامت IUH نشان داده می‌شود اثر زمان از بین رفته و برای حوضه یک هیدروگراف واحد (unique) لحظه‌ای ساخته می‌شود و سپس آن را به هر هیدروگراف واحد دیگری که موردنظر باشد تبدیل می‌کنیم. برای ایجاد هیدروگراف واحد لحظه‌ای روشهای متعددی پیشنهاد شده است که روش ***تأخیر و تنسیق*** (lag and route technique) کاربردی‌ترین آنها است. که به نام روش کلارک (Clark) نیز مشهور می‌باشد. در این روش دو قدم اساسی برداشته می‌شود:

(۱)- تهیه هیدروگراف واحد لحظه‌ای از روی داده‌های بارندگی و رواناب،

(۲)- تبدیل هیدروگراف واحد لحظه‌ای به هیدروگراف واحد موردنظر.

در تهیه هیدروگراف واحد لحظه‌ای فرض می‌شود که در قسمت انتهایی رودخانه یک مخزن مجازی وجود داشته باشد تا آب در آن ذخیره گردد. حجم آب ذخیره شده در این مخزن (S) تابعی از دبی خروجی (O) از آن است یعنی:

$$S = K\,O \qquad (۱-۱۵)$$

که K ضریب فروکش کردن سیل یا نمایه وضعیت زه‌کشی حوضه است که قبلاً در مورد آن بحث شده است (فصل سیزدهم). ضریب K برحسب تجربه برابر است با ***مقدار دبی هیدروگراف در نقطه عطف بازوی پایین رونده تقسیم بر شیب منحنی هیدروگراف*** در نقطه عطف که در شکل ۱۵-۵ نشان داده شده است. مقدار ذخیره در یک دوره کوتاه‌مدت Δt که با ΔS نشان داده می‌شود تفاوت دبی ورودی و خروجی به این مخزن مجازی است لذا:

$$\frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{O_1 + O_2}{2} = \frac{\Delta S}{\Delta t} \qquad (۲-۱۵)$$

که I_1 و I_2 مقادیر دبی ورودی در ابتدا و انتهای دوره زمانی Δt و O_1 و O_2 مقادیر دبی خروجی در همین دوره زمانی است. از طرف دیگر با توجه به فرمول ۱۵-۱ خواهیم داشت:

$$\Delta S = KO_2 - KO_1 \qquad (۳-۱۵)$$

$$\Delta S = K(O_2 - O_1) \qquad (۴-۱۵)$$

$$\frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{O_1 + O_2}{2} = \frac{K(O_2 - O_1)}{\Delta t} \qquad (۵-۱۵)$$

اگر دبی ورودی در دوره زمانی (Δt) ثابت باشد ($I_1 = I_2$) با در نظر گرفتن این که :

$$C = \frac{2\Delta t}{2K + \Delta t} \qquad (۶-۱۵)$$

باشد، خواهیم داشت:

$$O_2 = C\, I_2 + (1 - C)O_1 \qquad (۷-۱۵)$$

و در حالت کلی برای هر دوره i می‌توان نوشت :

$$O_i = C\, I_i + (1 - C)O_{i-1} \qquad (۸-۱۵)$$

که در آن:

I_i = دبی ورودی در انتهای دوره i

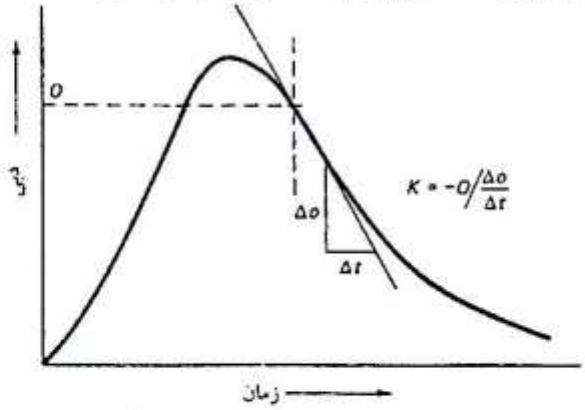
O_i = دبی خروجی در انتهای دوره i

O_{i-1} = دبی خروجی در انتهای دوره قبل

در روش کلارک برای ساخت هیدروگراف واحد از معادله ۱۵-۸ استفاده شده و باید عملیات زیر انجام شود.

(۱)- محاسبه زمان تمرکز حوضه (t_c) : برای این منظور یا از فرمول‌های تجربی استفاده می‌شود و یا از روی هیدروگراف فاصله بین انتهای بارندگی تا نقطه عطف بازوی پایین‌رونده هیدروگراف بعنوان زمان تمرکز در نظر گرفته می‌شود.

(۲)- بدست آوردن ضریب ثابت (K) : مقدار ضریب K عبارت‌است از دبی هیدروگراف در نقطه‌عطف بازوی پایین‌رونده تقسیم بر شیب منحنی هیدروگراف در نقطه عطف (شکل ۱۵-۵).



شکل ۱۵-۵ تعیین ضریب ثابت K برای استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای

(۳)- تعیین رابطه زمان - مساحت : روی نقشه حوضه خطوط ایزوکرونال را رسم کرده و مساحت بین این خطوط را بدست آورید. سپس روی یک دستگاه محور مختصات مطابق آنچه در مثال زیر آمده است روند افزایش مساحت حوضه را به ازاء افزایش زمان تمرکز بدست آورید. از روی این منحنی دبی ورودی در دوره i (I_i)که در معادله ۱۵-۸ از آن استفاده می‌شود از فرمول

زیر تخمین زده می‌شود.

$$I_i = 0.278 \frac{a_i}{\Delta t} \qquad (۹-۱۵)$$

که در آن:

I_i = دبی ورودی برحسب مترمکعب در ثانیه در انتهای دوره i

a_i = مساحت شرکت کننده در رواناب درانتهای دوره i (از منحنی زمان - مساحت).

Δt = دوره زمانی که هیدروگراف واحد برای آن ساخته می‌شود.

مجموع معادلات ۱۵-۹، ۱۵-۸ و ۱۵-۶ هیدروگراف واحد لحظه‌ای را بدست داده و از روی آن ابعاد هیدروگراف واحد Δt ساعته از فرمول زیر بدست می‌آید.

$$Q_i = 0.5(O_i + O_{i-1}) \qquad (۱۰-۱۵)$$

که Q_i مقدار دبی هیدروگراف واحد در لحظه i می‌باشد. برای روشن شدن مطلب جهت استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای به ذکر یک مثال می‌پردازیم.

● مثال ۱۵-۷

روی حوضه‌ای که در شکل ۱۵-۶ نشان داده شده و خطوط ایزوکرونال (هم پیمایش) آن نیز با دوره‌های یک ساعته رسم شده است بارانی بمدت ۲ ساعت صورت گرفته است که هیدروگراف آن در شکل ۱۵-۷ رسم شده است. اولاً هیدروگراف واحد لحظه‌ای این حوضه را بدست آورده، ثانیاً هیدروگراف واحد ۲ ساعته آن را استخراج کنید.

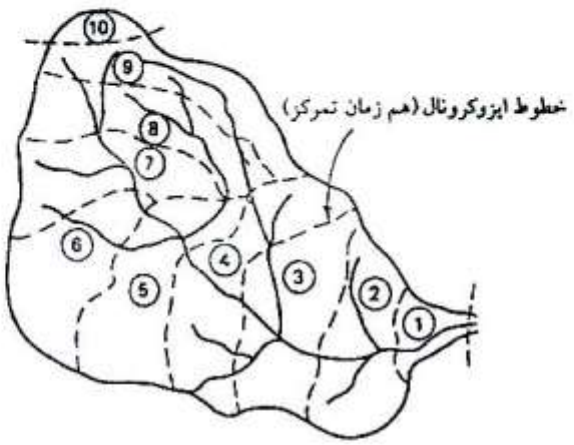
حل

(۱)- در منحنی هیدروگراف (شکل ۱۵-۷) نقطه عطف را روی بازوی پایین‌رونده پیدا کرده و سپس زمان تمرکز را که برابر فاصله این نقطه تا انتهای بارندگی است تخمین بزنید. این مقدار همانطور که در شکل نشان داده شده است برابر ۱۰ ساعت می‌باشد.

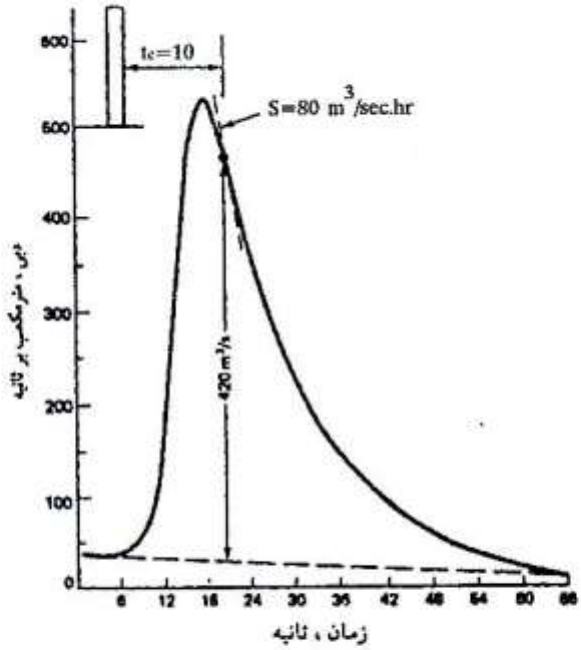
(۲)- شیب منحنی هیدروگراف را در نقطه عطف بدست می‌آوریم که مقدار آن برابر $s = 80\ m^3/sec.hr$ می‌باشد. ضمناً دبی در نقطه عطف نیز معادل ۴۲۰ مترمکعب در ثانیه است لذا ضریب K برابر خواهد بود با ۵/۲۵ زیرا

$$K = \frac{\text{مقدار دبی هیدروگراف در نقطه عطف}}{\text{شیب منحنی هیدروگراف در نقطه عطف}} = \frac{420\ m^3/sec}{80\ m^3/sec.hr} = 5.25\ hr$$

(۳)- با توجه به این که زمان تمرکز حوضه ۱۰ ساعت برآورد شده است، خطوط ایزوکرون (همزمان تمرکز) را طوری رسم کنید که حوضه به ۱۰ قسمت تقسیم شود. این خطوط روی شکل رسم شده‌اند سپس مساحت هرکدام از قسمتها را بدست آورده و تغییرات افزایش تجمعی سطح حوضه را نسبت به زمان تمرکز در یک دستگاه محور مختصات مانند شکل ۱۵-۸ رسم کنید. در این شکل افزایش زمان تمرکز برحسب درصد و افزایش مساحت برحسب کیلومترمربع می‌باشد.



