روندیابی سیل

مقدمه
روندیابی ساده یا غیر ذخیره‌ای
روندیابی ذخیره‌ای
روندسازی در مخزن
روندسازی در رودخانه
مسائل
منابع برای مطالعه بیشتر

۱۶-۱ مقدمه

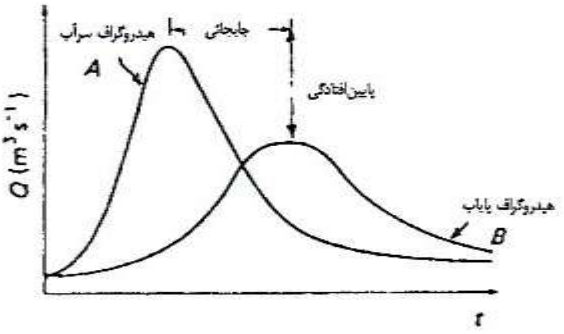
یکی از مسائل عمده در مهندسی هیدرولوژی که اغلب سر و کار با آن زیاد پیدا می‌شود پیش‌بینی چگونگی طغیان و فروکش سیل یا صعود و نزول هیدروگراف رودخانه در نقطهٔ مشخصی از آن است . این مسأله را می‌توان با روش روندیابی یا *روندسازی سیل* (flood routing) مورد تحلیل قرار داد. مفهوم اصلی روندسازی سیل آن است که اگر مشخصات هیدروگراف را در نقطه‌ای از رودخانه داشته باشیم چگونه از روی آن بتوانیم هیدروگراف را در نقطهٔ دیگر در پایین دست تخمین بزنیم . مسلماً هیدروگراف‌های این دو نقطه مشابه نخواهند بود زیرا خصوصیات مسیری که آب از آن گذشته یا در آن جریان دارد شکل هیدروگراف را تغییر می‌دهد.

تغییر شکل هیدروگراف در دو جهت است. اول این که زمان رسیدن به نقطهٔ اوج در پایین دست دیرتر از زمان رسیدن به اوج در هیدروگراف بالادست خواهد بود که دلیل این امر هم روشن است زیرا نقطهٔ دوم نسبت به نقطهٔ اول فاصله دارد و مدتی به طول می‌انجامد تا آب این مسیر را طی کند. اختلاف زمان وقوع اوج هیدروگراف در نقطهٔ پایین دست را *جابجایی* (translation) گویند. دوم این که دبی اوج هیدروگراف در پایین دست کمتر از دبی اوج هیدروگراف در بالادست می‌باشد. علاوه بر آن قله هیدروگراف پایین دست تیز نیست و حالت پهن و مسطح به خود می‌گیرد. هم چنین زمان لازم برای عبور موج *سیل* در نقطهٔ پایین دست مدتی بیشتر از هیدروگراف بالادستی خواهد بود که این حالت را *پایین افتادگی* یا *فروکش دبی اوج* (attenuation) می‌گویند. تغییر و تبدیلهای فوق در شکل ۱۶-۱ به صورت نموداری نشان داده شده است. باتوجه به شکل ۱۶-۱ هدف از روندیابی سیل آن است

که با داشتن یک هیدروگراف در نقطه A بتوانیم هیدروگراف را در نقطه B در پایین دست تخمین بزنیم. روندیابی سیل در کارهای آبی به جهات مختلف حائز اهمیت است، مثلاً اگر سیلی با هیدروگراف مشخص وارد مخزن یک سد که پر از آب است بشود هیدروگراف خروجی از سر ریز سد چگونه خواهد بود و یا با مشخص بودن هیدروگراف خروجی از سر ریز، هیدروگراف سیل در نقطه‌ای از رودخانه در پایاب سد به چه وضع می‌باشد.

روشهای روندیابی سیل دو گروه می‌باشند. در یکی از این گروهها از اصل پیوستگی جریان و رابطه بین دبی و ذخیرهٔ موقت آب در طول مسیر استفاده می‌شود که روشهای نسبتاً آسانی بوده و نتایج حاصله برای استفاده در کارهای آبی نیز از دقت کافی برخوردار است. در روشهای دیگر از اصول پیچیدهٔ هیدرولیک و قوانین جریانهای غیرماندگار در آبراههٔ رویاز استفاده می‌شود.

انتخاب نوع روش در روندیابی سیل به ماهیت مسأله و داده‌های موجود بستگی دارد. در عملیات معمول هیدرولوژی بیشتر از روشهای ساده و نوع اول استفاده می‌شود زیرا انجام آن، هم با دست و هم با کامپیوتر امکان‌پذیر است، حال آنکه در روشهای دوم استفاده از کامپیوتر اجتناب‌ناپذیر بوده و علاوه بر آن به اطلاعات وسیع هیدرولیکی نیز نیازمندیم.

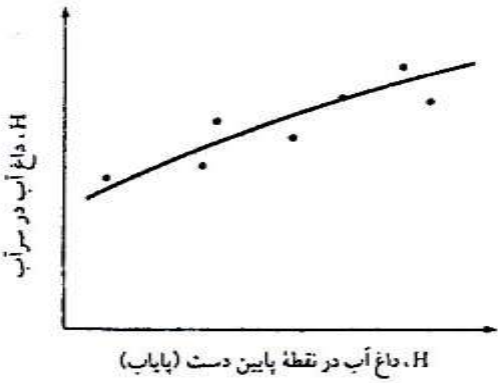


شکل ۱۶-۱ جابجایی و پایین افتادن دبی اوج در هیدروگراف پایاب نسبت به هیدروگراف سرآب.

۱۶-۲ روندیابی ساده یا غیرذخیره‌ای

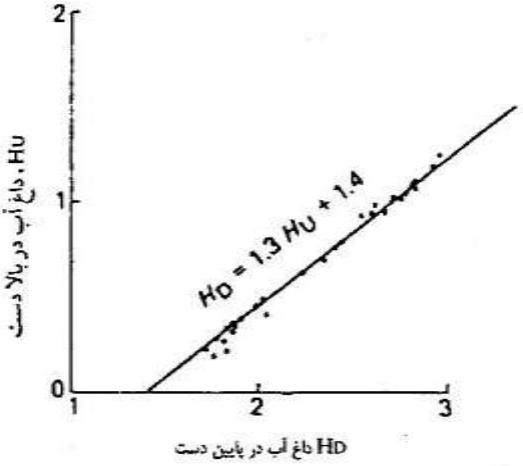
گاهی اوقات گفته می‌شود که «مهندسی» یعنی حل منطقی یک مسأله که دربارهٔ آن اطلاعات چندانی وجود نداشته باشد. این موضوع در روندیابی سیل بخوبی صادق است و یک نفر مهندس قادر است بدون داشتن اطلاعات مدوّن به نتایج مورد نظر برسد. در صورتی که هیچگونه داده‌های هیدروگرافی در محل موجود نباشد و بخواهیم با داشتن حداکثر دبی سیل در یک نقطه از سرآب مقدار آن را در نقطه‌ای از پایاب به دست آوریم ساده‌ترین روش استفاده از

خطوط داغ آب است. برای این منظور داغ‌آبهای مختلف که ناشی از سیلهای مشخص باشند دردو نقطه‌ازمسیر رودخانه‌تعیین وبااستفاده‌ازشعاع‌هیدرولیکی، شیب رودخانه و مقطع جریان، مقدار دبی در هر محل تخمین زده می‌شود. سپس بین دبی‌ها یا تراز داغ آب در بالا دست و پایین دست که از سیلهای مختلف ناشی شده‌اند رابطه‌ای مشابه شکل ۱۶-۲ بدست می‌آوریم.



