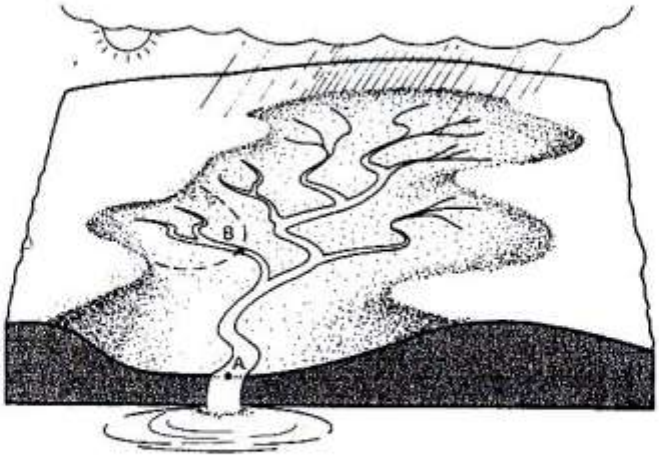
حوضه‌های آبریز و خصوصیات آنها

کلّیات	ارتفاع‌حوضه (پستی و بلندی)
شبکه رودخانه	شیب حوضه
خصوصیات فیزیکی حوضه‌ها	جهت شیب حوضه
مساحت حوضه	زمان تمرکز
محیط حوضه	خطوط هم- پیمایش
طول حوضه	مسائل
شکل حوضه	منابع برای مطالعه بیشتر

۱۲-۱ کلّیات

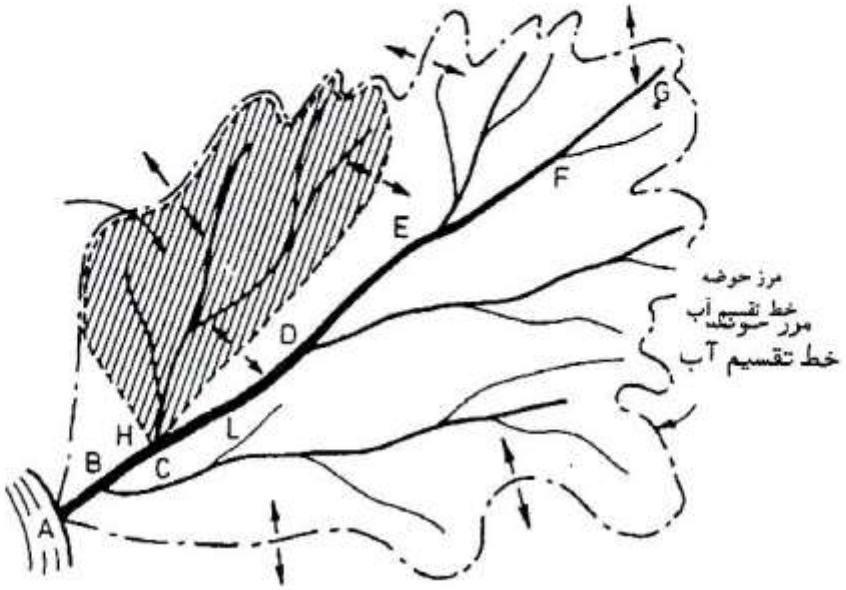
وجود پستی و بلندیها در سطح زمین باعث می‌شود که هنگام نزول باران و ایجاد جریان سطحی، آب از قلل ارتفاعات در امتداد شیب زمین جریان پیداکرده و به سمت نقاط پست زمین حرکت کند. خط‌الرأس ارتفاعات در واقع *خطوط تقسیم آب* (devides) بین طرفین ارتفاعات بوده و خط‌القعرها محل تمرکز رواناب می‌باشند. یک **حوضه آبریز** به مساحتی از زمین گفته می‌شود که اطراف آن را ارتفاعات دربرگرفته و لذا رواناب حاصله از بارندگی روی این سطح در گودترین نقطه آن تمرکز پیدا کرده و از نقطه‌ای که پایین‌ترین ارتفاع را دارا می‌باشد از حوضه خارج می‌گردد. بعبارت دیگر، حوضه آبریز مساحتی است که رواناب سطحی در آن بطور طبیعی به نقطه واحدی به نام **نقطه تمرکز** (point of concentration) هدایت می‌شود (شکل ۱۲-۱). اگر نقطه تمرکز داخل حوضه قرار گرفته باشد آن را **حوضه بسته** گویند، مانند کویر مرکزی ایران که سلسله ارتفاعات اطراف آن یک حوضه مسدود بزرگ را بوجود آورده‌اند. در حوضه‌های بسته رواناب از حوضه خارج نمی‌شود، اما اگر نقطه تمرکز در انتهای حوضه واقع شده باشد بطوریکه آب بتواند از آن نقطه به خارج از حوضه جریان پیدا کند آن را **حوضه باز** گویند. از آنجایی که حوضه‌ها نقش یک کاسه یا حوض را ایفا می‌کنند به آنها حوضه آبریز گفته می‌شود که به معنی حوضی است که آب داخل آن ریخته می‌شود. در برخی نوشته‌های فارسی آن را **حوزه** نیز



شکل ۱۲-۱ تصویر شماتیک از یک حوضه آبریز. نقاط A و B خروجی حوضه و زیر حوضه می‌باشند.

می‌نویسند. اما باید توجه داشت که حوزه یک مفهوم غیرفیزیکی داشته ولی حوضه آبریز مفهوم فیزیکی و توپوگرافیک دارد. حوضه آبریز را به زبان فرانسه و انگلیسی basin که به معنی **حوضچه** یا **لگن** است می‌گویند و در نوشته‌های انگلیسی به آن catchment و در متون علمی آمریکایی watershed گفته می‌شود. در مطالعات زهکشی به حوضه‌های تحت مطالعه حوضه زهکشی (drainage basin) هم گفته می‌شود. واژه watershed management که در فارسی آن را *آبخیزداری* می‌گوییم به معنی مدیریت حوضه‌های آبریز در جهت حفظ و نگهداری آنهاست. در کارهای آبی سروکار ما غالباً با حوضه‌های باز است که نقاط تمرکز روی خطّ‌القعرها که همان رودخانه‌ها باشند واقع می‌شوند. هر نقطه‌ای را که روی یک رودخانه در نظر بگیریم برای منطقه یا حوضه‌ای که در بالا دست آن نقطه واقع شده است نقطه تمرکز به حساب می‌آید. اگر به شکل ۱۲-۲ توجه شود، یک منطقه محصور شده توسط ارتفاعات است که به آن **مرز حوضه** یا **خط تقسیم آب** (water devide) گفته می‌شود و تشکیل حوضه آبریز باز را داده‌اند که در آن نقطه تمرکز یا محل خروجی آب از حوضه با A نشان داده شده است. نقطه A پایین‌ترین نقطه‌ای است که رواناب حاصله از بارندگیهایی که روی حوضه می‌بارد به آنجا هدایت می‌شود. داخل این حوضه یک **دره مرکزی** یا *رودخانه اصلی* وجود دارد که با خط سیاه درشت رسم شده و رواناب از دو طرف در محلهای B ، C و ... به داخل آن تخلیه می‌شود. مثلاً نقطه H که در داخل حوضه قرار گرفته است فقط رواناب قسمتی از حوضه را که با هاشور مشخص شده است دریافت می‌دارد. به این قسمت از حوضه که خود یک بخش جداگانه بوده و با رودخانه اصلی در نقطه H ارتباط پیدا می‌کند **زیر حوضه** (sub-basin) گفته می‌شود. هر حوضه آبریز از مجموعه زیادی زیر حوضه تشکیل شده و زیر حوضه‌ها نیز بنوبه خود به واحدهای کوچک تقسیم می‌شوند. حتی یک برگ