شکل ۱۵-۶ حوضه آبریز و خطوط هم-پیمایش در مثال ۱۵-۷



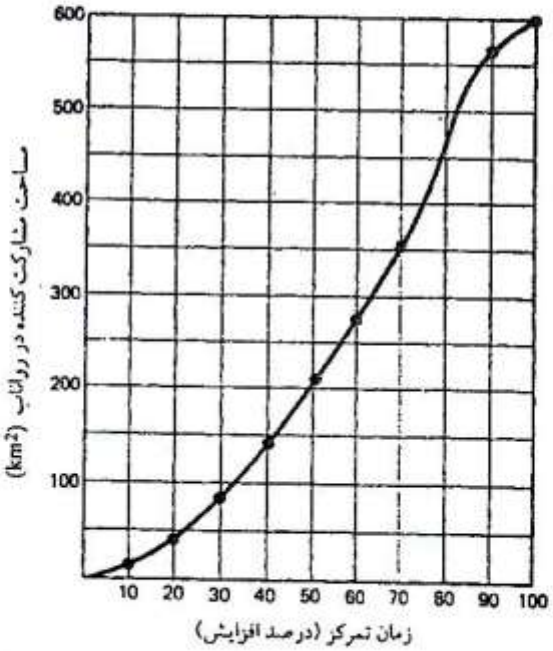
شکل ۱۵-۷ هیدروگراف باران ۲ ساعته در مثال ۱۵-۷

(۴)- دوره زمانی (Δt) را معادل تداوم بارندگی مورد نظر (۲ ساعت) انتخاب کنید.

(۵)- از روی شکل ۱۵-۸ مقادیر تجمعی مساحت را در هریک از دوره‌های زمانی ۰، ۲، ۴،

۶، ۸ و ۱۰ ساعت بدست آورید. این ارقام در ستون سوّم جدول ۱۵-۹ نوشته شده است.

(۶)- مساحت مربوط به هریک از دوره‌های زمانی (ai) را محاسبه کنید. نتیجه در ستون ۴ جدول ۱۵-۹ نوشته شده است مثلاً ۳۵ کیلومترمربع مربوط به مساحتی است که در طی دو ساعت رواناب آن به نقطه خروجی می‌رسد و یا ۱۰۵ کیلومتر مربع (۱۰۵=۳۵-۱۴۰) مربوط به دوره ۲ تا ۴ ساعت می‌باشد و ... .



شکل ۱۵-۸ رابطه مساحت شرکت کننده در رواناب نسبت به زمان تمرکز

(۷)- با توجه به معادله ۱۵-۹ چون $\Delta t = 2$ است لذا:

$$I_i = 0.278 \left(\frac{a_i}{2}\right) = 0.139(a_i)$$

با این فرمول a_i در هر دوره زمانی به I_i تبدیل می‌شود که در ستون ۵ جدول ۱۵-۹ نوشته شده است.

(۸)- با داشتن $\Delta t = 2$ hr و $K = 5.25$ ضریب C را بدست می‌آوریم.

$$C = \frac{2\Delta t}{2K + \Delta t} = \frac{2(2)}{2(5.25) + 2} = 0.32$$

بنابراین O_i برابر خواهد بود با:

$$O_i = CI_i + (1 - C)O_{i-1} = 0.32(I_i) + 0.68(O_{i-1})$$

چون در اولین دوره زمانی O_{i-1} برابر صفر است لذا در دوره زمانی اول خواهیم داشت:

$I_{i-1} = O \qquad O_{i-1} = 0$

$I_i = 4.9$ $O_i = ?$

در نتیجه O_i برابر است با:

$O_i = 0.32\ (I_i) + (1\text{-}0.32)\ O_{i-1}$

$O_i = 0.32(4.9) + (0.68)(0) = 1.57$

جدول ۱۵-۹ محاسبه هیدروگراف واحد به روش کلارک

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
شماره	زمان (ساعت)	مساحت تجمعی (کیلومترمربع)	مساحت هر دوره‌زمانی ai (km^2)	I (m^3/sec)	IUH, Oi (m^3/sec)	هیدروگراف واحد۲ ساعته Qi(m^3/sec)
1	0	0	0	0	0	0
2	2	35	35	4.9	1.57	0.79
3	4	140	105	14.6	5.74	3.66
4	6	275	135	18.8	9.92	7.83
5	8	460	185	25.7	15.00	12.46
6	10	595	135	18.8	16.22	15.61
7	12				11.03	13.63
8	14				7.50	9.27
9	16				5.10	6.30
10	18				3.47	4.29
11	20				2.36	2.92
12	22				1.60	1.98
13	24				1.09	1.35
14	26				0.74	0.92
15	28				0.50	0.62
16	30				0.34	0.42
17	32				0.23	0.29
18	34				0.16	0.20

و در دوره زمانی دوم:

$I_{i-1} = 4.9$ $O_{i-1} = 1.57$

$I_i = 14.6$ $O_i = ?$

لذا خواهیم داشت:

$O_i = 0.32(I_i) + 0.68(O_{i-1})$

$O_i = 0.32(14.6) + 0.68(1.57)$

$O_i = 4.67 + 1.067 = 5.74$

به همین ترتیب مقادیر O_i برای تمام دوره‌های زمانی محاسبه می‌شود که در جدول ۱۵-۹ در ستون ۶ نوشته شده است. این ارقام ابعاد هیدروگراف واحد لحظه‌ای می‌باشند:

(۹)- از روی معادله $Q_i = 0.5(O_{i-1} + O_i)$ ارقام ستون ۶ را می‌توانیم مورد استفاده قرار داده و ابعاد هیدروگراف واحد ۲ ساعته را بدست آوریم. مثلاً برای ۲ ساعت اول:

$Q_i = 0.5(0 + 1.57) = 0.79$

و برای دوره دوم:

$Q_i = 0.5(1.57 + 5.74) = 3.66$

والخ که ارقام محاسبه شده در ستون ۷ جدول نوشته شده است. بدین ترتیب هیدروگراف واحد ۲ ساعته حوضه بدست می‌آید.

۱۵-۴ هیدروگراف واحد مصنوعی

در صورتی که از حوضه هیچگونه آمار اندازه‌گیری باران و دبی وجود نداشته باشد تا بتوان براساس آنها برای آن هیدروگراف واحد را ایجاد کرد باید به روشهای تجربی اقدام به تهیه ***هیدروگراف‌های واحد ساخته‌ای یا هیدروگراف‌های مصنوعی*** (synthetic unit hydrograph) نمود. هیدروگراف واحد مصنوعی (SUH) براساس خصوصیات فیزیکی حوضه ساخته می‌شود که در این مورد روشهای زیادی ارائه شده است. اما دو روش عمده که در هیدرولوژی کاربرد فراوان دارد عبارتند از ***روش اشنایدر*** (Snyder) و ***روش سازمان حفاظت خاک امریکا*** (SCS).

۱۵-۴-۱ هیدروگراف واحد مصنوعی اشنایدر

یکی از کارشناسان گروه مهندسی ارتش امریکا (اشنایدر) روشی را پیشنهاد کرد که برطبق آن می‌توان بعضی از مشخصه‌های هیدروگراف واحد را به دست آورد. از روی این مشخصه‌ها هیدروگراف واحد حوضه رسم می‌شود. بعبارت دیگر براساس روش اشنایدر برای هر حوضه می‌توان مشخصات نقاطی را از هیدروگراف بدست آورد که از روی آنها بتوان هیدروگراف واحد حوضه را رسم کرد. این مشخصه‌ها عبارتند از

- زمان رسیدن به نقطهٔ اوج (t_p).
- مدت بارندگی که هیدروگراف واحد برای آن محاسبه می‌شود (t_D).
- دبی اوج هیدروگراف (Q_p).
- زمان تأخیر حوضه (t_l). زمان تأخیر فاصله زمانی بین مرکز بارندگی (موثر) تا نقطهٔ اوج دبی است. در روش اشنایدر فرض براین است که زمان تأخیر فقط بستگی به حوضه داشته و تابع بارندگی نمی‌باشد.
- پهنای هیدروگراف برای نقطه‌ای که دبی آن ۷۵ درصد دبی اوج باشد (W_{75}).
- پهنای هیدروگراف برای نقطه‌ای که دبی آن ۵۰ درصد دبی اوج باشد (W_{50}).

- پایه هیدروگراف (t_b) در نقطه‌ای که دبی صفر است (یعنی زمان پایهٔ هیدروگراف)،

بدین‌ترتیب برای رسم هیدروگراف واحد اشنایدر علاوه بر نقطه شروع ۶ مشخصه دیگر در اختیار خواهد بود که این نقاط با مهارت متخصص هیدرولوژی طوری باید بهم وصل شوند که سطح زیر منحنی هیدروگراف برابر یک واحد (یک میلی‌متر) رواناب گردد. بنابراین روش اشنایدر در تهیه هیدروگراف واحد یک حوضه بدست آوردن مشخصات ۶ نقطه از آن هیدروگراف می‌باشد. حال با توجه به‌این مطالب ابتدا طرز استخراج هیدروگراف واحد اشنایدر را تشریح کرده و سپس با ذکر یک مثال آن را بهتر توضیح خواهیم داد. در این مورد عملیات زیر گام به گام انجام می‌شود.

الف - زمان تأخیر حوضه (t_l) را از فرمول زیر (۱۵-۱۱) محاسبه کنید.

$$t_l = C_t(L.L_{ca})^{0.3} \qquad (۱۱-۱۵)$$

که در آن:

t_l = زمان تأخیر برحسب ساعت

C_t = ضریب مربوط به شیب حوضه که مقدار آن بین ۱/۴ تا ۱/۷ متغیر است. که ۱/۴ مربوط به حوضه‌های کوهستانی و ۱/۷ مربوط به حوضه‌های مسطح است.