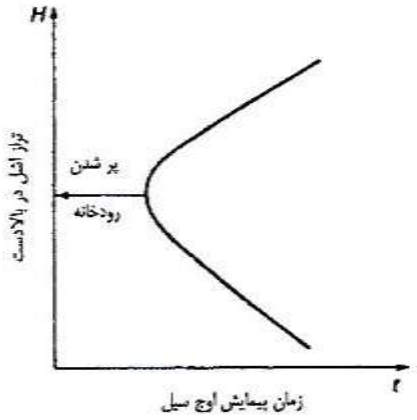
شکل ۱۶-۲ رابطهٔ تراز داغ‌آب دبی اوج سیل در دو نقطه از مسیر رودخانه.

معادلهٔ خط یا منحنی که از بین نقاط مشاهده شده می‌گذرد با روش برازش منحنی قابل محاسبه است. مثلاً ممکن است مطابق شکل ۱۶-۳ این رابطه، خطی با معادلهٔ $H_D = 1.3\ H_U + 1.4$ باشد که در آن H_U و H_D به ترتیب تراز داغ‌آب در نقطهٔ سرآب و پایاب می‌باشد. از روی این معادله می‌توان با داشتن داغ‌آب در بالادست مقدار متناظر آن را در نقطهٔ پایین دست تخمین زد.



شکل ۱۶-۳ نمونه‌ای از رابطهٔ ریاضی که ممکن است بین تراز داغ‌آب در دو نقطه از رودخانه وجود داشته باشد.

بنابراین اگر در رودخانه‌ای هیچ گونه آمار اندازه‌گیری دبی و هیدروگرافی وجود نداشته باشد روش فوق می‌تواند تا اندازه‌ای پاسخگوی مسأله باشد. در مورد مدت زمانی که دبی اوج سیل، فاصلهٔ بین دو نقطه را طی می‌کند می‌توان بر اساس تجربه و مشاهدات محلی و کسب اطلاعات از ساکنین حاشیهٔ رودخانه تصمیم‌گیری کرد. در شکل ۱۶-۴ تیپ منحنی تغییرات تراز داغ‌آب در نقطهٔ بالادست و زمانی که سیل طی می‌کند تا خود را به نقطهٔ مشخصی در پایین دست برساند، مشاهده می‌گردد.



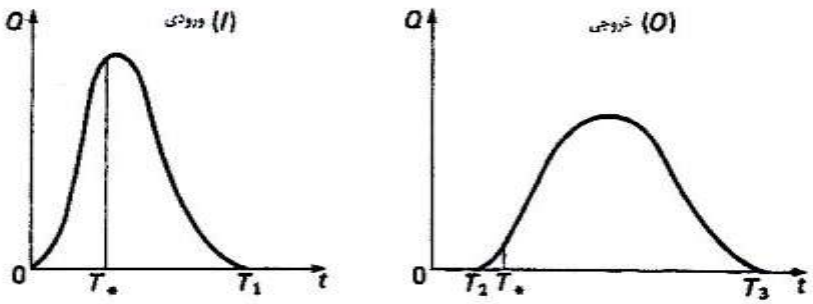
شکل ۱۶-۴ تیپ منحنی زمان پیمایش دبی اوج سیل .

در شکل ۱۶-۴ ملاحظه می‌گردد که با افزایش رقوم داغ‌آب زمان پیمایش کاهش پیدا کرده و به ازای مقدار مشخصی از داغ‌آب (یا دبی) به حداقل خود رسیده است و از این به بعد اگر دبی افزایش یابد آب در اطراف رودخانه پخش می‌شود و زمان پیمایش دبی اوج نیز افزایش می‌یابد.

مزیت عمدهٔ روش ساده و غیرذخیره‌ای این است که می‌توان آن را در بین دو نقطه که فقط آمار اندازه‌گیری اشل در مورد آنها وجود دارد به‌کار برد. علاوه بر این تخمین دبی در پایین دست سریع و آسان صورت می‌گیرد. ولی امروزه با وجود کامپیوترهایی که حجم عظیمی از داده‌ها را در مدت کوتاهی تجزیه و تحلیل می‌کنند این موضوع نمی‌تواند مزیتی به حساب آید و بهتر است از روشهای دقیق‌تر استفاده گردد.

۱۶-۳ روندیابی ذخیره‌ای

فرض کنید در نقطه A از مسیر یک رودخانه سیلی از زمان صفر شروع شده و در زمان T_1 به پایان رسیده است و منحنی تغییرات دبی در آن (هیدروگراف) مطابق شکل ۱۶-۵ باشد که این هیدروگراف را از این به بعد **هیدروگراف ورودی** خواهیم نامید. سطح زیر منحنی هیدروگراف



شکل ۱۶-۵

حجم آبی است که در مدت سیل از نقطهٔ A عبور می‌کند که اگر مقدار دبی را در لحظه‌ای از زمان، I بنامیم حجم آبی که در طول مدت سیل عبور می‌کند عبارت است از:

$$V_I = \int_0^{T_1} I\,dt \qquad (۱-۱۶)$$

حال اگر در همین دستگاه محور مختصات در نقطهٔ B که در پایین دست نقطهٔ A قرار گرفته است هیدروگراف همین سیل را رسم کنیم این هیدروگراف از زمان T_2 شروع می‌شود و در زمان T_3 خاتمه پیدا می‌کند. سطح زیر منحنی این هیدروگراف که آن را ***هیدروگراف خروجی*** می‌نامیم برابر حجم آبی است که در مدت سیل از نقطهٔ B عبور می‌کند و اگر مقدار دبی این هیدروگراف در هر لحظه از زمان O باشد این حجم عبارت است از :

$$V_O = \int_{T_2}^{T_3} O\,dt \qquad (۲-۱۶)$$

مسلماً این دو حجم باید باهم برابر باشند زیرا فرض این است که در فاصلهٔ بین دو نقطه نه آبی تلف شود و نه بر آن افزوده گردد. لذا،

$$\int_0^{T_1} I\,dt = \int_{T_2}^{T_3} O\,dt \qquad (۳-۱۶)$$

حال اگر زمان T^* از شروع سیل در نقطهٔ A را در نظر بگیریم در این مدت به اندازهٔ سطح زیر منحنی از صفر تا T^* یعنی $\int_0^{T^*} I\,dt$ از نقطهٔ A آب عبور کرده است و اگر همین زمان T^* را درهیدروگراف خروجی در نظر بگیریم حجم آبی که T^* از زمان صفر از نقطهٔ B گذشته است به اندازهٔ سطح زیرمنحنی‌بین T_2 و T^* است‌یعنی $\int_{T_2}^{T^*} O\,dt$ ولی این دو سطح برابر نیستند یعنی،

$$\int_0^{T^*} I\,dt > \int_{T_2}^{T^*} O\,dt \qquad (۴-۱۶)$$

مابه التفاوت نامعادلهٔ ۱۶-۴ مقدار آبی است که در داخل رودخانه بین نقطهٔ A و B بطور موقت ذخیره شده است که بتدریج از آن خارج خواهد شد و اگر آن را با S نشان دهیم.