ساده و کوچک که باران روی آن می‌بارد یک حوضه آبریز بشمار می‌رود که در آن باران اضافی از قسمت انتهایی یا دهبرگ به خارج هدایت می‌شود. کوچکترین جزء یک حوضه آبریز که عملیات آبخیزداری روی آن پیاده می‌شود قطعه یا پارسل (parcel) نام دارد.

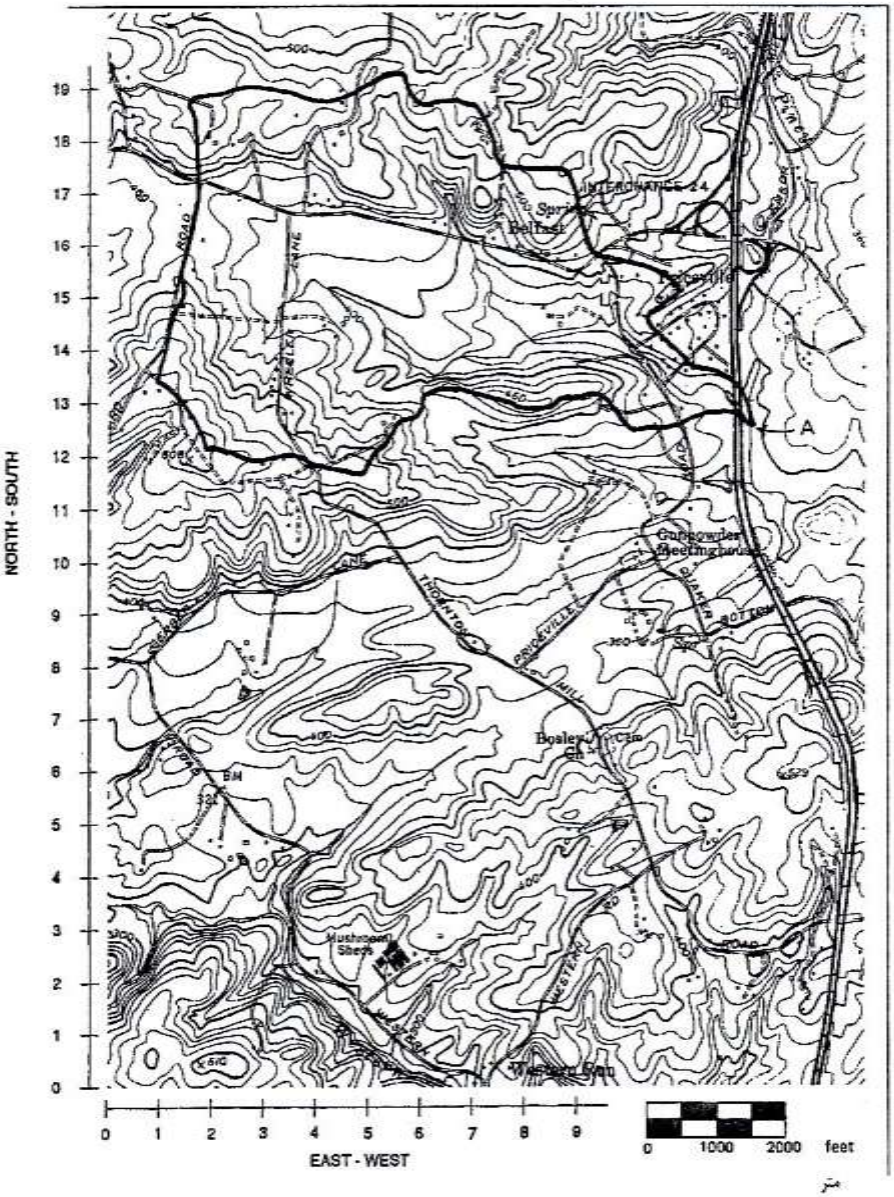


شکل ۱۲-۲ تصویر توصیفی از حوضه آبریز و زیرحوضه‌های مربوطه

هر زمان که بخواهیم حوضه‌های آبریز آزاد را از نظر مساحت مشخص کنیم لازم است نقطهٔ تمرکز و کلمهٔ بالادست یا فراز آب را نیز ذکر کنیم. مثلاً گفته شود «وسعت حوضهٔ رودخانهٔ کارده در بالادست روستای کارده ۵۰۰ کیلومتر مربع است». این بدان معنی است که رودخانه کارده و حوضه آن خود یک حوضه بزرگی است که ما فقط بخشی از آن راکه در بالا دست روستای کارده (واقع در حاشیه این رودخانه) است در نظر داریم. در غیر اینصورت ذکر مساحت حوضه بدون توجه به نقطه تمرکز فقط برای حوضه‌های بسته صادق خواهد بود.