L = طول آبراهه یا رودخانهٔ اصلی حوضه از نقطهٔ خروجی تا انتهای حوضه (کیلومتر)

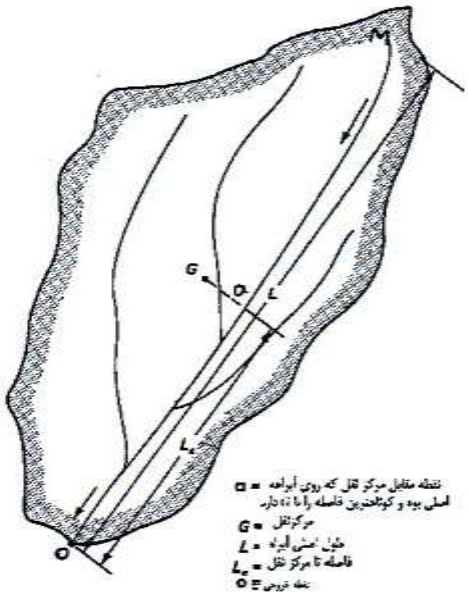
L_{ca} = طول آبراههٔ اصلی از نقطهٔ خروجی تا نقطه‌ای از آبراههٔ اصلی که با مرکز ثقل حوضه کمترین فاصله را داشته باشد (کیلومتر). مثلاً در شکل ۱۵-۹ نقطهٔ C مرکزثقل حوضه و نقطهٔ a در روی رودخانهٔ اصلی کوتاهترین فاصله را با آن دارد. لذا در این حوضه L_{ca} = Oa درواقع نقطهٔ a محل تقاطع خط عمودی است که از نقطهٔ C بر رودخانهٔ اصلی فرود می‌آید.

بنا به پیشنهاد تایلر (Taylor) و شوارز (Schworz) مقدار ضریب C_t را می‌توان از فرمول زیر که از روی آزمایش در ۲۰ حوضه آبریز تعیین شده است بدست آورد.

$$C_t = \frac{0.6}{\sqrt{s}} \qquad (۱۲-۱۵)$$

در این فرمول s شیب متوسط اراضی حوضه (m/m) است. مثلاً چنانچه شیب حوضه ۱۵ درصد باشد ($s = 0.15$) ضریب C_t برابر ۱/۵ خواهد بود. اشنایدر خود ضریب C_t را بین ۱/۳۵ تا ۱/۶۵ پیشنهاد نموده است.

برای به‌دست آوردن مرکز ثقل (G) کافی است نقشه حوضه را رسم و آن را روی یک قطعه مقوا چسبانیده و اطراف آن را قیچی کنیم، حال در گوشهٔ مقوا سوراخ کوچکی به وجود می‌آوریم و مقوا را توسط نخی که از آن سوراخ می‌گذرد آویزان می‌کنیم امتداد نخ را روی حوضه مشخص کنید. شکل را از گوشهٔ دیگری که سوراخ کرده‌اید مجدداً با نخ آویزان نمایید و خط امتداد جدید نخ را در روی حوضه بکشید. محل تلاقی دو خط، مرکز ثقل حوضه خواهد بود.



شکل ۱۵-۹ اندازه‌های طولی حوضه

● مثال ۱۵-۸

در یک حوضهٔ آبریز طول آبراههٔ اصلی ۳۵کیلومتر و فاصلهٔ نقطهٔ خروجی تا نقطهٔ aکه روی آبراههٔ اصلی بوده و با مرکز ثقل کوتاهترین فاصله را دارد ۱۴ کیلومتر است. زمان تأخیر دراین حوضه چقدر است؟

حل

$L = 35$ km

$L_{ca} = 14$ km

$C_t = 1.5$ با فرض این که :

$t_l = C_t(L.L_{ca})^{0.3}$

$t_l = 1.5(35 \times 14)^{0.3}$

$t_l = 9.6$ hr ساعت

ب - زمان بارندگی (t_D)

هیدروگراف واحد اشنایدر باید ابتدا برای یک مدت بارندگی استاندارد ساخته شود این از فرمول ۱۵-۱۳ محاسبه می‌شود.

$$t_D = \frac{t_l}{5.5} \qquad (۱۳-۱۵)$$

مثلاً در مورد مثال فوق که زمان تأخیر ۹/۶ ساعت محاسبه شد مدت بارندگی که هیدروگراف واحد اشنایدر می‌تواند برای آن ساخته شود ($\frac{۹/۶}{۵/۵}$ = ۱/۷۵) ساعت است. ملاحظه می‌شود که مدت بارندگی که هیدروگراف واحد برای آن ساخته می‌شود تابع زمان تأخیر است و ممکن است عدد محاسبه شده اولاً یک عدد صحیح نبوده ثانیاً عددی که ما بخواهیم برای آن هیدروگراف واحد داشته باشیم نباشد. اگر مدت مورد نظر ما برای ساختن هیدروگراف واحد مصنوعی t_R مساحت باشد در این صورت لازم است زمان تأخیر حوضه را مطابق با آن اصلاح کنیم. **زمان تأخیر اصلاح شده** (t_{lR}) از فرمول زیر بدست می‌آید:

$$t_{lR} = t_l + 0.25(t_R - t_D) \qquad (۱۴-۱۵)$$

که در آن:

t_l = زمان تأخیر محاسبه شده از معادله ۱۵-۱۱

t_{lR} = زمان تأخیر اصلاح شده

t_D = مدت بارندگی محاسبه شده از معادله ۱۵-۱۳

t_R = مدت بارندگی که مورد نظر بوده و می‌خواهیم هیدروگراف واحد آن را بسازیم.

مثلاً اگر مدت بارندگی ۱/۷۵ ساعت بدست آمد اما نخواسته باشیم هیدروگراف واحد ۱/۷۵ ساعته بسازیم بلکه بخواهیم هیدروگراف ۱/۵ ساعته داشته باشیم باید زمان تأخیر را متناسب با آن اصلاح کرد. در این صورت:

$t_D = 1.75$ hr

$t_R = 1.5$ hr

$t_l = 9.6$ hr

$t_{lR} = 9.6 + 0.25(1.5 - 1.75)$

$t_{lR} = 9.5$ hr

و در محاسبات دبی اوج به جای ۹/۶ عدد ۹/۵ را قرار می‌دهیم.

ج - دبی اوج (پیک)

بطور کلی دبی اوج هیدروگراف واحد اشنایدر (O_P) به ازاء یک واحد رواناب (یک‌میلی‌متر) از فرمول زیر قابل محاسبه است

$$O_P = (C_P)\frac{A}{t_l} \qquad (۱۵-۱۵)$$

که ضریب C_P مربوط به ذخیره و نگهداشت آب در سطح حوضه (چالاب) است و مقدار آن بین ۰/۱۵ تا ۰/۱۹ متغیر می‌باشد. در فرمول ۱۵-۵ مقدار A برحسب کیلومتر مربع و Q_P برحسب مترمکعب در ثانیه برای یک میلی‌متر رواناب می‌باشد. مثلاً در مورد مثال قبلی چنانچه سطح حوضه ۴۷ کیلومترمربع و ضریب C_P برابر ۰/۱۷ باشد خواهیم داشت

$A = 47$ km^2

$C_P = 0.17$

$t_l = 9.6$ hr

$Q_P = 0.83$ m^3/sec

و اگر بخواهیم دبی اوج را برای زمان اصلاح شده و موردنظر t_R محاسبه کنیم از فرمول زیر استفاده می‌شود

$$Q_{PR} = Q_P \left(\frac{t_l}{t_{lR}}\right) \qquad (۱۵-۱۶)$$

که برای مثال فوق عملاً مقدار آن تغییر نخواهد کرد.

$$Q_{PR} = 0.83 \left(\frac{9.6}{9.5}\right) = 0.83 \ \ m^3/sec$$

د - زمان پایهٔ هیدروگراف

زمان پایهٔ هیدروگراف واحد اشنایدر از فرمول ۱۵-۱۷ محاسبه می‌شود.

$$t_b = 24\left(3 + \frac{t_l}{8}\right) \qquad (۱۵-۱۷)$$

که t_b زمان پایهٔ هیدروگراف برحسب ساعت می‌باشد. مثلاً در مورد قبل زمان پایهٔ هیدروگراف واحد برای بارانهای ۱/۷۵ ساعته؛

$$t_b = 24\left(3 + \frac{9.6}{8}\right) = 101 \ \ hr \ = 4.2 \ days$$

ولی اگر در فرمول بجای ۹/۶ مقدار ۹/۵ را قرار دهیم زمان پایه برای هیدروگراف واحد ۱/۵ ساعته ۱۰۰ ساعت می‌باشد زیرا،

$$t_b = 24\left(3 + \frac{9.5}{8}\right) = 100.5 \ hr = 4.1 \ days$$

ملاحظه می‌شود که دراین روش حتی یک بارندگی کوتاه‌مدت (۱/۵ ساعته) سیل با تداوم ۱۰۰ ساعت را ایجاد می‌کند که ممکن است با واقعیت چندان مطابقت نداشته باشد. بدین‌لحاظ برای حوضه‌های کوچک زمان پایهٔ هیدروگراف واحد (t_b) معمولاً حدود ۳ تا ۵ برابر زمان رسیدن به دبی اوج در نظر گرفته می‌شود.