$$S = \int_0^{T^*} I\,dt - \int_{T_2}^{T^*} O\,dt \qquad (۵-۱۶)$$

$$S = \int_0^{T^*} (I - O)\,dt \qquad (۶-۱۶)$$

توصیف دیگر این معادله آن است که سرعت تغییرات حجم ذخیره موقت نسبت به زمان برابر است با تفاضل دبی ورودی و خروجی یعنی :

$$\frac{dS}{dt} = I - O \qquad (۷-۱۶)$$

معادلهٔ ۱۶-۷ در واقع مشتق معادله ۱۶-۶ به شمار می‌رود. این معادله اساس تمام روشهای روندیابی ذخیره‌ای است. مسألهٔ روندیابی آن است که با داشتن تغییرات I نسبت به زمان و داشتن اطلاعاتی در مورد S بتوانیم تغییرات O را نسبت به زمان به‌دست آوریم. معادلهٔ ۱۶-۷ بسادگی و بطور مستقیم قابل حل نیست و برای حل آن باید از روشهایی مانند روش تفاضلهای جزیی (finite difference) استفاده کرد. در این روش دوره زمانی مشخصی را انتخاب می‌کنیم (ΔT) و اگر مقادیر I، O و S را در ابتدا و انتهای دوره ΔT به ترتیب I_1، I_2، O_1، O_2 و S_1 و S_2 در نظر بگیریم در این صورت خواهیم داشت:

$$\frac{dS}{dt} = I - O$$

$$dS = I\,dt - O\,dt$$

$$S_2 - S_1 = \frac{I_1 + I_2}{2}\Delta T - \frac{O_1 + O_2}{2}\Delta T \qquad (۸-۱۶)$$

البته مقدار ΔT باید بقدری کوچک انتخاب شود که بتوان در طی آن تغییرات I و O را به صورت خطی فرض کرد. معمولاً ΔT حدود $\frac{1}{6}$ زمان رسیدن هیدروگراف ورودی به نقطهٔ اوج در نظر گرفته می‌شود.

حال به اولین دوره ΔT که از زمان صفر شروع می‌شود توجه کنید. در این دوره تمام عوامل به جز O_2 و S_2 معلوم می‌باشند. بنابراین یک معادلهٔ دیگر نیز لازم است تا بتوان O_2 را در انتهای دوره بر اساس دو معادله و دو مجهول محاسبه کرد. پس از آنکه O_2 محاسبه شد، همین عمل برای دوره بعد انجام می‌شود تا سرانجام O در انتهای هر دوره مشخص شده و بتوان براساس آن هیدروگراف خروجی را رسم کرد. در واقع همین ماهیت معادلهٔ دوم است که دو روش عمده را در روندیابی، مشخص می‌سازد و ما در این‌جا به بحث پیرامون آنها می‌پردازیم.

۱۶-۳-۱ روندسازی در مخزن

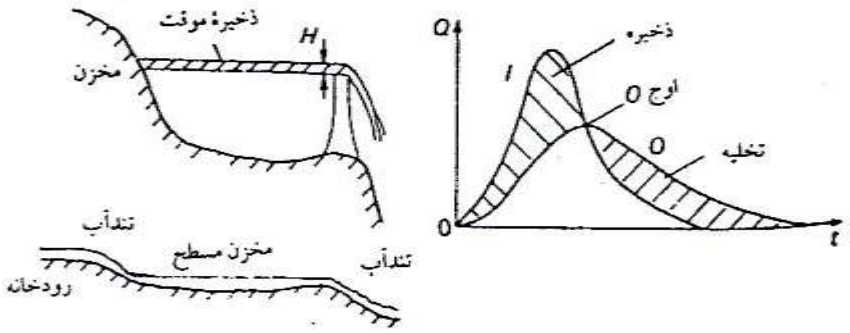
اگر هیدروگراف سیلی که وارد مخزن پر از آب یک سد می‌شود مشخص باشد و بخواهیم

هیدروگراف سیل خروجی از آن را تخمین بزنیم به آن روندیابی مخزن گفته می‌شود. چنانچه به شکل ۱۶-۶ توجه شود چنانچه سیلی وارد مخزن سد که فرضاً پر از آب است شود ابتدا مقداری از حجم آب سیل موقتاً در مخزن ذخیره و سپس بتدریج از آن خارج می‌شود. این امر باعث جابجایی دبی اوج هیدروگراف و پایین افتادن آن می‌شود. بطوری که هیدروگراف خروجی از مخزن هم اوج کمتری دارد و هم زمان وقوع آن به تعویق می‌افتد.

در مورد یک مخزن، مقدار آبی که در داخل آن ذخیره می‌شود تابع مستقیمی از ارتفاع سطح آب نسبت به تاج یا لبهٔ سرریز (H) است. علاوه بر این دبی خروجی از سرریز (O) نیز تابع مستقیمی از رقوم سطح آب یا H است، پس بطور غیرمستقیم S تابعی از O است. معادلهٔ ۱۶-۸ را به صورت زیر نیز می‌توانیم بنویسیم

$$\left(\frac{S_2}{\Delta T} + \frac{O_2}{2}\right) = \left(\frac{S_1}{\Delta T} + \frac{O_1}{2}\right) + \frac{I_1 + I_2}{2} - O_1 \qquad (۹-۱۶)$$

چون S تابع O می‌باشد لذا $\frac{S}{\Delta T} + \frac{O}{2}$ نیز به ازای مقدار مشخص ΔT تابع O است.



شکل ۱۶-۶ روندیابی در مخزن.

حال تغییرات O را نسبت به $\left(\frac{S}{\Delta T} + \frac{O}{2}\right)$ در یک دستگاه محور مختصات معمولی رسم می‌کنیم، بدین ترتیب که به جای ΔT مقدار مشخصی را می‌گذاریم و به ازای H های مختلف مقادیر O و سپس $\frac{S}{\Delta T} + \frac{O}{2}$ را محاسبه و سرانجام در یک دستگاه محور مختصات O را نسبت به $\frac{S}{\Delta T} + \frac{O}{2}$ رسم می‌کنیم که اگر $\frac{S}{\Delta T} + \frac{O}{2}$ را برابر G فرض کنیم معادلهٔ ۱۶-۹ به صورت زیر خواهد بود.

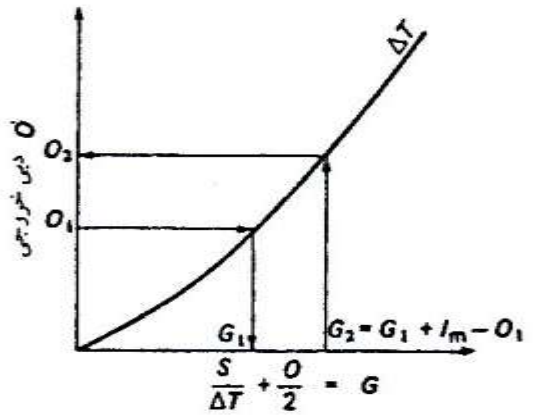
$$G_2 = G_1 + \frac{I_1 + I_2}{2} - O_1 \qquad (۱۰-۱۶)$$

$$G_2 = G_1 + I_m - O_1 \qquad (۱۱-۱۶)$$

که I_m میانگین I_1 و I_2 است. بنابراین برای آن که بتوانیم به ازای مقدار مشخص ΔT مقادیر S و O و G را به‌دست آوریم رسم چنین منحنی الزامی است. در شکل ۱۶-۷ تیپ رابطه بین O و

G که همان $\left(\frac{S}{\Delta T}+\frac{O}{2}\right)$ است مشاهده می‌شود.