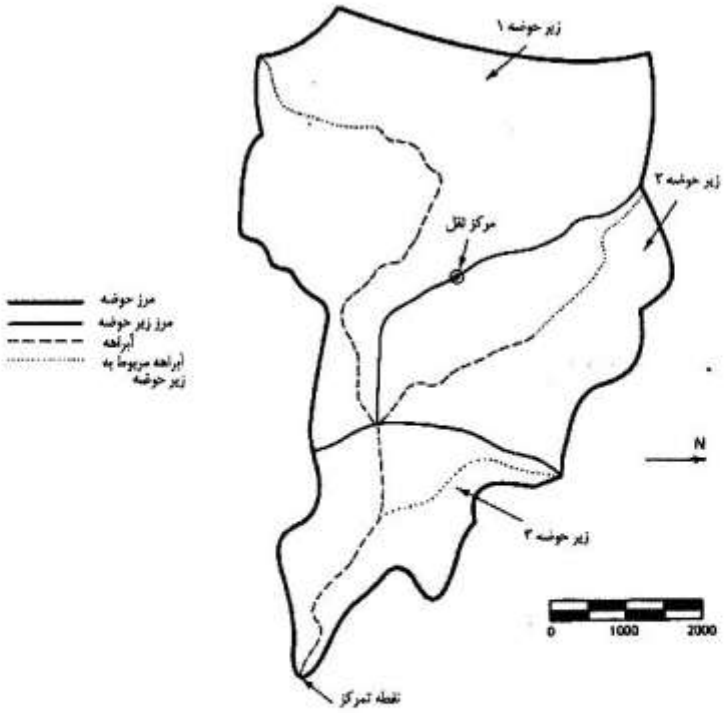
خط فرضی که حوضه‌های مختلف را از یکدیگر مجزا می‌سازد به خط تقسیم آب معروف است. شکل خط تقسیم آب فقط به توپوگرافی حوضه بستگی دارد و از بهم پیوستن خط‌الرأسهای ارتفاعات به دست می‌آید. در نقشه‌های توپوگرافی معمولاً قلل ارتفاعات به صورت دوایر یا منحنی‌های مسدود کوچکی مشاهده می‌شود که اگر بهم متصل شوند حوضهٔ رودخانه‌ای که در آن قرار گرفته است مشخص می‌گردد. بارندگیهایی که خارج از مرز حوضه می‌بارند رواناب آنها به‌نقطهٔ تمرکز حوضه نخواهد رسید زیرا آنها به حوضهٔ دیگری متعلق می‌باشند. در شکل ۱۲-۳ طریقه مشخص کردن محدوده یک حوضه آبریز روی نقشه‌های

توپوگرافی نشان داده شده است. محدوده این حوضه در قسمت بالای شکل بوسیله اتصال خط الرأسها با خط مشکی درشت مشخص شده است. نقطه A در این شکل محل تمرکز رواناب و خروج جریان سطحی از حوضه می‌باشد. در شکل ۱۲-۴ همین حوضه بطور مجزا رسم شده و رودخانه‌های اصلی و فرعی و زیر حوضه‌های آن نیز مشخص شده‌اند.

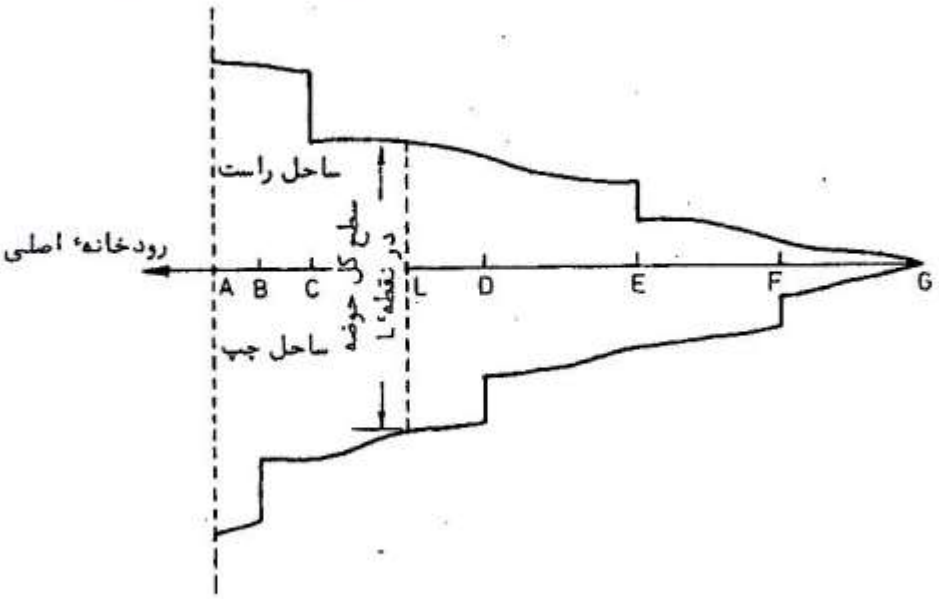


شکل ۱۲-۳ وصل کردن خط‌الراس‌ها بیکدیگر برای مشخص کردن مرز حوضه آبریز

رودخانه‌ای که تمامی رواناب زیر حوضه‌ها به آن می‌ریزد به نام *زه‌کش اصلی* یا *رودخانهٔ اصلی* نامیده می‌شود. ابتدای رودخانهٔ اصلی معمولاً مرتفع‌ترین قسمت حوضه است و هرچه به طرف نقطهٔ تمرکز جلو برویم آبراهه‌های دیگری که زه آب زیر حوضه‌ها را تخلیله می‌کند بدان می‌پیوندد و بر وسعت حوضه افزوده می‌شود. روند افزایش سطح حوضه را می‌توان به‌صورت نموداری مشابه شکل ۱۲-۵ نشان داد. از روی این نمودار می‌توان مشخص کرد که شاخه‌های رودخانه درکدام محل به رودخانهٔ اصلی می‌ریزند و یا وسعت هر یک از زیرحوضه چه مقدار است. نمودار ۱۲-۵ مربوط به حوضه‌ای است که در شکل ۱۲-۲ نشان داده شده و مشخص می‌کند که اولاً چه مقدار مساحت مربوط به آبراهه‌های ساحل راست رودخانه اصلی و چه مقدار مربوط به ساحل چپ بوده و این زیرحوضه‌ها درکدام نقاط و با چه فواصلی از نقطه تمرکز به رودخانه اصلی می‌پیوندند. بطوریکه مشاهده می‌شود غالباً طرفین رودخانه‌ها از نظر مساحت و محل اتصال سرشاخه‌ها متقارن نمی‌باشند. قسمتهای اولیهٔ رودخانهٔ اصلی را *فراز آب* (upstream) و قسمتهای انتهایی آن را *پایاب* (downstream) می‌نامند. اگر در جهت حرکت آب طوری بایستیم که صورت ما به طرف پایاب باشد دست راست را *ساحل راست* یا *جناح راست* رودخانه و سمت چپ را *ساحل چپ* یا *جناح چپ* رودخانه گویند.