هـ - زمان رسیدن به دبی اوج (پیک)

با توجه به تعریف زمان تأخیر، زمان رسیدن به دبی اوج از فرمول ۱۵-۱۸ محاسبه‌می‌شود.

$$t_p = \frac{t_R}{2} + t_l \qquad (۱۵-۱۸)$$

(t_R برای هیدروگراف واحد ساعته)

در مورد مثال قبل مقدار t_p برای هیدروگراف واحد ۱/۷۵ ساعته برابر است با :

$$t_p = \frac{1.75}{2} + 9.6 = 10.4 \ hr$$

و - پهنای هیدروگراف واحد

همانطور که دیده شد فرمول ۱۵-۱۷ برای هیدروگراف پهنای بسیار زیادی را بدست می‌دهد. گروه مهندسان مشاور ارتش امریکا جهت رسم بهتر هیدروگراف واحد اشنایدر دو فرمول برای پهنای هیدروگراف یکی برای نقاطی که دبی ۷۵ درصد دبی اوج (حداکثر دبی هیدروگراف واحد) باشد و دیگری برای نقاطی که دبی ۵۰ درصد دبی پیک باشد ارائه کردند. این

دو فرمول عبارتند از :

$$W_{75} = \frac{0.13A^{1.08}}{Q_p^{1.08}} \qquad (۱۹-۱۵)$$

$$W_{50} = \frac{0.23\ A^{1.08}}{Q_P^{1.08}} \qquad (۲۰-۱۵)$$

در این معادله‌ها:

W_{75} = پهنای هیدروگراف واحد اشنایدر در نقطه‌ای که دبی برابر ۷۵ درصد دبی اوج باشد (ساعت)

W_{50} = پهنای هیدروگراف واحد اشنایدر در نقطه‌ای که دبی آن برابر ۵۰ درصد دبی اوج باشد (ساعت)

A = مساحت حوضه (کیلومترمربع)

Q_p = دبی اوج (مترمکعب در ثانیه)

مثلاً برای حالتی که مساحت حوضه ۴۷ کیلومتر مربع و دبی‌پیک ۰/۸۳ مترمکعب در ثانیه است

$$W_{75} = \frac{0.13(47)^{1.08}}{(0.83)^{1.08}} = 10\ hr$$

$$W_{50} = \frac{0.23(47)^{1.08}}{(0.83)^{1.08}} = 18\ hr$$

بطور معمول براساس پیشنهاد مهندسان مشاور ارتش امریکا اگر از نقطه اوج هیدروگراف یک خط عمود رسم شود دو سوم پهنای W_{75} و W_{50} در سمت راست و یک سوم در سمت چپ این خط واقع می‌شود. بعبارت دیگر هیدروگراف متقارن رسم نمی‌شود. بلکه قسمت بازوی بالارونده آن یک سوم پهنا و قسمت بازوی پایین‌رونده آن دو سوم پهنای هیدروگراف را بخود اختصاص می‌دهد. توجه شود که در روش اشنایدر که بصورت فوق شرح داده شده هیدروگراف واحد برای یک میلی‌متر ارتفاع رواناب ساخته می‌شود.

● **مثال ۱۵-۹**

وسعت یک حوضه آبریز ۵۰۰ کیلومترمربع، طول آبراهه اصلی آن ۲۵ کیلومتر و فاصله مرکز ثقل حوضه تا نقطه خروجی آن ۱۰ کیلومتر می‌باشد با فرض $C_t = 1.6$ و $C_p = 0.16$ هیدروگراف واحد مصنوعی ۴ ساعته این حوضه را به روش اشنایدر طوری بدست آورید که سطح زیرمنحنی برابر یک میلی‌متر رواناب باشد.

حل

(۱)- زمان تأخیر حوضه (t_R) را محاسبه می‌کنیم.

$t_R = 4\ hr$

$t_l = C_t(L.L_{ca})^{0.3}$

$t_l = 1.6(25 \times 10)^{0.3}$

$t_l = 8.38$ hr

(۲)- دبی‌پیک به ازاء زمان تأخیر ۸/۳۸ ساعت محاسبه می‌شود.

$$Q_p = (C_p)\frac{A}{t_l}$$

$$Q_p = 0.16\frac{500}{8.38}$$

$Q_p = 9.55\ m^3/sec$

(۳)- زمان پایه هیدروگراف از فرمول ۱۵-۱۷ محاسبه می‌شود.

$$t_b = 24\left(3 + \frac{t_l}{8}\right)$$

$$t_b = 24\left(3 + \frac{8.38}{8}\right) = 97\ hr$$

(۴)- زمان استاندارد تداوم بارندگی (t_D) از معادله ۱۵-۱۳ محاسبه می‌شود.

$$t_D = \frac{t_l}{5.5}$$

$$t_D = \frac{8.38}{5.5} = 1.5\ hr$$

(۵)- بطوریکه مشاهده می‌شود زمان استاندارد با زمانی که ما در نظر داریم هیدروگراف واحد حوضه را بسازیم متفاوت است. دراین جا $t_D = 1.5$ می‌باشد حال آنکه هدف ما ساختن هیدروگراف واحد ۴ ساعته است بنابراین چون $t_R = 4$ hr است باید زمان تأخیر جدید یا اصلاح شده (t_{lR}) را بدست آوریم. از معادله ۱۵-۱۵ خواهیم داشت

$t_{lR} = t_l + 0.25(t_R - t_D)$

$t_{lR} = 8.38 + 0.25(4 - 1.5) = 9$ hr

که براین اساس دبی اوج را اصلاح می‌کنیم.

(۶) دبی پیک را برای هیدروگراف واحد ۴ ساعته (Q_{PR}) از معادله ۱۵-۱۶ محاسبه می‌شود

$$Q_{PR} = Q_p\left(\frac{t_l}{t_{lR}}\right)$$

$$Q_{PR} = 9.55\left(\frac{8.38}{9}\right) = 8.89\ m^3/sec$$

(۷) زمان رسیدن به دبی پیک (t_p) از معادله ۱۵-۱۸ بدست می‌آید که در آن بجای t_D باید t_R و بجای t_l مقدار t_{lR} را قرار داد.

$$t_p = \frac{t_R}{2} + t_{lR}$$

$$t_p = \frac{4}{2} + 9 = 11\ hr$$

(۸) تعیین عرض هیدروگراف در نقطه‌ای که دبی آن ۵۰ درصد دبی پیک است .

$$W_{50} = 0.23 \frac{A^{1.08}}{Q_{PR}^{1.08}}$$

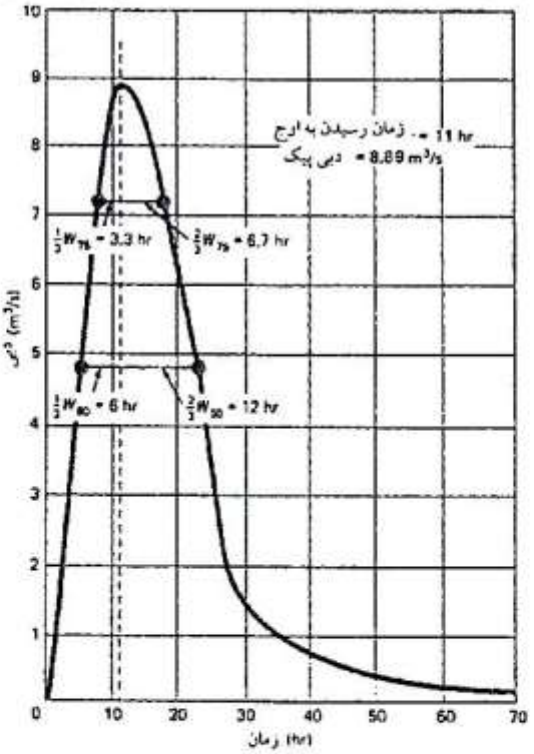
$$W_{50} = 0.23\left(\frac{500}{8.89}\right)^{1.08} = 18 \text{ hr}$$

(۹) تعیین عرض هیدروگراف واحد در نقطه‌ای که دبی آن ۷۵ درصد دبی پیک می‌باشد

$$W_{75} = 0.13 \frac{A^{1.08}}{(Q_{PR})^{1.08}}$$

$$W_{75} = 0.13\left(\frac{500}{8.89}\right)^{1.08} = 10 \text{ hr}$$

(۱۰) با توجه به این که اگر از نقطه پیک هیدروگراف یک خط عمودی رسم کنیم دو سوم مقادیر ۱۸ و ۱۰ ساعت که ۱۲ و ۶/۷ (حدوداً ۷) ساعت است در سمت راست و یک سوم آن در سمت چپ قرار گیرد، هیدروگراف واحد ۴ ساعته حوضه مطابق شکل ۱۵-۱۰ رسم می‌شود و سطح زیر منحنی آن با توجه به وسعت حوضه معادل یک میلی‌متر رواناب خواهد بود.



شکل ۱۵-۱۰ هیدروگراف واحد مصنوعی به روش اشنایدر

در اکثر مطالعات هیدرولوژیکی به روش اشنایدر هیدروگراف واحد طوری ساخته می‌شود که سطح زیرمنحنی آن برابر یک سانتی‌متر روناب باشد (شکل ۱۵-۱۲). در این شرایط فرمول دبی پیک Q_p بصورت زیر خواهد بود.

$$Q_p = \frac{2.78\ C_p A}{t_p} \qquad (۲۱-۱۵)$$

که در آن:

Q_p = دبی پیک هیدرگراف واحد (اصلاح شده) برحسب m^3/s

C_p = ضریب ثابتی که اشنایدر آن را ۰/۵۶ تا ۰/۶۹ معرفی کرده است.

A = سطح حوضه (km^2)

t_p = زمان تأخیر حوضه (اصلاح شده) بر حسب ساعت

علاوه بر این پهنای این هیدروگراف در نقاط مربوط به ۵۰ و ۷۵ درصد دبی پیک از معادلات زیر بدست می‌آید.

$$W_{50} = \frac{5.87\ (A)^{1.08}}{(Q_p)^{1.08}} \qquad (۲۲-۱۵)$$

$$W_{75} = \frac{3.354\ (A)^{1.08}}{(Q_p)^{1.08}} \qquad (۲۳-۱۵)$$

● مثال ۱۵-۱۰

برای یک حوضه آبریز که هیچگونه آمار و اطلاعات اندازه‌گیری دبی وجود ندارد می‌خواهیم هیدروگراف واحد ۳ ساعته بسازیم. در مجاور این حوضه یک حوضه آبریز معرف وجود دارد که در آن اندازه‌گیری دبی صورت می‌گیرد و در ضمن هیدروگراف واحد ۳ ساعته هم برای آن ساخته شده است که دبی پیک آن ۱۴۰ متر مکعب در ثانیه و زمان رسیدن به دبی پیک از شروع بارش اضافی ۳۷ ساعت است. ضرایب لازم را برای آنکه بتواتیم برای حوضه اول هیدروگراف مصنوعی به روش اشنایدر بسازیم بدست آورید. اطلاعات فیزیکی مربوط به حوضه اول عبارت است از:

طول حوضه معرف در امتداد رودخانه اصلی (L) = ۱۴۸ کیلومتر

مساحت حوضه معرف ۲۷/۸ کیلومتر مربع = A

طول قسمت خروجی تا مرکز ثقلی حوضه معرف L_{ca} = 76 km

حل

t_r = مدت زمان بارندگی = 3 hr

t_p = زمان رسیدن به پیک = 37 hr

$$t_p = \frac{t_R}{2} + t_{lR}$$

$$37 = 3/2 + t_{lR}$$

$t_{lR} = 35.5$

$t_{lR} = t_l + 0.25\ (t_l - t_D)$

$t_{lR} = t_l + 0.25\ (3 - \frac{t_l}{5.5})$

$35.5 = (\frac{21}{22})\ t_l + 0.75$

$t_l = 36.40$ hr

$t_l = C_t\ (L.\ L_{ca})^{0.3}$

$36.40 = C\ (148 \times 76)^{0.3}$

$C_t = 2.22$

$Q_{PR} = 2.78\ C_p \frac{A}{t_{lR}}$

$140 = 2.78\ (C_p) \frac{2718}{35.5}$

$C_p = 0.65$

بنابراین ضرایب C_p و C_t برای حوضه‌ای که هیچ‌گونه آماده و اطلاعات درباره آن وجودندارد عبارت است از: $C_p = 0.65$ و $C_t = 2.22$

● **مثال ۱۵-۱۱**

وسعت حوضه‌ای ۱۹۸ کیلومتر مربع است. با توجه به اطلاعات زیر هیدروگراف واحد ۴ ساعته اشنایدر را برای این حوضه برای یک سانتی‌متر رواناب بسازید.