با داشتن معادلهٔ ۱۶-۱۱ و منحنی شکل ۱۶-۷ می‌توان مسأله را گام‌بگام حل نمود. بدین‌ترتیب که در ابتدای دوره زمانی ΔT مقادیر G_1 و O_1 از دوره قبل ـ و یا از شرایط موجود قبل از شروع سیل ـ معلومند و I_m نیز از روی هیدروگراف ورودی معلوم است، لذا تنها مجهول معادله ۱۶-۱۱ همان G_2 است که به دست می‌آید. با داشتن G_2 از روی منحنی ۱۶-۷ مقدار O_2 که دبی خروجی در انتهای دوره می‌باشد محاسبه می‌شود.

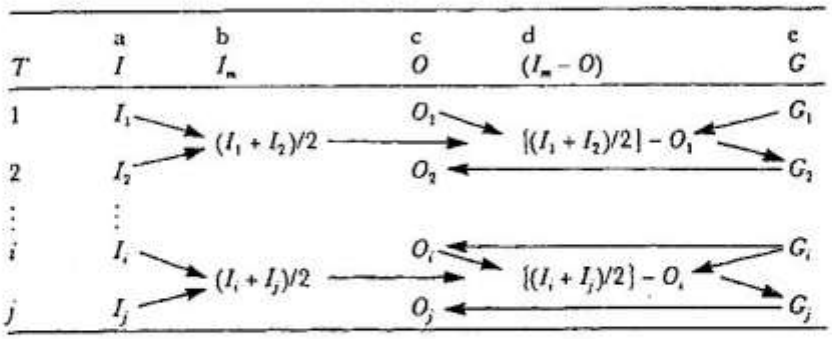


شکل ۱۶-۷

نحوهٔ گام‌بگام محاسبات در جدول ۱۶-۱ بخوبی نشان داده شده است. بدین ترتیب که محاسبات با داده‌های معلوم I_1 و I_2 در ابتدا و انتهای دوره اول شروع می‌شوند (ستون a). از روی این دو I_m محاسبه می‌شود زیرا $I_m = \frac{I_1 + I_2}{2}$ است ، دبی خروجی از مخزن (O_1) در ابتدای دوره شروع سیل معلوم است. این مقدار ممکن است صفر یا عدد دیگری باشد، لذا با داشتن O_1 مقدار G_1 را از روی نمودار ۱۶-۷ به‌دست آورده و در ستون e جای می‌دهیم. با داشتن O_1 و مقدار I_m می‌توانیم مقدار $I_m - O_1$ یا $\frac{I_1 + I_2}{2} - O_1$ را محاسبه کنیم که در ستون d قرار می‌دهیم. در این موقع از روی معادلهٔ ۱۶-۱۱ چون $(I_m - O)$ و G_1 را داریم مقدار G_2 محاسبه می‌شود و سپس از روی نمودار ۱۶-۷ مقدار O_2 به‌دست می‌آید که آن را در ستون c در مقابل شروع دوره دوم قرار می‌دهیم . پس از تکمیل این عملیات به سراغ دوره دوم می‌رویم. در دوره دوم I_2 و O_2 مشابه I_1 و O_1 در دوره اول عمل می‌کنند و بقیهٔ عملیات تکرار می‌شود. این عملیات آن‌قدر تکرار می‌شود تا هیدروگراف خروجی تکمیل گردد.

روش کنترل برای صحیح بودن عملیات روندیابی مخزن آن است که دبی اوج هیدروگراف خروجی در محل تقاطع هیدروگراف ورودی و خروجی (شکل ۱۶-۶) به وقوع بپیوندد. در این نقطه $\frac{dS}{dt} = 0$ لذا $I = 0$ است یعنی ذخیره به حداکثر خود می‌رسد و لذا O باید حداکثر باشد. از این به بعد ذخیرهٔ موقت تخلیه می‌شود.

جدول ۱۶-۱



● مثال ۱۶-۱

در یک سد مخزنی، سرریز اضطراری آن طوری طراحی شده است که رابطه بین دبی خروجی (O) از آن و ارتفاع آب روی تاج سر ریز (H) به صورت $Q = 110\ H^{1.5}$ است (H برحسب متر و Q برحسب مترمکعب در ثانیه). زمانی که مخزن تا لبهٔ تاج سرریز پر از آب است سطح مخزن ۷/۵ کیلومتر مربع می‌باشد و پس از آن به ازای هر متر افزایش ارتفاع، ۱/۵ کیلومتر مربع بر سطح دریاچه مخزن افزوده می‌شود. در همین زمانی که مخزن تا لبهٔ تاج سرریز پر از آب است، سیلی که هیدروگراف آن مثلثی شکل است وارد مخزن می‌شود. زمان پایهٔ هیدروگراف ۳۶ ساعت، دبی اوج آن ۳۶۰ مترمکعب در ثانیه و زمان وقوع دبی اوج ۱۲ ساعت پس از شروع سیل ا ست. دبی اوج هیدروگراف خروجی از سرریز و زمان وقوع آن را از شروع سیل در هیدروگراف ورودی حساب کنید.

حل

مقدار آبی که موقتاً در مخزن ذخیره می‌شود تابعی از تراز سطح آب نسبت به لبهٔ سرریز است. بنابراین،

$$S = \int_0^H A\ dh = \int_0^H 10^6\ (7.5 + 1.5h)\ dh$$

$$= 10^6\ (7.5\ H + 0.75\ H^2)\ \text{مترمکعب}$$

دبی خروجی از سرریز نیز تابعی از تراز سطح آب (H) است.

$$O = 110\ H^{1.5}\quad \text{مترمکعب در ثانیه}$$

حال دوره زمانی ΔT را به اندازهٔ ۲ ساعت $(\Delta T = \frac{12}{6} = 2)$ که معادل ۷۲۰۰ ثانیه است انتخاب می‌کنیم. براساس این دوره (ثانیه ۷۲۰۰ =ΔT) مقدار G را از فرمول محاسبه می‌کنیم.

$$G = \frac{S}{\Delta T} + \frac{O}{2}$$

$$G = \frac{10^6}{7200}(7.5\ H + 0.75\ H^2) + \frac{110}{2}\ H^{1.5}$$

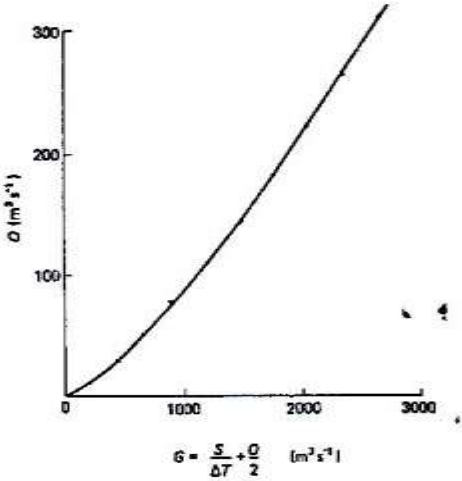
$$G = 104\ H(10 + 0.53\sqrt{H} + H)$$

به ازاء ترازهای مختلف آب (H) مقادیر O و Gمطابق جدول ۱۶-۲محاسبه وردیف می‌شوند.