شکل ۱۲-۴ مشخص کردن شاخه‌های رودخانه اصلی در حوضه آبریز.



شکل ۱۲-۵ نمودار وسعت حوضه و روند افزایش سطح حوضه در اثر ملحق شدن زیرحوضه‌ها از ابتدای حوضه تا انتهای آن برای حوضه شکل ۱۲-۲.

۱۲-۲ شبکهٔ رودخانه

شبکه رودخانه به مجموعه آبراهه‌هایی گفته می‌شود که در سطح حوضه عمل تخلیهٔ جریان‌های سطحی را انجام می‌دهند. برخی از این آبراهه‌ها به صورت رودخانه‌های دائم، برخی به صورت فصلی و بعضی دیگر مسیلهایی هستند که فقط در هنگام بارندگی ممکن است آب در آنها جاری باشد. در رودخانه‌های دائم بیش از ۹۰ درصد اوقات سال آب جاری است. آب موجود در رودخانه‌های دائم ممکن است از رواناب سطحی یا ذوب شدن برفهای ارتفاعات و یا از منابع آب زیرزمینی تأمین گردد. از طرف دیگر رودخانه‌های فصلی بیش از ۵۰ درصد ایام سال خشک می‌باشند. در یک حوضه ممکن است هر سه نوع رودخانهٔ مذکور وجود داشته باشد ولی در حوضه‌های مناطق خشک قسمت اعظم آبراهه‌ها را **خشک رودها** یا **مسیلها** (ravin) تشکیل می‌دهد. هرچه شبکهٔ رودخانه‌های یک حوضه تکامل‌یافته‌تر باشد یعنی تعداد آنها زیاد بوده و تمام سطح حوضه را در بر گرفته باشند تخلیهٔ رواناب از آن حوضه بهتر و ساده‌تر انجام می‌شود.

اگر تمام رودخانه‌های موجود در یک حوضه آبریز را اعم از بزرگ، کوچک، دائم و غیردائم روی یک نقشه رسم کنیم وضعیتی مشابه یک درخت با تنه و شاخه‌های بزرگ و کوچک بوجود می‌آید که همان **شبکه آبراهه‌های حوضه** است. یکی از این آبراهه‌ها که معمولاً طولانی‌ترین آنها

نیز می‌باشد *آبراهه اصلی* و بقیه آبراهه‌های فرعی هستند. شبکه آبراهه‌های حوضه نشان‌دهنده چگونگی تخلیه رواناب از حوضه بوده و لذا شناخت آن از اقدامات اساسی در عملیات هیدرولوژی است. سنجش درجه تکامل حوضه و شبکه رودخانه‌های آن با نمایه‌های *تراکم* (density) ، *رده* (order) و *انشعاب* (bifurcation) صورت می‌گیرد.

اگر مجموع طول تمام رودخانه‌ها و آبراهه‌های حوضه اندازه‌گیری و بر مساحت حوضه تقسیم شود عدد به دست آمده که معمولاً برحسب کیلومتر در هر کیلومتر مربع (km/km^2) توصیف می‌شود ، ***تراکم شبکهٔ رودخانه‌های حوضه*** (یا تراکم شبکه زهکشی (drainage density) نامیده می‌شود.

$$\mu = \frac{\Sigma Li}{A} \qquad (۱-۱۲)$$

که در آن:

Li = طول هریک از آبراهه‌های حوضه، اعم از آبراهه دائم یا خشک رودها، برحسب km

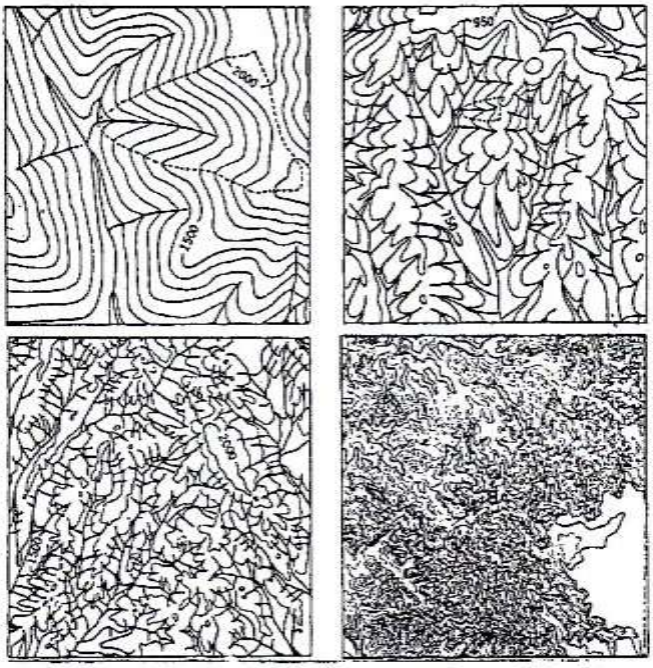
A = مساحت حوضه برحسب km^2

μ = تراکم شبکه رودخانه‌های حوضه برحسب km/km^2

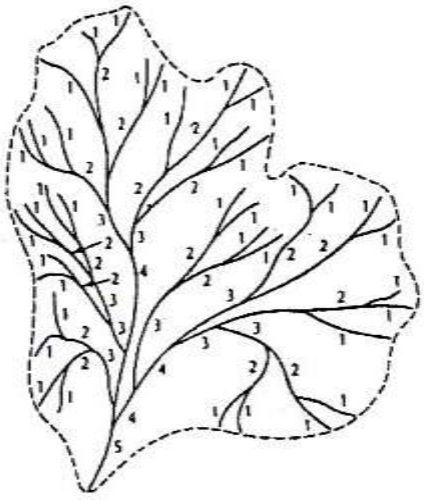
در شکل ۱۲-۶ چهار منطقه از حوضه‌های مختلف که مساحت هر منطقه یک کیلومتر مربع ولی تراکم شبکه رودخانه در آنها متفاوت است از نظر مقایسه نشان داده شده است. تراکم شبکه رودخانه معیاری است که فقط طول رودخانه‌ها را مشخص می‌سازد و از طرز شبکه‌بندی و اتصال شاخه‌های مختلف اطلاعی به دست نمی‌دهد. برای اطلاع از نحوهٔ ارتباط انشعابات مختلف از رده‌بندی رودخانه‌ها استفاده می‌شود.