- طول حوضه درامتداد رودخانه اصلی = ۲۱۶ کیلومتر
- فاصله نقطه خروجی تا مرکز ثقل حوضه درامتداد رودخانه اصلی = ۱۱/۲ کیلومتر
- ضریب C_t = ۱/۵
- ضریب C_p = ۰/۵۹

حل

$A = 198\ km^2$

$L = 21.6$

$L_c = 11.2$

$t_R = 4$ hr

$t_l = C_t\ (L.\ L_{ca})^{0.3} = 1.5\ (21.6 \times 11.2)^{0.3} = 7.78$hr

$t_D = \frac{t_l}{5.5} = \frac{7.78}{5.5} = 1.41$ hr # 4 hr

با توجه به اختلاف t_D و t_R زمان تأخیر را اصلاح می‌کنیم.

$t_{lR} = t_l + 0.25\ (t_R - t_D)$

$t_{lR} = 7.78 + 0.25\,(4 - 1.4) = 8.42$ hr

$$Q_{PR} = 2.78\, C_P \frac{A}{t_{lR}}$$

$$Q_{PR} = 2.78\,(0.59)\frac{198}{8.42} = 38.57\ m^3/sec$$

با در نظر گرفتن وسعت حوضه که $A = 198\ km^2$ است دبی ویژه حوضه برای هیدروگراف واحد عبارت است از :

$$\text{دبی ویژه} = \frac{38.57}{198} = 0.1948\ m^3/sec/sq.km$$

توجه داشته باشید که نظر به انتخاب ضریب $C_P = 0.59$ و استفاده از معادله :

$$Q_{PR} = 2.78\, C_P \frac{A}{t_{lR}}$$

حداکثر دبی پیک هیدروگراف واحد اشنایدر برای یک سانتی‌متر رواناب ۳۸/۵۷ متر مکعب در ثانیه است.

زمان پایه هیدروگراف را اگر از معادله زیر استفاده کنیم ۹۷ ساعت خواهد شد.

$$t_b = 24\,(3 + \frac{t_{lR}}{8}) = 24\,(3 + \frac{8.42}{8}) = 97hr$$

که برای این حوضه بسیار زیاد بنظر می‌رسد. برای حوضه‌های کوچک از معادله زیر استفاده می‌شود.

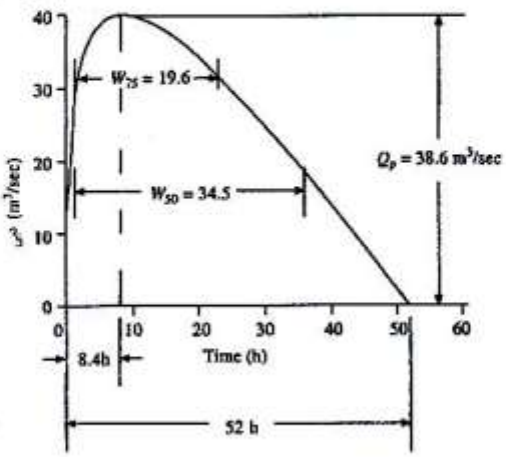
$$t_b = 5\,(t_{lR} + 0.5\,t_R) = 5\,(8.42 + 0.5 \times 4) = 52\ hr$$

این رقم برای رسم هیدروگراف واحد معقول‌تر بنظر می‌رسد.

$$W_{50} = \frac{5.87\,A^{1.08}}{1.08} = \frac{5.87\,(198)^{1.08}}{(38.57)^{1.08}} = 34.3\ hr$$

$$W_{75} = \frac{3.35\,(198)^{1.08}}{(38.57)^{1.08}} = 19.6\ hr$$

با توجه به اطلاعات فوق هیدروگراف واحد به صورت زیر رسم می‌شود.

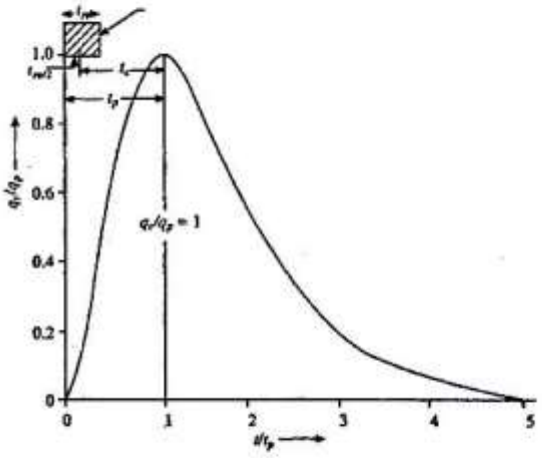


۱۵-۴-۲ هیدروگراف واحد مصنوعی SCS

یکی دیگر از روشهایی که برای استخراج هیدروگراف واحد در حوضه‌های بدون آمار استفاده می‌شود روش موسوم به هیدروگراف بی‌بُعد SCS است. در این روش مختصات نقاط هیدروگراف واحد از جدول بدون بعد که در آن مقادیر نسبت زمان (t/tp) در مقابل نسبت دبی هیدروگراف (Q/Qp) داده شده است بدست می‌آید (جدول ۱۵-۱۰).

جدول ۱۵-۱۰ نسبتهای هیدروگراف بدون بعد SCS

نسبت دبی (Q/Qp)	نسبت t/tp
0	0
0.015	0.1
0.075	0.2
0.16	0.3
0.28	0.4
0.43	0.5
0.60	0.6
0.77	0.7
0.89	0.8
0.97	0.9
1.00	1.0
0.98	1.1
0.92	1.2
0.84	1.3
0.75	1.4
0.66	1.5
0.56	1.6
0.42	1.8
0.32	2.0
0.24	2.2
0.18	2.4
0.13	2.6
0.098	2.8
0.075	3.0
0.036	3.5
0.018	4.0
0.009	4.5
0.004	5.0
0	بی نهایت



شکل ۱۵-۱۱ تصویر توصیفی هیدروگراف واحد بدون بعد SCS

بطوریکه مشاهده می‌شود برای بدست آوردن مختصات نقاط هیدروگراف از روی t/tp و Q/Qp لازم است مقادیر tp و Qp در دست باشند تا از روی آن‌ها به کمک ارقام جدول ۱۵-۱۰ مقادیر t و Q بدست آید. tp و Qp از معادله‌های زیر محاسبه می‌شوند

$$Q_p = \frac{0.208A}{t_p} \qquad (۲۴-۱۵)$$

$$t_p = \frac{D}{2} + t_l \qquad (۲۵-۱۵)$$

که D تداوم مورد نظر برای بارندگی (ساعت)، tl زمان تأخیر حوضه (ساعت)، A مساحت حوضه (کیلومترمربع) و Qp دبی پیک هیدروگراف واحد برحسب مترمکعب در ثانیه برای یک میلی‌متر رواناب است و tp زمان رسیدن به دبی پیک می‌باشد. در روش SCS مدت بارندگی (D)

که هیدروگراف واحد برای آن ساخته می‌شود بستگی به زمان تمرکز داشته و از فرمول زیر بدست می‌آید.

$$D = 0.133\ t_c \qquad (۲۶-۱۵)$$

البته لازم نیست که D دقیقاً معادل 0.133tc باشد ولی توصیه می‌شود زیاد آن مغایرت نداشته باشد. علاوه بر آن اگر بخواهیم هیدروگراف واحد SCS را برای یک سانتی‌متر رواناب بسازیم لازم است سمت راست معادله ۱۵-۲۴ را در ۱۰ ضرب کنیم که نتیجه عبارت خواهد بود از:

$$Q_p = \frac{2.08\ A}{t_p} \qquad (۲۷-۱۵)$$

که A مساحت حوضه برحسب کیلومتر مربع، Q_p دبی پیک برحسب متر مکعب در ثانیه و t_p زمان رسیدن به پیک برحسب ساعت می‌باشد. در روش SCS می‌توان زمان تأخیر را از روی فرمول ۱۵-۱۱ و یافرمول‌های تجربی دیگر محاسبه کرد. یکی از فرمول‌هایی که توسط SCS برای محاسبه زمان تأخیر پیشنهاد شده است بصورت زیر می‌باشد که در صورت داشتن شماره منحنی حوضه (CN) می‌توان از آن نیز استفاده کرد.

$$t_l = \frac{L^{0.8}(S + 1)^{0.7}}{(1900)y^{0.5}} \qquad (۲۸-۱۵)$$

که در آن:

t_l = زمان تأخیر حوضه (ساعت)

L = طول رودخانه اصلی (فوت)

y = شیب متوسط حوضه (درصد)

S = نمایه نگهداشت آب در سطح حوضه که برابر است با:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \qquad (۲۹-۱۵)$$

که CN شماره منحنی مربوط به سطح حوضه است. با این وجود در اکثر مطالعات هیدرولوژیکی به روش SCS زمان تاخیر از معادله زیر تخمین زده می‌شود.

$$t_l = t_c / 1.66 \qquad (۳۰-۱۵)$$

در شکل ۱۵-۱۱ نیز تصویر توصیفی هیدروگراف واحد بدون بعد SCS ارائه شده است.

● مثال ۱۵-۱۲

برای وضعیتی که در مثال ۱۵-۷ آورده شده است هیدروگراف واحد ۴ ساعته حوضه (t = 4hr) را به روش SCS بدست آورید.