جدول ۱۶-۲

H	O	104H	0.53 √H	(10+0.53 √H+H)	G
0.2	10	20.8	0.24	10.26	213
0.4	28	41.6	0.34	10.38	432
0.6	51	62.4	0.41	10.47	653
0.8	79	83.2	0.47	10.55	878
1.0	110	104.0	0.53	11.53	1199
1.2	144	124.8	0.58	11.78	1470
1.4	182	145.6	0.63	12.03	1752
1.6	223	166.4	0.67	12.27	2042
1.8	265	187.0	0.71	12.51	2339
2.0	312	208.0	0.75	12.75	2652

در این جدول O از رابطهٔ $O = 110\ H^{1.5}$ و G از رابطهٔ $G = 104\ H(10 + 0.53\sqrt{H} + H)$ محاسبه شده‌اند. باداشتن مقادیر مختلف O و G در جدول فوق منحنی تغییرات G نسبت به O در یک دستگاه محور مختصات رسم می‌شود که شکلی مطابق شکل ۱۶-۸ خواهد داشت. توجه شود که این نمودار فقط برای $\Delta T = 2\ hr$ صادق است.

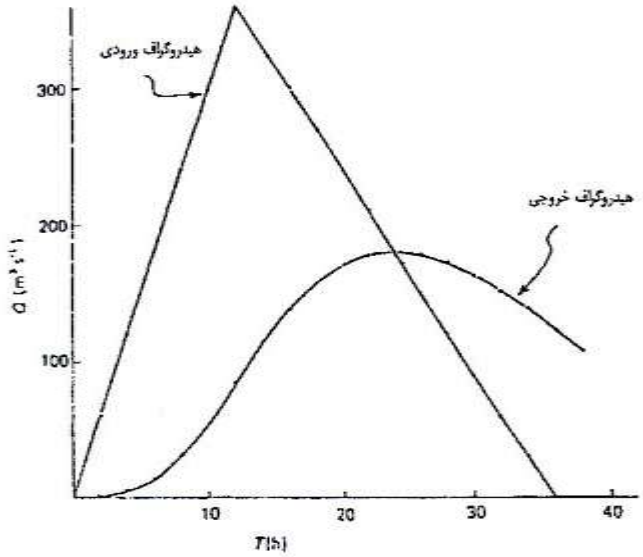


شکل ۱۶-۸

بامشخص شدن رابطهٔ G و O می‌توانیم جدول ۱۶-۳ را تشکیل دهیم. در این جدول اولین ستون مربوط به زمان است که از صفر تا ۳۸ ساعت، با دوره‌های ۲ ساعتی نوشته شده است. ستون ۲ مقادیر مربوط به هیدروگراف ورودی است که این مقادیر مستقیماً به ازای T های مختلف از روی هیدروگراف ورودی که در شکل ۱۶-۹ به صورت مثلثی رسم شده است به‌دست می‌آیند. ستون سوم متوسط دبی ورودی در فاصلهٔ هر دوره زمانی است. مثلاًدردوره اول یا اولین ۲ ساعت $I_m = \frac{0 + 60}{2} = 30$ و یا در دومین دوره $I_m = \frac{60\ 120}{2} + = 90$ است و الخ. بهمین دلیل اعداد ستون I_m در حدفاصل ارقام ستون I نوشته شده است. درابتدای‌دوره اول، O مشخص است ($O_1 = 0$) که از روی نمودار ۱۶-۸ مقدار G_1 نیز به ازای $O_1 = 0$ برابر صفر است (رقم اول ستون ۶). با داشتن O_1 و $\frac{I_1 + I_2}{2}$ مقدار $\frac{I_1 + I_2}{2} - O_1$ را محاسبه می‌کنیم و در ستون ۵ قرار می‌دهیم و از روی معادلهٔ ۱۶-۱۰ یا ۱۶-۱۱ مقدار G_2 را به دست می‌آوریم که $G_2 = 30 - 0 + 30 = 0$ خواهد بود (دومین رقم ستون ۶). با داشتن G_2 مقدار O_2 را از نمودار ۱۶-۸ به‌دست می‌آوریم که در این مثال برابر ۱ خواهد شد و آن را در ستون ۴ درمقابل زمان ۲ ساعت قرار می‌دهیم. این عمل را برای دوره دوم شروع می‌کنیم و محاسبات را آنقدر ادامه می‌دهیم تا هیدروگراف خروجی نیز به صفر برسد. در این مثال فقط برای ۳۸ ساعت محاسبات انجام و تغییرات O (دبی‌خروجی) نسبت به زمان در همان محورهای مختصات هیدروگراف‌ورودی‌رسم‌شده‌است.مشاهده‌می‌شودکه‌دبی‌اوج‌هیدروگراف‌خروجی ۱۸۰ مترمکعب در ثانیه و زمان وقوع آن ۲۴ ساعت پس از شروع سیل در بالادست است.

جدول ۱۶-۳

T (hr)	I (m^3/s)	I_m (m^3/s)	O (m^3/s)	I_m-O (m^3/s)	G (m^3/s)
0	0		0		0
		30		30	
2	60		1		30
		90		89	
4	120		6		119
		150		144	
6	180		14		163
		210		196	
8	240		31		459
		270		239	
10	300		55		698
		330		275	
12	360		85		973
		345		260	
14	330		114		1233
		315		201	
16	300		138		1434
		285		147	
18	270		158		1581
		288		97	
20	240		171		1678
		225		54	
22	210		178		1732
		195		17	
24	180		180		1749
		165		-15	
26	150		178		1734
		135		-43	
28	120		173		1691
		105		-68	
30	90		163		1623
		75		-88	
32	60		152		1535
		45		-107	
34	30		139		1328
		15		-124	
36	0		123		1304
		0		-123	
38			108		1181



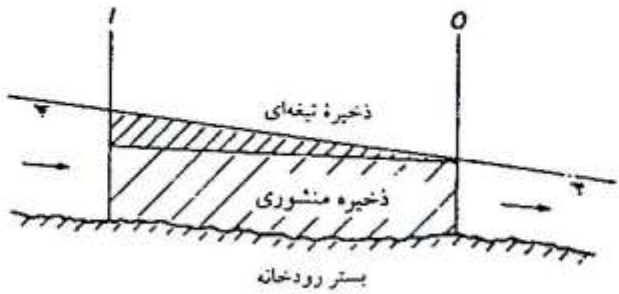
شکل ۱۶-۹

۱۶-۳-۲ روندسازی در رودخانه

در رودخانه‌ها برخلاف مخازن که سطح آب بطور افقی در نظر گرفته می‌شد نمی‌توان سطح آب را در طول مسیر رودخانه افقی فرض کرد. علاوه بر این در مخازن، حجم آب ذخیره شده فقط تابعی از تراز سطح آب در روی سرریز فرض می‌شد. حال آنکه حجم آب ذخیره شده در مسیر یک رودخانه تابعی از تراز سطح آب در ابتدا و انتهای مسیر است و نه فقط انتهای آن. در شکل ۱۶-۱۰ چگونگی ذخیرهٔ موقت آب در قسمتی از مسیر یک رودخانه نشان داده شده است. بار دیگر می‌توان **معادلهٔ پیوستگی جریان** را در هر لحظه از زمان به صورت زیر نوشت.