سر شاخه هر آبراهه را که از ارتفاعات شروع می‌شود ***رودخانه رده یک*** گویند. رودخانه رده یک ، رودخانه‌ای است که هیچ شاخه دیگر به آن نمی‌پیوندد. از اتصال حداقل دو رودخانه رده یک رودخانه رده ۲ بوجود می‌آید. رودخانه رده ۲ زمانی به رودخانه رده ۳ تبدیل می‌شود که حداقل یک رودخانه رده ۲ دیگر به آن بپیوندد. در غیر این صورت هر تعداد رودخانه رده یک به آن ملحق شود باز هم شماره رده آن ۲ باقی خواهد ماند. از اتصال دو یا چند رودخانهٔ ردهٔ ۳ رودخانه ردهٔ ۴ و الخ تشکیل می‌شود. شمارهٔ ردهٔ رودخانه در نقطهٔ تمرکز نشان دهندهٔ درجه تکامل شبکه آبراهه‌ها در حوضهٔ بالادست آن نقطه است. مثلاً در شکل ۱۲-۷ رده‌بندی یک سیستم رودخانه نشان داده شده است که شماره رده آن در نقطه تمرکز ۵ می‌باشد. مسلم است که مثلاً یک رودخانه رده ۶ تکامل یافته‌تر از یک رودخانه رده ۵ یا ۴ است. نحوه اتصال انشعابات در شبکه رودخانه‌ها بسیار متفاوت است. هر چند در یک تقسیم‌بندی ساده و کلی نحوه انشعابات رودخانه به شکل شاخه‌های درختی، موازی، داربستی و راست گوشه‌ای تقسیم می‌شود(شکل ۱۲-۸ الف). شکل پیوستن رودخانه‌ها به یکدیگر بستگی به ساختار زمین‌شناسی و عمر سیستم رودخانه‌ای دارد. در طبیعت الگوهای شبکه زهکشی حوضه‌ها بسیار

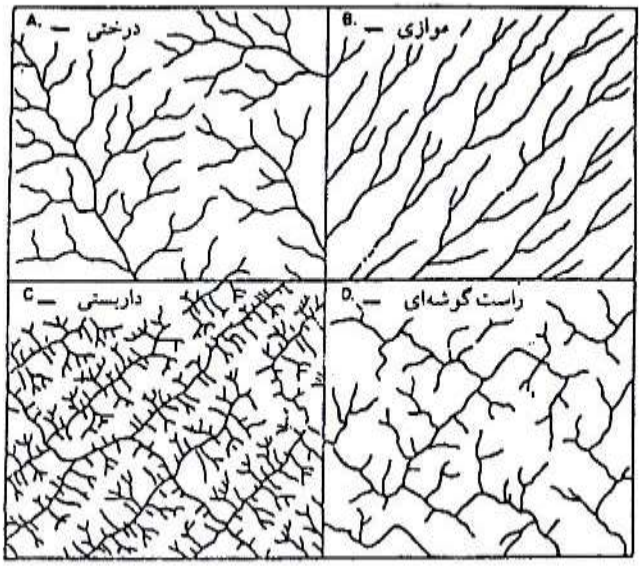
گوناگون است. انجمن فتوگرامتری و سنجش از دور آمریکا با عکس برداری هوائی از حوضه‌ها ۳۰ الگوی مختلف را با اسامی گوناگون مشخص کرده است که در شکل ۱۲-۸ ب نشان داده شده است.



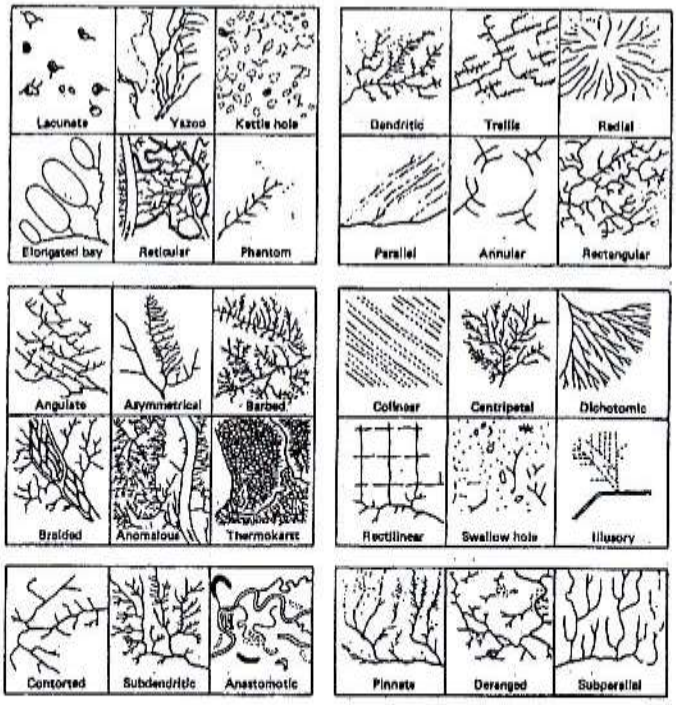
شکل ۱۲-۶ تراکم شبکه رودخانه در حوضه‌های مختلف. بالا سمت چپ ـ تراکم کم ، بالا سمت راست ـ تراکم متوسط ، پایین سمت چپ ـ تراکم زیاد و پایین سمت راست ـ تراکم بسیار زیاد



شکل ۱۲-۷ رده‌بندی شبکه رودخانه‌های حوضه.



شکل ۱۲-۸ الف الگوهای ساده انشعابات شبکه رودخانه در حوضه‌های آبریز.



شکل ۱۲-۸ ب الگوهای شبکه زهکشی طبیعی حوضه‌های آبریز که با عکس‌برداری هوائی مشخص شده است.

برای مشخص کردن تأثیر انشعابات شبکهٔ رودخانه بر هیدروگراف سیل، از نمایه نسبت *انشعاب* (bifurcation ratio) استفاده می‌شود.

اگر در حوضه‌ای n_1 ، n_2 ، n_3 ، ... و n_i به ترتیب تعداد رودخانه‌های ردهٔ ۱ ، ۲ ، ۳ ،...و i باشد برحسب تعریف نسبت انشعاب رودخانه های این حوضه برابر است با:

$$BR = \left(\frac{n_1}{n_2} + \frac{n_2}{n_3} + \frac{n_3}{n_4} + \ldots + \frac{n_{i-1}}{n_i}\right)\frac{1}{i-1} \qquad (۲-۱۲)$$

که در آن:

BR = نسبت انشعاب رودخانه‌هادر حوضه و i = شماره رده رودخانه اصلی حوضه می‌باشد.

● **مثال ۱۲-۱**

در یک حوضه آبریز به مساحت ۲۲ کیلومترمربع تعداد انشعابات رده‌های مختلف به شرح زیر اندازه‌گیری شده است. نسبت انشعاب و تراکم شبکه رودخانه‌ها را بدست آورید.