حل

زمان تأخیر حوضه براساس معادله ۱۵-۱۱ که در مثال قبل بدست آمد ۸/۳۸ ساعت است

$t_l = 8.38$ hr

D = 4 hr

$$t_p = \frac{D}{2} + t_l$$

$$t_p = \frac{4}{2} + 8.38 = 10.38 \# 10.5 \text{ hr}$$

$$Q_p = \frac{0.208\ A}{t_p} = \frac{0.208(500)}{10.5} = 9.90\ m^3/sec$$

با داشتن $t_p = 10.5$ و $Q_p = 9.90$ می‌توان جدول ۱۵-۱۰ را به ابعاد هیدروگراف واحد تبدیل کرد که نتایج در جدول ۱۵-۱۱ ارائه شده است. مثلاً به ازاء $\frac{t}{t_p} = 0.8$ مقدار t برابر 8.4 و در همین وضعیت چون $\frac{Q}{Q_p} = 0.89$ است لذا مقدار Q برابر 8.81 خواهد بود زیرا:

$$\frac{t}{t_p} = 0.8$$

$$t = 0.8(10.5) = 8.4 \text{ hr}$$

$$\frac{Q}{Q_p} = 0.89$$

$$Q = 0.89(9.90) = 8.81\ m^3/sec$$

حال اگر ارقام ستون ۲ و ۴ جدول ۱۵-۱۱ را نسبت به همدیگر در یک دستگاه محور مختصات رسم شوند هیدروگراف واحد ۴ ساعته حوضه برای یک میلی‌متر رواناب بدست می‌آید. بطوریکه مشاهده می‌شود دبی اوج هیدروگراف واحد ۴ ساعته در روش SCS برابر ۹/۹۰ متر مکعب در ثانیه است که با روش اشنایدر مطابقت دارد.

جدول ۱۵-۱۱ استخراج هیدروگراف واحد ۴ ساعته به روش SCS

t/t_p	t(hr)	Q/Q_p(از جدول)	$Q(m^3/s)$
(1)	(2)	(3)	(4)
0	0	0	0
0.2	2.1	0.075	0.74
0.5	5.25	0.43	4.26
0.8	8.4	0.89	8.81
1.0	10.5	1.00	9.90
1.5	15.75	0.66	6.54
2.0	21.0	0.32	3.17
3.0	31.5	0.075	0.74
4.0	42.0	0.018	0.18
5.0	52.5	0.004	0.04

● مثال ۱۵-۱۳

برای یک بارش ۳۰ دقیقه‌ای در حوضه‌ای به مساحت ۱۲/۵ کیلومتر مربع که زمان تمرکز آن ۲/۵ ساعت است. هیدروگراف واحد را به روش SCS بدست آورید.

حل

$D = 30 \text{ min} = 0.5 \text{ hr}$

$t_c = 2.5 \text{ hr}$

زمان رسیدن به دبی پیک $= t_p = \frac{D}{2} + t_l$

زمان تاخیر $= t_l = t_c / 1.66 = \frac{2.5}{1.66} = 1.5 \text{ hr}$

$t_p = \frac{0.5}{2} + 1.5 = 1.75$

$Q_p = \frac{2.08}{t_p} = \frac{2.08\ (12.5)}{1.75} = 14.85 \text{ Cumec}$

با استفاده از جدول ۱۵-۱۲ ابعاد هیدروگراف واحد SCS برای یک سانتی‌متر رواناب مطابق جدول ۱۵-۱۱ بدست می‌آید. در این جدول ستون‌های ۳ و ۴ به ترتیب t و Q ابعاد هیدروگراف واحد می‌باشند که سطح زیر منحنی آن برابر یک سانتی‌متر رواناب است. ستون t از حاصلضرب ستون یک در ۱/۷۵ وستون Q از حاصلضرب اعداد ستون ۲ در ۱۴/۸۵ بدست آمده‌اند.

جدول ۱۵-۱۲ ابعاد هیدروگراف واحد

t/t_p	Q/Q_p	t 1.75 × (ستون ۱)	Q 14.85 × (ستون ۲)
(1)	(2)	(3)	(4)
0	0	0	0
0.1	0.015	0.175	0.222
0.2	0.075	0.350	1.113
0.3	0.16	0.525	2.376
0.4	0.28	0.7	4.158
0.5	0.43	0.875	6.682
0.6	0.60	1.05	8.916
0.7	0.77	1.225	11.434
0.8	0.89	1.40	13.216
0.9	0.97	1.575	14.404
1.0	1.0	1.750	14.85
1.1	0.98	1.925	14.553
1.2	0.92	2.10	13.662
1.3	0.84	2.275	12.474
1.4	0.75	2.45	11.137
1.5	0.66	2.625	9.801
1.6	0.56	2.80	8.316
1.8	0.42	3.15	6.237
2.0	0.32	3.5	4.752
3.0	0.075	5.25	1.113
4.0	0.018	7.0	0.267
5.0	0.004	8.75	0.059
∞	0	∞	0

تمرین ۱۵-۱

برای حوضه‌ای که وسعت آن ۲۰۰ کیلومتر مربع است هیدروگراف واحد ۲ ساعته را به روش SCS بسازید. چنانچه زمان تاخیر حوضه (t_l) برابر ۸ ساعت باشد دبی پیک این هیدروگراف واحد و زمان رسیدن به دبی پیک چقدر خواهد بود.

جواب = ۱۱۹/۱۱ متر مکعب در ثانیه و ۹ ساعت

بطور کلی در روش SCS باید به ترتیب زیر عمل نموده و هیدروگراف واحد را بدست آورد.

(۱)- بدست آورن زمان تأخیر (t_l) از یکی از فرمول‌های تجربی .

(۲)- تعیین زمان تمرکز (t_c) از یکی از روشهای تجربی و یا استفاده از فرمول زیر که با داشتن زمان تأخیر می‌توان زمان تمرکز (ساعت) را نیز بدست آورد.

$$t_c = 1.66\ t_l \qquad (۳۱-۱۵)$$

(۳)- تعیین مدت بارندگی (t).

در روش SCS توصیه می‌شود مدت بارندگی t طوری باشد که مقدار آن از $0.25\ t_c$ تجاوز نکند. سازمان SCS برای t رقم $0.133t_c$ را توصیه نموده است.

(۴)- تعیین زمان رسیدن به نقطه پیک که برابر است با $\frac{t}{2} + t_l$ می‌باشد.

(۵)- تعیین دبی پیک از فرمول ۱۵-۲۱

(۶)- زمان پایه هیدروگراف (t_b) که ۲/۶۶ برابر زمان رسیدن به نقطه پیک در نظر گرفته می‌شود($t_b = 2.66\ t_p$).

۱۵-۵ هیدروگراف واحد مثلثی

در طرح‌های کوچک هیدرولوژی و آبخیرداری که مساحت حوضه کوچکتر از ۲۵۰ کیلومتر مربع باشد روش موسوم به هیدروگراف واحد مثلثی SCS زیاد مورد استفاده دارد. این روش که حالت ساده شده هیدروگراف واحد SCS می‌باشد بر این فرض استوار است که اگر بارانی به مدت t ساعت روی حوضه ببارد رواناب حاصله از آن هیدروگرافی تشکیل خواهد شد که شکل آن مانند یک مثلث است. این هیدروگراف (مانند شکل ۱۵-۱۲) پس از T ساعت از شروع بارندگی به نقطه اوج می‌رسد و طی این مدت ارتفاع رواناب آن سانتی‌متر یا R_1 اینچ آب می‌باشد. سپس هیدروگراف نزول کرده و پس از طی T_2 ساعت دبی آن به صفر می‌رسد. در طی نزول نیز ارتفاع رواناب حاصله از سیل R_2 می‌باشد. بطوریکه جمع رواناب یا ارتفاع کل سیلاب (R) حاصل جمع R_1 و R_2 بوده و زمان پایه هیدروگراف (T_b) نیز حاصل جمع T_1 و T_2 است. یعنی:

$$R = R_1 + R_2 \qquad (۳۲-۱۵)$$

$$T = T_1 + T_2 \qquad (۳۳-۱۵)$$

از طرف دیگر مقدار کل سیلاب برابر است با سطح مثلث. یعنی:

$$R = (R_1 + R_2) = \left(\frac{Q_{pk}\, T_1}{2} + \frac{Q_{pk}\, T_2}{2}\right) \qquad (۳۴-۱۵)$$

که در آن Q_{pk} دبی اوج می‌باشد.

با تجربیاتی که از روی حوضه‌های آزمایشی بدست آمده است بین زمان رسیدن دبی به اوج (T_1) و زمان نزول (T_2) در هیدروگراف مثلثی رابطه زیر برقرار است.

$$T_2 = 1.67\, T_1 \qquad (۳۵-۱۵)$$

هم چنین می‌دانیم که زمان تأخیر حوضه که در شکل با t_p نشان داده شد و برابر فاصله بین مرکز بارندگی تا نقطه اوج هیدروگراف است حدود ۶۰ درصد زمان تمرکز (t_c) می‌باشد یعنی:

$$t_p = 0.6\, t_c \qquad (۳۶-۱۵)$$

بنابراین با توجه به شکل مقدار T_1 برابر است با:

$$T_1 = t/2 + t_p \qquad (۳۷-۱۵)$$

$$T_1 = 0.5t + 0.6\, t_c \qquad (۳۸-۱۵)$$

و T_b برابر است با:

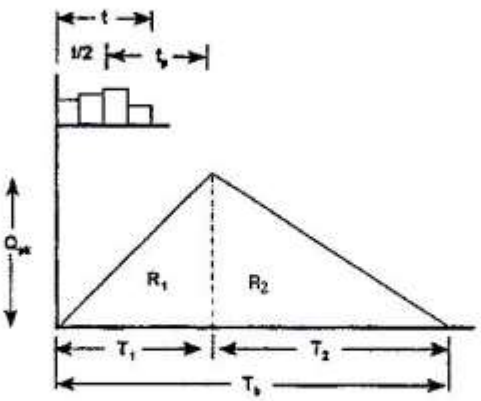
$$T_b = T_1 + T_2 \qquad (۳۹-۱۵)$$

$$T_b = T_1 + 1.67\, T_1 \qquad (۴۰-۱۵)$$

$$T_b = 2.67\, T_1 \qquad (۴۱-۱۵)$$

$$T_b = 2.67\,(0.5t + 0.6\, t_c) \qquad (۴۲-۱۵)$$

$$T_b = 1.34t + 1.6\, t_c \qquad (۴۳-۱۵)$$



شکل ۱۵-۱۲ هیدروگراف مثلثی

چنانچه مساحت حوضه برابر A میل مربع و ارتفاع رواناب (R) بر حسب اینچ باشد از

روی معادله (۱۵-۲۷) مقدرا دبی پیک (Q_{pk}) بر حسب فوت مکعب در ثانیه بصورت زیر خواهد بود.

$$Q_{pk} = \frac{484\ AR}{0.5t + 0.6t_c} \qquad (۴۴-۱۵)$$

حال اگر بخواهیم هیدروگراف باران t ساعته را برای یک اینچ رواناب ($R = 1$)در نظر بگیریم شکل حاصله هیدروگراف واحد مثلثی خواهد بود که در آن دبی پیک برابر است با:

$$Q_{pk} = \frac{484\ A}{0.5t + 0.6t_c} \qquad (۴۵-۱۵)$$

بنابراین معادلات ۱۵-۳۲، ۱۵-۳۹ معادلات اساسی در استخراج هیدروگراف واحد مثلثی SCS می‌باشند.