$$\frac{dS}{dt} = I - O \qquad (۱۲-۱۶)$$

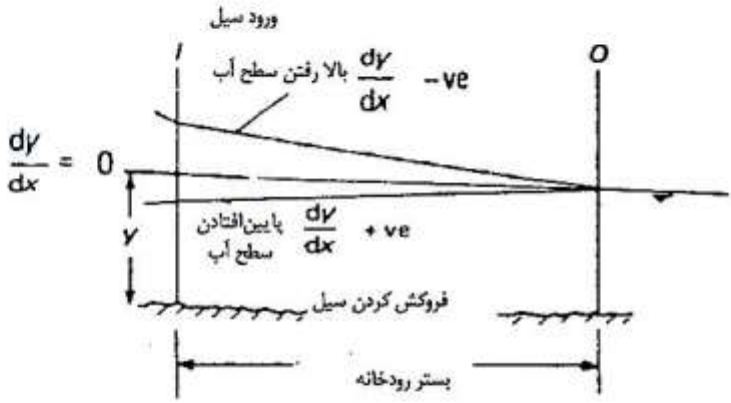
در این معادله S مقدارکل آب ذخیره شده در داخل مسیر است که شامل **ذخیرهٔ منشوری** و **ذخیرهٔ تیغه‌ای** است. ذخیرهٔ منشوری تابع ارتفاع سطح آب در انتهای مسیر بوده و در آن فرض می‌شود که سطح آب افقی است و از شیب رودخانه صرفنظر می‌شود. بنابراین با فرض افقی بودن سطح آب در ذخیرهٔ منشوری اگر گفته شود که دبی خروجی (O) فقط تابع تراز آب در پایین دست است دور از واقعیت نخواهد بود. اگر فقط ذخیرهٔ منشوری وجود می‌داشت می‌بایست دبی ورودی به مسیر (I) و دبی خروجی از آن (O) برابر باشند ولی چون این دو مساوی نیستند لذا ذخیره‌تیغه‌ای به وجود می‌آید و مقدار آن تابع تفاوت بین دبی ورودی و خروجی (I−O) است. از نظر ذخیرهٔ تیغه‌ای سه حالت ممکن است اتفاق افتد. اگر دبی ورودی بیشتر از دبی خروجی از مسیر باشد (I>O)، ذخیرهٔ تیغه‌ای به ذخیره منشوری اضافه می‌شود. اگر سطح آب افقی باشد مقدار



شکل ۱۶-۱۰ ذخیرهٔ آب در مسیر رودخانه

ذخیره تیغه‌ای (Ve) صفر است و اگر سیل به پایان‌برسد یعنی دبی ورودی کمتر از مقدار دبی خروجی باشد (I<O) در این‌صورت ذخیرهٔ تیغه‌ای منفی و جهت محاسبهٔ ذخیرهٔ کل باید ذخیرهٔ تیغه‌ای را از ذخیرهٔ منشوری کسر کرد (شکل ۱۶-۱۱).اگر ذخیرهٔ منشوری راکه فقط تابع O می‌باشد [$f_1(O)$] وذخیرهٔ تیغه‌ای که تابع I−O است [$f_2(I-O)$] جمع‌کنیم ذخیرهٔ کل به‌دست می‌آید. به علامت f_2 نیز بسته به حالات سه‌گانه فوق نیز توجه شود.

$$S = f_1(O) + f_2(I - O) \qquad (۱۶-۱۳)$$



شکل ۱۶-۱۱ تغییرات ذخیره در طی جریان.

در روندیابی مخزن S فقط تابع O بود ولی در این‌جا شرایط پیچیده‌تر است. زیرا S هم تابع I است و هم تابع O. در هر حال در این‌جا نیز دو معادلهٔ اصلی به کار گرفته می‌شوند که عبارتند از:

$$\frac{dS}{dt} = I - O$$

$$S = f_1(O) + f_2(I - O)$$

معادلهٔ اول را به صورت $\frac{(I_1 + I_2)\Delta T}{2} - \frac{(O_1 + O_2)\Delta T}{2} = S_2 - S_1$ نیز می‌توانیم بنویسیم. برای محاسبهٔ O_2 در انتهای هر دوره زمانی می‌توان از روش تفاضلهای جزیی استفاده کرد. برای حل عددی و عملی این معادله نیز روشهای گوناگونی به‌کار گرفته می‌شود که روش ماسکینگام (Muskingum) مناسبترین روش است و در این‌جا آن را مورد بحث قرار می‌دهیم.

روش ماسکینگام اگر فرض کنیم توابع $f_1(O)$ و $f_2(I - O)$ هر دو توابع خطی باشند، می‌توان معادلهٔ این دو را به صورت زیر نوشت.

$$f_1(O) = k\,O$$

$$f_2(I - O) = b(I - O)$$

K و b ضرایبی هستند که دارای بعد زمان می‌باشند. بنابراین،

$$S = f_1(O) + f_2(I - O)$$

$$S = kO + b(I - O)$$

$$S = kO + bI - bO$$

$$S = bI + (k - b)O$$

$$S = k\left[\frac{b}{k}I + \left(1 - \frac{b}{k}\right)O\right] \qquad (۱۶-۱۴)$$

اگر مقدار $\frac{b}{k}$ برابر x فرض شود $\left(\frac{b}{k} = x\right)$ در این صورت معادلهٔ ۱۶-۱۴ عبارت خواهد بود از:

$$S = k[x\,I + (1 - x)O] \qquad (۱۶-۱۵)$$

x ضریب بدون بعدی است که درجهٔ اهمیت I و O را در تعیین ظرفیت ذخیرهٔ رودخانه نشان می‌دهد. مقدار x حداقل صفر و حداکثر ۰/۵ و بطور متوسط بین ۰/۲ تا ۰/۴ تغییر می‌کند. اگر به جای S_1 و S_2 مقادیر مربوطه را قرار دهیم شکل تفاضلهای جزیی معادلهٔ پیوستگی به‌صورت زیر در خواهد آمد.

$$\frac{1}{2}(I_1 + I_2)\Delta T - \frac{1}{2}(O_1 + O_2)\Delta T = k[xI_2 + (1 - x)O_2] - k[xI_1 + (1 - x)O_1]$$

که می‌شود آن را به شکل زیر نوشت.

$$O_2(-0.5\,\Delta T - k + kx) = I_1(-kx - 0.5\Delta T) + I_2(kx - 0.5\Delta T) + O_1(-k + kx + 0.5\Delta T)$$

حال معادلهٔ مذکور را می‌توانیم به صورت زیر خلاصه کنیم.

$$O_2 = C_1I_1 + C_2I_2 + C_3O_1 \qquad (۱۶-۱۶)$$

که در آن:

$$C_1 = \frac{\Delta T + 2kx}{\Delta T + 2k - 2kx}$$

$$C_2 = \frac{\Delta T - 2kx}{\Delta T + 2k - 2kx}$$

$$C_3 = \frac{-\Delta T + 2k - 2kx}{\Delta T + 2k - 2kx} \qquad (۱۷-۱۶)$$

چنانچه مقادیر C_3 ، C_2 و C_1 را جمع کنیم برابر یک خواهد شد ($\Sigma C = 1$) لذا $C_3 = 1-(C_1 + C_2)$ است و با محاسبهٔ C_1 و C_2 مقدار C_3 از این فرمول به‌دست می‌آید.