شمارهٔ ردهٔ انشعابات	۱	۲	۳	۴	۵
تعداد انشعابات	۱۵۰	۴۶	۱۲	۵	۱
طول آبراهه (km)	۲۷	۱۷	۸	۴	۲

حل

الف ـ نسبت انشعاب

$$BR = \frac{1}{5-1}\left(\frac{150}{46} + \frac{46}{12} + \frac{12}{5} + \frac{5}{1}\right)$$

$$BR = 3.6$$

ب ـ تراکم شبکه رودخانه‌ها

$$\mu = \frac{\Sigma L_i}{A}$$

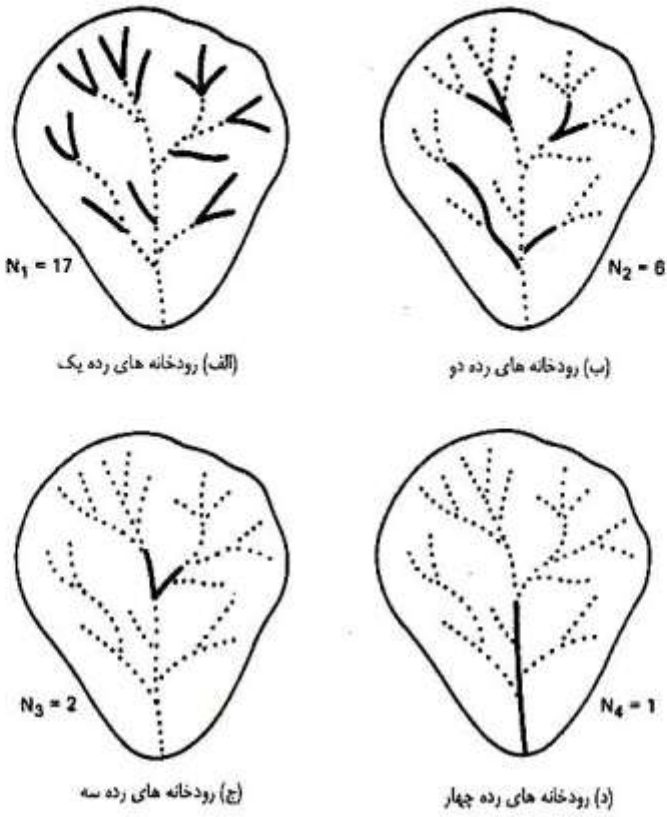
$$\mu = \frac{27 + 17 + 8 + 4 + 2}{22} = \frac{58}{22} = 2.63 \text{ km/km}^2$$

$$\mu = 2.63 \text{ km/km}^2$$

تراکم رودخانه‌ای را می‌توان برای هر رده نیز تعریف کرد بطوریکه اگر N_s تعداد آبراهه‌های یک رده مشخص و A مساحت حوضه باشد تراکم رودخانه‌ای آن داده (D_s) برابر $D_s=\frac{N_s}{A}$ خواهد بود.

● **مثال ۱۲-۲**

در شکل زیر (۱۲-۹) نسبت انشعاب را محاسبه کنید.



(الف) رودخانه های رده یک

(ب) رودخانه های رده دو

(ج) رودخانه های رده سه

(د) رودخانه های رده چهار

شکل ۱۲-۹

حل

$$BR = \left(\frac{n_1}{n_2} + \frac{n_2}{n_3} + \frac{n_3}{n_4}\right)\left(\frac{1}{4-1}\right)$$

$$BR = \left(\frac{17}{6} + \frac{6}{2} + \frac{2}{1}\right)\frac{1}{3} = 2.61$$

روش دیگر برای محاسبهٔ BR ، استفاده از فرمول زیر است:

$$BR = \text{Antilog}\left[\frac{\log n_1 - \log n_i}{n - 1}\right] \qquad (۱۲-۳)$$

که n_1 تعداد رودخانه‌های رده یک و n_i تعداد آخرین رده و n شماره‌رده رودخانه اصلی است.

● **مثال ۱۲-۳**

باتوجه به ارقام مثال ۱۲-۱ نسبت انشعاب را با استفاده از معادله ۱۲-۳ محاسبه کنید.

حل

$$BR = \text{Antilog}\left(\frac{\log(150) - \log(1)}{5 - 1}\right)$$

$$BR = 3.5$$

مشاهده می‌شود که مقدار عدد محاسبه شده با این فرمول با آنچه از فرمول ۱۲-۲ بدست می‌آید نسبتاً مطابقت دارد.

در واقع نسبت انشعاب رودخانه از یک رده به رده دیگر عبارت است از نسبت تعداد رودخانه‌های یک رده مشخص به تعداد رودخانه‌های رده بالاتر ($BR = \frac{N_u}{N_{u+1}}$) و اگر بخواهیم نسبت انشعاب را در یک حوضه آبریز بدست آوریم باید از نسبت انشعاب رده‌های مختلف آن حوضه میانگین بگیریم. آنچه در فرمول ۱۲-۲ آمده است این میانگین را نشان می‌دهد زیرا اگر در حوضه‌ای i رده رودخانه وجود داشته باشد به اندازه i-1 نسبت انشعاب وجود خواهد داشت.

نسبت انشعاب در حوضه‌های معمولی بین ۳ تا ۵ است. هرچه این نسبت کوچکتر باشد نشان‌دهنده این است که منحنی تغییرات دبی سیل نسبت به زمان (هیدروگراف) در مقایسه با حوضه‌های دیگر دارای نقطهٔ اوج تیزتر خواهد بود. در شکل ۱۲-۱۰ سه حوضه A، B و C که در آنها نسبت انشعاب (BR) به ترتیب ۱۷، ۴ و ۲/۲۵ می‌باشد نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود منحنی تغییرات جریان خروجی از حوضه در اثر یک بارندگی مشابه در حوضه A پهنتر از هیدروگراف حوضه C است.