● مثال ۱۵-۱۴

در حوضه‌ای که مساحت آن ۶ میل مربع است زمان تمرکز برابر ۱ ساعت تخمین زده شده است. هیدروگراف واحد مثلثی این حوضه را برای یک بارش $\frac{۳}{۴}$ ساعته بدست آورید.

حل

$$Q_{pk} = \frac{484\ AR}{0.5\ t + 0.6\ t_c}$$

$t = 3/4\ hr = 0.75\ hr$

$t_c = 1\ hr$

$A = 6\ mile^2$

$R = 1\ inch$

$$Q_{pk} = \frac{484\ (6)\ (1.0)}{0.5(0.75) + 0.6\ (1.0)} = 2978\ cfs$$

از معادله ۱۵-۳۱ خواهیم داشت:

$T_1 = 0.5t + 0.6t_c$

$T_1 = 0.5\ (0.75) + 0.6\ (1)$

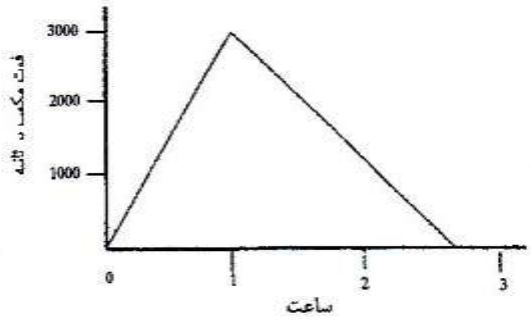
$T_1 = 0.975\ hr$

از معادله ۱۵-۳۹ زمان پایه برابر است با:

$T_b = 1.34t + 1.6\ t_c$

$T_b = 1.34\ (0.75) + 1.6\ (1.0) = 2.6\ hr$

شکل هیدروگراف واحد مثلثی بصورت زیر (شکل ۱۵-۱۳) رسم می‌شود



شکل ۱۵-۱۳

براساس مشخصات فوق اگر سطح زیرمنحنی (مساحت مثلث) که در واقع حجم رواناب است معادل واحد یعنی یک میلی‌متر باشد دبی اوج (q) هیدروگراف واحد مثلثی D ساعته در سیستم متریک از فرمول زیر محاسبه می‌شود.

$$q = 0.0021 \frac{A}{T_p} \qquad (۴۶-۱۵)$$

که در آن:

A = مساحت حوضه (هکتار)

T_p = زمان رسیدن به اوج (ساعت)

q = دبی اوج (مترمکعب در ثانیه) می‌باشد.

حال اگر ارتفاع رواناب Q میلی‌متر باشد دبی پیک آن عبارت خواهد بود از

$$q = 0.0021\ Q\ A/T_p \qquad (۴۷-۱۵)$$

چنانچه A بر حسب کیلومتر مربع و Q بر حسب میلی‌متر در نظر گرفته شود معادله دبی پیک عبارت خواهد بود از:

$$q = 0.21\ AQ/t_p \qquad (۴۸-۱۵)$$

● مثال ۱۵-۱۵

با استفاده از روش هیدروگراف مثلثی حساب کنید دبی اوج سیلاب حاصله از یک باران ۳۶ دقیقه‌ای (۰/۶ ساعت) راکه روی حوضه‌ای به مساحت ۱۰۰ هکتار می‌بارد و ارتفاع رواناب آن ۱۲ میلی‌متر است. زمان تمرکز این حوضه ۰/۵ ساعت است.

حل

$$T_p = \frac{1}{2} + 0.6t_c$$

$$T_p = \frac{0.6}{2} + 0.6(0.5)$$

$T_p = 0.6$ hr

$q = 0.0021\ QA/T_p$

$q = (0.0021)(12)(100)/(0.6)$

$q = 4.2\ m^3/sec$

۱۵-۶ تخمین جریان از هیدروگراف واحد

کاربرد مستقیم هیدروگراف‌های واحد استفاده آنها در تخمین دبی و حجم سیلاب است. فرض کنید چندین باران که تداوم هریک از آنها d اما مقادیر رواناب حاصله از آنها i_1، i_2، ... و i_n باشد در حوضه‌ای صورت گیرد. چنانچه هیدروگراف واحد d ساعته این حوضه را داشته باشیم از ضرب کردن ابعاد هیدروگراف واحد در مقادیر i_1 و i_2 و ... i_n و سپس جمع کردن آنها با توجه به تأخیرهای زمانی آنها هیدروگراف سیل حاصل می‌شود. برای روشن شدن مطلب به مثال زیر توجه نمائید.

● مثال ۱۵-۱۶

هیدروگراف باران ۲ ساعته حوضه‌ای که رواناب مستقیم آن ۱/۵ اینچ می‌باشد بصورت جدول ۱۵-۱۲ در اختیار است. چنانچه ضریب رواناب ۴۰ درصد باشد و روی این حوضه بارانی به‌مدت ۸ ساعت طوری اتفاق افتد که مقدار بارندگی در ۲ ساعت اول یک اینچ، در دو ساعت دوم ۲/۷۵ اینچ، در دو ساعت سوم ۴/۵ اینچ و در ۲ ساعت چهارم ۲/۲۵ اینچ باشد هیدروگراف ناشی از این ۴ بارندگی متوالی را بدست آورید.

زمان (hr)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
دبی (cfs)	151	146	268	562	660	630	516	370	250	190	150

حل

با توجه به مقادیر دبی پایه ابتدا هیدروگراف واحد ۲ ساعته حوضه را بدست می‌آوریم. چون ضریب رواناب ۰/۴ است لذا مقادیر رواناب در چهار بارندگی متوالی به ترتیب عبارتند از:

رواناب بارش اول $= 1 \times 0.4 = 0.4$ inch رواناب بارش سوم $= 4.5 \times 0.4 = 1.8$ inch

رواناب بارش دوم $= 2.75 \times 0.4 = 1.1$ inch رواناب بارش چهارم $= 2.25 \times 0.4 = 0.9$ inch

که اگر این اعداد را مطابق جدول (ستونهای ۳ تا ۶) در هیدروگراف واحد ضرب نموده و سپس جمع کنیم ارقام ستون ۷ هیدروگراف رواناب مستقیم این ۸ ساعت بارندگی است. با جمع کردن این مقادیر با دبی پایه (ستون ۸) ارقام ستون ۹ که دبی رودخانه است حاصل می‌شود.

جدول ۱۵-۱۳

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
زمان (hr)	Q (cfs)	دبی پایه (cfs)	رواناب مستقیم (cfs)	هیدروگراف واحد (cfs)
1	151	151	0	
2	146	146	0	
3	268	146	122	81
4	562	147	415	277
5	660	147	513	342
6	630	148	482	321
7	516	148	368	245
8	370	149	221	147
9	250	150	100	67
10	190	150	40	27
11	150	150	0	0

ستون ۱ = زمان، ستون ۲ = دبی هیدروگراف، ستون ۳ = دبی پایه

ستون ۴ = رواناب مستقیم[(3)-(2)] و ستون ۵ = ابعاد هیدروگراف واحد [(1.5):(4)]

جدول ۱۵-۱۴ بدست آوردن هیدروگراف رودخانه از هیدروگراف واحد

(1) زمان	(2)	(3) باران ۱	(4) باران ۲	(5) باران ۳	(6) باران۴	(7) جمع	(8) دبی‌پایه	(9) دبی‌رودخانه
	0					0	151	151
2	0	0				0	146	146
3	81	32				32	146	178
4	277	111	0			111	147	258
5	342	137	89			226	147	373
6	321	128	305	0		433	148	581
7	241	96	376	146		618	148	766
8	147	59	353	499	0	911	149	1060
9	67	27	265	616	73	981	149	1130
10	27	11	162	578	249	1000	150	1150
11	0	0	74	434	308	816	150	966
12			30	265	289	584	150	734
13			0	121	217	338	150	488
14				49	132	181	150	331
15				0	61	61	150	211
16					24	24	150	174
17					0	0	150	150

یکی دیگر از روش‌های توصیف هیدروگراف واحد و استفاده از آن برای تخمین سیلاب روش موسوم به گراف توزیع (distribution graph) هیدروگراف واحد است. در این روش پس از آن که هیدروگراف واحد ساخته شد زمان پایه (T_b) آن را n قسمت مساوی تقسیم می‌کنیم. در این صورت مطابق شکل ۱۵-۱۳ فاصله هر قسمت $\frac{T_b}{n}$ ساعت خواهد بود. از محل هر یک از

تقسیمات محورافقی خط عمودی رسم می‌کنیم تا منحنی هیدروگراف را قطع کند. بدین ترتیب سطح زیر منحنی هیدروگراف (A) را می‌توانیم به تعدادی واحد مستطیلی که مساحت هر کدام A_i می‌باشد تقسیم کنیم بطوریکه:

$$A_1 + A_2 + A_3 + \ldots + A_n = A \qquad (۴۹-۱۵)$$

و چنانچه سطح زیر منحنی هیدروگراف را ۱۰۰ درصد در نظر بگیریم درصد مربوط به هر کدام از تقسیمات A_1 و A_2 و ... را مشخص کرده و سپس در هنگام بکارگرفتن این هیدروگراف برای پیش‌بینی، هر کدام ازمساحت‌ها را در مقدار بارش اضافی ضرب کرده و مجدداً هیدروگراف جدیدی را مطابق مثال‌های زیر ساخت.