طرزکار با روش ماسکینگام الف ـ برای حل معادلهٔ $O_2 = C_1I_1 + C_2I_2 + C_3O_1$ باید مقادیر I_1 و I_2 و O_1 در دوره زمانی ΔT مشخص باشد. همچنین لازم است ضرایب x و k را هم داشته باشیم تا بتوان C_1 ، C_2 و C_3 را محاسبه کرد. به عبارت دیگر برای محاسبهٔ O_2 لازم است تمام اجزای سمت راست معادله در دست باشند.

ب ـ یک هیدروگراف سیل ورودی (I) و هیدروگراف سیل خروجی آن را (O) از آمار سیلهای قبلی که در مسیر اندازه‌گیری شده‌اند درنظر بگیرید. وجود چنین هیدروگراف‌هایی برای تخمین x و k الزامی است.

ج ـ در دوره‌های مختلف زمانی مقدار سیل ورودی (I) و خروجی (O) را از روی این دو هیدروگراف به‌دست آورید.

د ـ مقداری را برای x بین صفر تا ۰/۵ انتخاب کنید و سپس مقدار $[xI + (1 - x)O]$ را محاسبه نمایید.

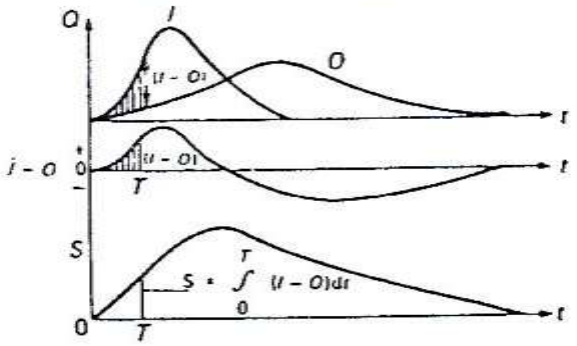
هـ – در هر دوره زمانی از روی هیدروگراف‌های ورودی و خروجی که دربند ۲ گفته شد مقدار (I - O) را که در واقع ذخیرهٔ واقعی است، حساب کنید. زیرا اگر مطابق شکل ۱۶-۱۲ هیدروگراف ورودی و خروجی را از هم کسر کنیم تغییرات ذخیره در ΔTهای مختلف به‌دست می‌آید که معادلهٔ آن عبارت خواهد بود از:

$$S = \int_0^T (I - O)dt \qquad (۱۸-۱۶)$$

و ـ حال به ازای هر ΔT با داشتن S (ذخیرهٔ واقعی) و $xI + (1 - x)O$ در یک دستگاه محور مختصات تغییرات S و $xI + (1-x)O$ را رسم کنید، مشاهده خواهد شد که منحنی حاصله از وصل کردن نقاط مختلف حالت حلقه (لوپ) را پیدا خواهد کرد.

ز ـ پیدا شدن حالت حلقه نشان آن است که مقدار انتخاب شده x صحیح نبوده است. بار دیگر برای x مقدار دیگری انتخاب می‌کنیم و همین عمل تکرار می‌شود.

ملاحظه خواهد شد که اگر x را مناسب انتخاب کرده باشید حلقه باریکتر شده و بیشتر به یک خط شبیه خواهد بود.

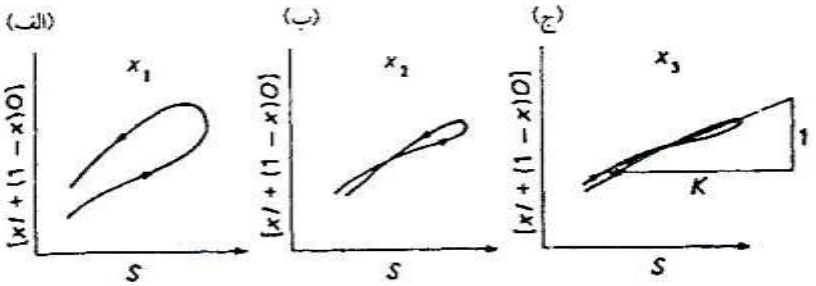


شکل ۱۶-۱۲ محاسبهٔ ذخیرهٔ واقعی در قسمتی از مسیر رودخانه.

ح ـ این عمل را آنقدر ادامه می‌دهیم تا حلقه حاصله مطابق شکل ۱۶-۱۳ بسیار باریک و مشابه خط مستقیم گردد. در این حالت معلوم می‌شود که مقدار انتخاب شده x صحیح است.

ط ـ عکس شیب خط (حلقه‌ای) حاصله مطابق شکل ۱۶-۱۳ (ج) مقدار k خواهد بود.

ی ـ با به‌دست آوردن x و k به ازای ΔT های مختلف C_1 ، C_2 ، C_3 و سپس از روی معادلهٔ $O_2 = C_1I_1 + C_2I_2 + C_3 O_1$ مقدار O_2 در انتهای هر دوره به‌دست می‌آید. اینک به یک مثال که به‌روش ماسکینگام حل شده است توجه کنید.



شکل ۱۶-۱۳ روش آزمون و خطا در محاسبهٔ x و k

● مثال ۱۶-۲

در دو نقطه از مسیر یک رودخانه در هنگام وقوع سیل اندازه‌گیری دبی به عمل آمده است. آمار هیدروگراف سیل ورودی و خروجی بین دو نقطه در جدول ۱۶-۴ نشان داده شده است. باتوجه به این اطلاعات ضرایب x و k را برای این قطعه از رودخانه محاسبه نمایید. باداشتن ضرایب x و k هیدروگراف سیل ورودی را روندیابی کنید.

جدول ۱۶-۴

T(hr)	0	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132
$I(m^3s^{-1})$	22	35	103	109	86	59	39	28	22	20	19	18
$O(m^3s^{-1})$	22	21	34	55	75	85	80	64	44	30	22	20

حل

۱- یادداشتن هیدروگراف ورودی (I) و خروجی (O) مقدار (I - O) برای هر یک از ΔTها که در اینجا ۱۲ ساعت می‌باشد حساب گردیده و در ستون چهارم جدول ۱۶-۵ قرار داده شده است. مثلاً در مقابل رقم ۱۲ ساعت $I - O = 14\ m^3/sec$ می‌باشد.

۲- حجم ذخیرهٔ واقعی از حاصلضرب (I − O) در ΔT به دست می‌آید و در ستون پنجم جدول قرار داده می‌شود. مثلاً در انتهای دوره ۱۲ ساعته اول $S_1 = 14 \times 12 = 168\ m^3s^{-1}h$ می‌باشد.

۳- به x رقم اختیاری x= 0.3 داده و مقادیر $xI + (1 - x)O$ برای هر یک از دوره‌های زمانی محاسبه شده است که در ستون ۶ جدول ۱۶ - ۵ نوشته شده است. در این وضعیت $xI + (1 - x)O = 0.3(I) + 0.7(O)$ می‌باشد.

۴- ارقام ستونهای ۵ و ۶ جدول نسبت به همدیگر در یک دستگاه محور مختصات رسم می‌شوند منحنی به دست آمده در شکل ۱۶-۱۴ نشان داده شده است، چون تغییرات به حالت حلقه می‌باشد بهتر است مقدار x اصلاح شود.

۵- دوباره به x رقم x= 0.4 را داده و $x(I) + (1 - x)O$ برابر $0.4(I) + 0.6(O)$ خواهد شد که به ازای مقادیر مختلف ΔT مقدار آن محاسبه و در ستون ۷ جدول نشان داده شده است.