محققین دریافته‌اند که بین رده آبراهه و خصوصیات فیزیکی آبراهه (مانند طول و شیب آن) روابط مستحکمی برقرار است بطوری که حالت قاعده بخود گرفته است. مانند قاعده هورتون در مورد تعداد آبراهه‌ها که بیان می‌دارد تعداد آبراهه‌های هر رده از معادله زیر تبعیت می‌کند.

$$N_u = (BR)^{k-u} \qquad (۵-۱۲)$$

که در آن :

BR = نسبت انشعاب آبراهه‌های حوضه

k = بالاترین رده آبراهه‌های حوضه

u = شماره رده مورد نظر

N_u = تعداد آبراهه‌های رده مورد نظر

مثلاً در مورد مثال ۱۲-۱ که نسبت انشعاب ۳/۶ محاسبه شد تعداد آبراهه‌های رده ۲ عبارت خواهد بود از:

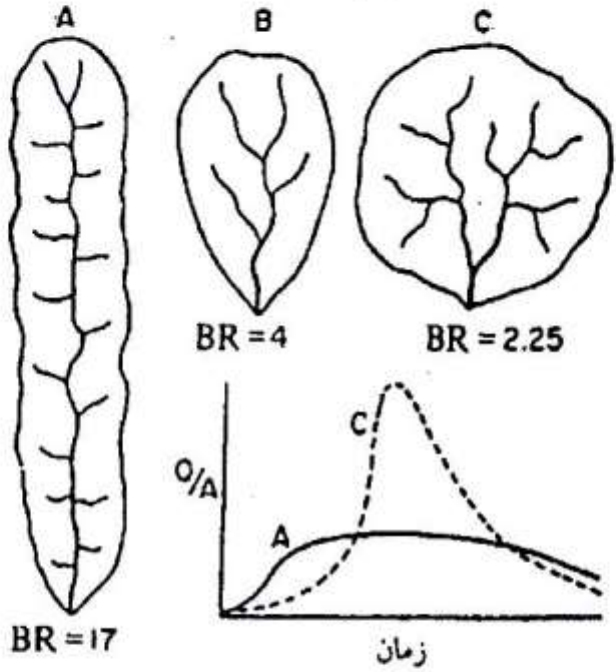
$k = 5$

$u = 2$

$BR = 3.6$

$N_u = (3.6)^{5-2} = 46$

معادلهٔ ۱۲-۵ را *قانون تعداد آبراهه‌ها* (law of stream number) نیز می‌گویند. علاوه بر قانون تعداد آبراهه‌ها قوانین دیگری که در مورد آبراهه‌ها به اثبات رسیده و به نام قوانین هورتون معروف می‌باشند عبارتند از: قانون طول، قانون مساحت و قانون شیب.



شکل ۱۲-۱۰ تأثیر نسبت انشعابات حوضه بر هیدروگراف سیل.

قانون طول آبراهه‌ها (law of stream lengths) بر اساس این قانون متوسط طول آبراهه‌های رده i در یک حوضه (L_i) برابر است با:

$$L_i = \bar{L}_1 (n)^{i-1} \qquad (۶-۱۲)$$

که در آن:

i = شماره رده آبراهه مورد نظر

L_i = متوسط طول آبراهه‌های رده i

$\bar{L}_1$ = متوسط طول آبراهه‌های رده یک

n = نسبت طولی آبراهه‌ها در حوضه. نسبت طولی آبراهه‌ها عبارت است از متوسط نسبت‌های طول آبراهه‌های هر رده به طول آبراهه‌های رده پایین‌تر (به مثال ۱۲-۴ مراجعه شود)

قانون مساحت آبراهه‌ها (law of stream areas) قانون مساحت آبراهه‌ها مشابه قانون طول آبراهه‌هاست:

$$A_i = \bar{A}_1 (r_a)^{i-1} \qquad (۱۲-۷)$$

در این معادله :

i = شماره رده آبراهه مورد نظر

A_i = متوسط مساحت مربوط به آبراهه‌های رده i

$\bar{A}_1$ = متوسط مساحت مربوط به آبراهه‌های رده یک

r_a = نسبت مساحت آبراهه‌ها در حوضه. نسبت مساحت آبراهه‌ها عبارت است از متوسط نسبت‌های مساحت مربوط به آبراهه‌های هر رده به متوسط مساحت آبراهه‌های رده پایین‌تر (به مثال ۱۲-۴ مراجعه شود).

قانون شیب آبراهه (law of stream spopes) بطورمشابه‌قانون‌شیب‌آبراهه‌هابصورت‌زیر است:

$$S_i = \bar{S}_1 (r_s)^{i-1} \qquad (۱۲-۸)$$

که در آن :

i = شماره رده مورد نظر

S_i = متوسط شیب در آبراهه‌های رده i

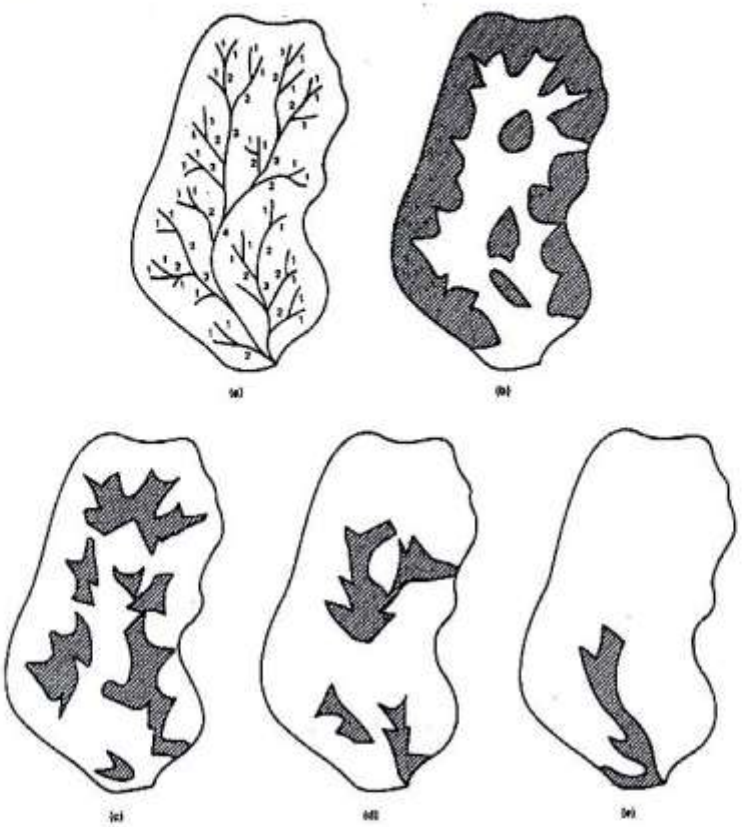
$\bar{S}_1$ = متوسط شیب در آبراهه‌های رده یک

r_s = نسبت شیب آبراهه‌ها در حوضه. این نسبت برابر است با متوسط نسبت‌های شیب آبراهه‌های هر رده به شیب آبراهه‌های رده پایین‌تر

قوانین چهارگانه تعداد، طول، مساحت و شیب آبراهه‌ها بنام *قوانین هورتون* (Horton's law) معروف می‌باشند.