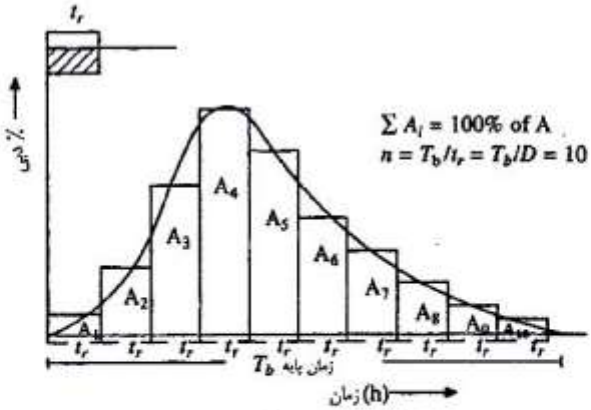
● مثال ۱۵-۱۷

هیدروگراف واحد ۳ ساعته را ($t_r = 3$) از یک حوضه در اختیار داریم. با توجه به ابعاد این هیدروگراف که به شرح زیر می‌باشد گراف توزیع آن را محاسبه و رسم کنید.

زمان‌ازروزاول (ساعت)	5	8	11	14	17	20	23	2	5	8	11	14
دبی ۱ متر مکعب در ثانیه	0	10.9	28.2	67.7	92.3	84.4	36.5	22.6	13.9	9.8	4.9	0

حل

بر اساس ارقام فوق جدول ۱۵-۱۵ و شکل ۱۵-۱۴ راکه در آن زمان پایه به ۱۰ قسمت شده است را تشکیل می‌دهیم. در این جدول ستون ۱ زمان، ستون ۲ فاصله زمانی انتخاب شده برای تقسیم‌بندی محور افقی هیدروگراف است که در اینجا ۳ ساعت انتخاب شده است. ستون ۳ ابعاد هیدروگراف برحسب متر مکعب در ثانیه و ستون ۴ مساحت هر یک از مستطیل‌های A_1 و A_2 و ... است که در شکل ۱۵-۱۴ نشان داده شده و از حاصلضرب ستون ۲ و ۳ بدست می‌آید. ستون ۵ ارقام ستون ۴ برحسب درصد می‌باشند. ملاحظه می‌شود که سطح زیر منحنی هیدروگراف به ۱۰ مستطیل کوچک تبدیل شده است.

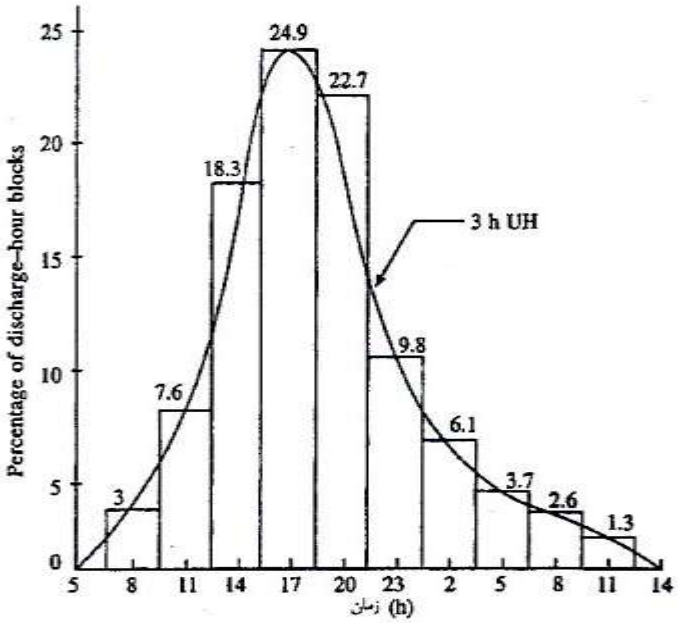


شکل ۱۵-۱۴ گراف توزیع

جدول ۱۵-۱۵

زمان (h)	دوره زمانی Δt (h)	ابعاد هیدروگراف واحد (m3/Sec)	سطح بلوک Cumec - h ستون (۲) × (۳)	٪ بلوک هیستوگرام (4)/1113.6 ستون =100×
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
5	0	0	0	0
8	3	10.9	32.7	3.0 (A 1)
11	3	28.2	84.6	7.6 (A 2)
14	3	67.7	203.1	18.3 (A 3)
17	3	92.3	276.9	24.9 (A 4)
20	3	84.4	253.2	22.7 (A 5)
23	3	36.5	109.5	9.8 (A 6)
2	3	22.6	67.8	6.1 (A 7)
5	3	13.9	41.7	3.7 (A 8)
8	3	9.8	29.6	2.6 (A 9)
11	3	4.9	14.7	1.3 (A 10)
14	3	0	0	0
جمع			1113.6	100%

حال با توجه به ارقام ستون ۵ جدول شکل ۱۵-۱۵ بعنوان جواب مسأله تهیه و رقم‌گذاری می‌شود.



شکل ۱۵-۱۵ تبدیل هیدروگراف واحد به گراف توزیع در مساله ۱۵-۷

● **مثال ۱۵-۱۸**

با توجه به گراف توزیع هیدروگراف مثال قبل فرض کنید این هیدروگراف را بخواهیم برای حوضه مجاور که مساحت آن ۳۰۰ کیلومتر مربع است و در آن سه بارش پیاپی سه ساعته که مقدار رواناب هر کدام به ترتیب ۶، ۲/۵ و ۴ سانتی‌متر است اتفاق افتاده است بکار ببریم. هیدروگراف حاصله از این سه بارش چگونه خواهد بود.

حل

$$\text{مساحت حوضه} = 300\ \text{Km}^2 = 300 \times 10^6\ \text{m}^2$$

$$\text{رواناب حاصل از یک سانتی‌متر بارش مازاد} = \left\{\frac{300 \times 10^6}{3 \times 60 \times 600}\right\} \times \frac{1}{100} = 277.8\ \text{m}^3/\text{sec}$$

از روی شکل ۱۵-۱۵ و ارقام مثال ۱۵-۱۷ جدول زیر (۱۵-۱۶) را تشکیل می‌دهیم.

جدول ۱۵-۱۶

زمان h	بارش اضافی cm	درصدهای گراف توزیع	بارش اضافی 6cm	بارش اضافی 2.5cm	بارش اضافی 4 cm	رواناب (cm) در ۳ ساعت جمع (۱)و(۲)و(۳)	دبی سیل ستون (۷) ضریب ۲۷۷/۸
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	0-3	6	3	0.18	0.00	0.180	50.0
3-6	2.5	7.6	0.456	0.075	0.00	0.531	147.2
6-9	4	18.3	1.098	0.190	0.12	1.408	391.1
9-12		24.9	1.494	0.456	0.304	2.254	626.1
12-15		2.7	1.362	0.623	0.732	2.717	754.7
15-18		9.8	0.588	0.568	0.996	2.152	597.8
18-21		6.1	0.366	0.245	0.908	1.519	421.9
21-24		3.7	0.222	0.153	0.392	0.767	213.1
24-3		2.6	0.156	0.093	0.244	0.493	136.9
3-6		1.3	0.078	0.065	0.148	0.291	80.8
6-9				0.033	0.104	0.137	38.1
0-12					0.052	0.052	14.4

مسائل

۱۵-۱ با توجه به هیدروگراف واحد ۱۲ ساعته‌ای که در مثال قبل استخراج کرده‌اید اگر بارانی در ۱۲ ساعت اول تداوم خود ۵ سانتی‌متر رواناب و در ۱۲ ساعت بعدی ۳ سانتی‌متر رواناب مؤثر داشته است، هیدروگراف حاصله از این بارندگی ۲۴ ساعته را حساب کنید.

۱۵-۲ در حوضه‌ای به وسعت ۱۰۰ کیلومتر مربع فرض شود $C_t = 1.6$، طول رودخانهٔ اصلی ۲۰ کیلومتر و طول روخانهٔ اصلی در نقطهٔ خروجی تا نقطه‌ای که در مقابل مرکز ثقل حوضه قرار دارد ۸ کیلومتر می‌باشد. با استفاده از روش اشنایدر حساب کنید:

الف - زمان تأخیر

ب - زمان بارندگی هیدروگراف واحد مصنوعی را

ج - دبی اوج هیدروگراف.

۱۵-۳ داده‌های زیر مربوط به اندازه‌گیری دبی رودخانه‌ای است که مساحت حوضهٔ بالادست آن ۱۵۰ کیلومتر مربع است. داده‌ها نشان دهندهٔ هیدروگرافی است که از یک بـاران ۱۲ ساعته ناشی شده است. هیدروگراف واحد ۱۲ ساعته این حوضه را استخراج کنید.

روز	ساعت	دبی m^3/sec	دبی پایه m^3/sec
22	0600	150	150
	1200	400	157
	1800	750	165
23	0000	980	172
	0600	890	180
	1200	690	187
	1800	480	195
24	0000	370	202
	0600	300	210
	1200	260	217
	1800	225	225
25	0000	200	200
	0600	180	180
	1200	170	170

۱۵-۴ هیدروگراف واحد ۴ ساعته یک حوضه آبریز را با استفاده از داده‌های زیر به روش اشنایدر بدست آورید.

- طول رودخانه اصلی حوضه ۱۲ کیلومتر
- وسعت حوضه ۶۰ کیلومتر مربع
- طول رودخانه اصلی از نقطه خروجی تا مرکز ثقل حوضه ۴/۵ کیلومتر
- ضریب $C_t = 2.2$
- ضریب $C_p = 0.7$

۱۵-۵ در یک رودخانه مقدار دبی طی روزهای مختلف اندازه‌گیری و به شرح زیر بوده است.

روز	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
دبی m^3/s	248	202	164	232	367	395	367	294	186	185

چنانچه وسعت حوضه ۱۶۴۰ کیلومتر مربع باشد حساب کنید:

الف - حجم کل رواناب

ب - متوسط روزانه دبی

ج - ارتفاع رواناب روی حوضه

منابع برای مطالعه بیشتر

1- Bras, L.R., *Hydrology,* Addison-Wesley pub. New York, 1990.
2- Chow, V.T., *Hand book of applied hydrology,* McGraw Hill, New York, 1964.
3- Dooge, J.C., *A general theory of the unit hydrograph,* J. Geoph, Res. 64(2), 1959.
4- Fleming, G., *Computer simulation technique in hydrology,* Elsevier, New York, 1975.
5- Sawden, P., *BASIC hydrology,* Butterworths, London, 1984.
6- Shaw, E., *Hydrology in practice,* Van Nostrand Reinhold, London, 1988.
7- Viessman, W. et al, *Introduction to hydrology,* IEP, New York, 1972.
8- Wilson, E., *Engineering hydrology,* Mac Millan, London, 1984.