۶- مجدداً ارقام ستون ۵ و ۷ نسبت به همدیگر در یک دستگاه محور مختصات رسم و مشاهده می‌شود که حلقه حاصله نزدیک به یک خط است و اگر آن را مشابه یک خط فرض کنیم مقدار k مطابق شکل برابر خواهد بود با،

$$k = \frac{1800 - 680}{83 - 50} = 34$$

لذا شکل حاصله را به عنوان یک خط مستقیم که در آن عکس شیب خط (k) مساوی ۳۴ ساعت قبول نموده، بنابراین x= 0.4 و $k = 34\ hr$ خواهد بود.

۷- یادداشتن x و k مقادیر C_1 ، C_2 و C_3 محاسبه می‌شوند.

$$C_1 = \frac{\Delta T + 2kx}{\Delta T + 2k - 2kx} = \frac{12 + 2 \times 34 \times 0.4}{12 + 2 \times 34 - 2 \times 34 \times 0.4} = \frac{39.2}{52.8} = 0.74$$

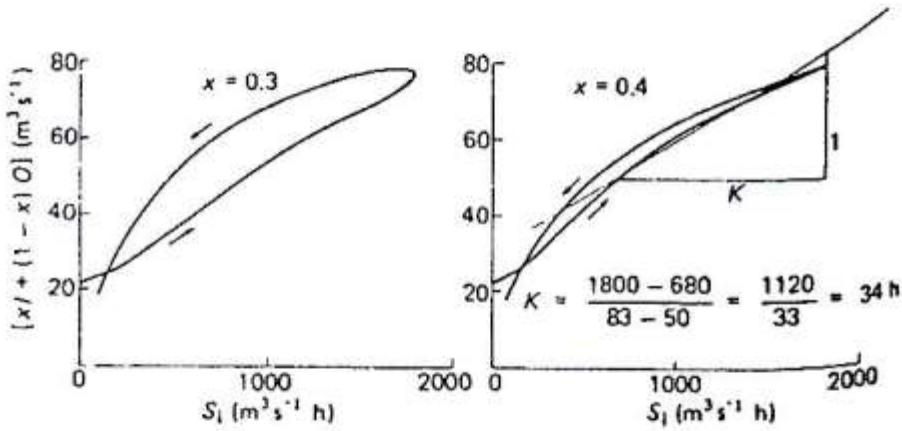
$$C_2 = \frac{\Delta T - 2kx}{\Delta T + 2k - 2kx} = \frac{12 - 2 \times 34 \times 0.4}{12 + 2 \times 34 - 2 \times 34 \times 0.4} = \frac{-15.2}{52.8} = -0.29$$

$$C_3 = 1 - C_1 - C_2 = 1 - 0.74 + 0.29 = 0.55$$

$$(\text{کنترل } C_3 = \frac{-\Delta T + 2k - 2kx}{\Delta T + 2k - 2kx} = \frac{28.8}{52.8} = 0.55)$$

جدول ۱۶-۵

T (hr)	I (m^3s^{-1})	O (m^3s^{-1})	I - O (m^3s^{-1})	Si ($m^3s^{-1}h$)	0.3(I)+0.7(0) (m^3s^{-1})	0.4(I)+0.6(O) (m^3s^{-1})
0	22	22	0	0	22	22
12	35	21	14	168	25	27
24	103	34	69	996	55	62
36	109	55	54	1644	71	77
48	86	75	11	1776	78	75
60	59	85	-26	1464	77	75
72	39	80	-41	972	68	64
84	28	64	-36	540	54	50
96	22	44	-22	276	37	35
108	20	30	-10	156	27	26
120	19	22	-3	120	21	21
132	18	20	-2	96	19	19



شکل ۱۶-۱۴

۸- با داشتن مقادیر x ، k ، C_1 ، C_2 و C_3 می‌توان هر سیل ورودی را روندیابی کرد و اگر بخواهیم هیدروگراف سیل ورودی را روندیابی کنیم مقادیر O_2 در انتهای دوره زمانی از فرمول زیر محاسبه می‌شود.

$$O_2 = C_1I_1 + C_2I_2 + C_3O_1$$

$$O_2 = 0.74I_1 - 0.29I_2 + 0.55O_1$$

که نتایج حاصله به صورت جدول ۱۶-۶ خواهد بود. مشاهده می‌شود که مقادیر روندیابی شده O کاملاً با آنچه در اندازه‌گیری به‌دست آمده است یکسان نیست ولی تفاوت از نظر مهندسی قابل اغماض است و این روش برای محاسبات روندیابی مناسب خواهد بود.

جدول ۱۶-۶

t(hr)	0	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132
$I(m^3s^{-1})$	22	35	103	109	86	59	39	28	22	20	19	18
O روندیابی شده	22	18	6	48	82	92	83	66	51	38	30	25

بطوری که ملاحظه شد محاسبات روندیابی ذخیره‌ای به مقدار زیادی محاسبات آزمون و خطا نیاز دارد که حجم عملیات آن بخصوص در شرایطی که تعداد روندیابیها بیش از یک باشد زیاد خواهد بود.

مسائل

۱۶-۱ چرا در روندیابی مخزن محل تلاقی بازوی پایین‌رونده هیدروگراف ورودی به مخزن با هیدروگراف خروجی از آن نقطه اوج هیدروگراف خروجی نیز می‌باشد (به شکل ۱۶-۹ توجه کنید).

۱۶-۲ حساب کنید پارامترهای k و x را برای قطعه‌ای از مسیر یک رودخانه، اندازه‌گیریهایی که در هنگام وقوع یک سیل در ابتدا و انتهای این قطعه صورت گرفته است نتایج زیر را به‌دست داده است.در جدول زیر همزمان دبی در دو نقطه اندازه‌گیری شده است که بعنوان دبی‌های ورودی و خروجی در ستونهای ۲ و ۳ این جدول ردیف شده‌اند.

۱ زمان (h)	۲ دبی ورودی (m^3/S)	۳ دبی خروجی (m^3/S)
0	40	40
6	160	52
12	382	60
18	548.8	124
24	498	240.3
30	408	316
36	328	352
42	260	348
48	220	328
54	188	300
60	164	270
66	144	246
72	124	232
78	108	204
84	97	180
90	84	156

۱۶-۳ باداشتن مقادیر k و x مسألهٔ قبل چنانچه سیلی با هیدروگراف زیر وارد این قطعه از مسیر رودخانه شود هیدروگراف خروجی آن را با روش ماسکینگام روندیابی کنید و آن را با هیدروگراف ورودی مقایسه نمایید.

۱ زمان (h)	۲ دبی ورودی (m^3/s)	۱ زمان (h)	۲ دبی ورودی (m^3/s)
0	48	96	141
12	93	108	117
24	288	120	96
36	365	132	84
48	306	144	75
60	255	156	66
72	210	168	60
84	171	180	57

منابع برای مطالعه بیشتر

1- Amein, M., *Stream flow routing on computer by characteristics,* Water Res.2, 1966.
2- Chow, V.T., *Open channel hydraulics,* McGraw Hill, New York, 1959.
3- Henderson, F., *Open channel flow*, Mac Millan, London, 1966.
4- Sharp, J. and P. Sawden, *BASIC hydrology,* Butterworths, London, 1984.
5- Shaw, E., *Hydrology in Practice,* Van Nostrand Reinhold, London, 1988.
6- Viessman, W. et al, *Introduction to hydrology,* IEP, New York, 1972.
7- Wilson, E., *Engineering hydrology,* Mac Millan, London, 1983.