● مثال ۱۲-۴

شکل زیر مربوط به یک حوضه آبریز می‌باشد که در آن رده بندی رودخانه انجام و شماره رده هر رودخانه روی آن نوشته شده است (قسمت a). در قسمتb مساحت متعلق به آبراهه‌های رده یک با هاشور مشخص گردیده‌اند. در شکل‌های c، d و e نیز مساحت مربوط به آبراهه‌های رده‌های ۲ و ۳ و ۴ مشخص شده‌اند. قانون تعداد آبراهه‌ها، طول آبراهه‌ها و مساحت آبراهه‌ها را برای این حوضه بدست آورید.



حل

الف- قانون کلی تعداد آبراهه (معادله ۱۲-۴) بصورت زیر است:

$$N_u = (BR)^{k-u}$$

BR نسبت انشعاب می‌باشد که بصورت زیر تعیین می‌گردد:

38 = تعداد آبراهه‌های رده یک

16 = تعداد آبراهه‌های رده دو

4 = تعداد آبراهه‌های رده سه

1 = تعداد آبراهه‌های رده چهار

$$BR = \frac{1}{4-1}\left(\frac{38}{16} + \frac{16}{4} + \frac{4}{1}\right) = 3.46$$

$k = 4$

k = شماره بالاترین رده یا ۴ می‌باشد.

u = شماره رده مورد نظر است. بنابراین عملاً فرمول تعداد آبراهه‌ها برای حوضه به

صورت زیر می‌باشد:

$N_u = (3.41)^{4-u}$

ب - قانون طول آبراهه‌ها با توجه به فرمول زیر بدست می‌آید:

$L_i = \bar{L}_1 n^{i-1}$

با اندازه‌گیری طول آبراهه‌ها خواهیم داشت:

متوسط طول آبراهه‌های رده یک = 1.86 Km

متوسط طول آبراهه‌های رده دو = 2.79 Km

متوسط طول آبراهه‌های رده سه = 6.42 Km

متوسط طول آبراهه‌های رده چهار = 12.0 Km

$n = (\frac{12}{6.42} + \frac{6.42}{2.79} + \frac{2.79}{1.86}) \frac{1}{3} = 1.88$

$L_1 = 1.86$

$L_i = \bar{L}_1 (n)^{i-1}$

$\bar{L}_i = 1.86(1.88)^{i-1}$

ج - قانون مساحت آبراهه ها

$A_i = \bar{A}_1 (r_a)^{i-1}$

با اندازه‌گیری و پلانی متری مساحت‌های مربوط به هر رده و تقسیم آن بر تعداد آبراهه‌های همان رده متوسط مساحت برای هر رده عبارت است از:

متوسط مساحت مربوط به آبراهه‌های رده یک = 4.1 Km^2

متوسط مساحت مربوط به آبراهه‌های رده دو = 4.4 Km^2

متوسط مساحت مربوط به آبراهه‌های رده سه = 9.1 Km^2

متوسط مساحت مربوط به آبراهه‌های رده چهار = 18.1 Km^2

$r_a = (\frac{18.1}{9.1} + \frac{9.1}{4.4} + \frac{4.4}{4.1}) \frac{1}{3}$

$r_a = 1.7$

$\bar{A}_i = \bar{A}_1 (1.7)^{i-1}$

$\bar{A}_i = 4.1 (1.7)^{i-1}$

از کاربردهای قوانین فوق آنست که اگر برای یک حوضه آبریز هیچ گونه اطلاعی از سیستم رودخانه‌ای نداشته باشیم می‌توانیم فرمول‌های مذکور را برای یک حوضه مشابه در منطقه بدست آورده و سپس با تعمیم آن به حوضه مورد نظر تعداد و طول و مساحت هر آبراهه را در حوضه بدست آورد.

رودخانه‌ها به سه گروه جوان، کامل و مسن طبقه‌بندی می‌شوند. **رودخانه‌های جوان** دارای

شیب تند و مقطع آنها به شکل V است. فرسایش در این رودخانه‌ها نسبتاً زیاد است. در **رودخانه‌های کامل** بیشترین انرژی صرف انتقال مواد رسوبی می‌شود و میزان فرسایش در آنها کمتر از رودخانه‌های جوان است. مقطع این رودخانه‌ها به شکل U است. **رودخانه‌های مسن** شیب بسیار کم دارند و مقطع آنها حالت ذوزنقه‌ای به خود می‌گیرد. رسوب‌گذاری از خصوصیات اصلی این رودخانه‌هاست. معمولاً در مسیر یک آبراهه هر سه نوع رودخانه مشاهده می‌شود. بطوری که قسمت علیای رودخانه ممکن است جوان، قسمت میانی آن کامل و قسمت انتهایی آن را رودخانهٔ مسن تشکیل دهد.

۱۲-۳ خصوصیات فیزیکی حوضه‌ها

خصوصیات فیزیکی حوضه‌های آبریز را می‌توان به دو گروه کلی تقسیم‌بندی کرد که عبارتند از : خصوصیات مربوط به پستی و بلندی و خصوصیات مربوط به نفوذپذیری. این دو ویژگی از عوامل مؤثر بر ایجاد رواناب و سیل می‌باشند. نمایه‌های پستی و بلندی حوضه شامل سطح حوضه ، شیب ، الگوی رودخانه‌ای و نمایه نفوذپذیری شامل توان جذب آب به داخل خاک و ذخیره رطوبت در آن می‌باشد. اما اگر بخواهیم عوامل مؤثر در پاسخ هیدرولوژیک حوضه‌های آبریز را بر شماریم بسیار زیاد خواهند بود و حداقل ۸ گروه مستقل زیر را می‌توانیم از یکدیگر متمایز سازیم.

(۱) ـ **خصوصیات هندسی حوضه**: از قبیل سطح، محیط، شکل، موقعیت، طول آبراهه‌ها، شیب متوسط آبراهه اصلی و تراکم شبکه رودخانه‌ها .

(۲)ـ **خصوصیات خاکهای حوضه**: شامل تیپ هیدرولوژیک خاکها، دانه‌بندی ذرات خاک، بافت، ساختمان، قابلیت فرسایش و نفوذپذیری .

(۳) ـ **پوشش گیاهی**: تیپ گیاهان حوضه، توزیع پوشش گیاهی از نظر برگاب و تعرق.

(۴) ـ **خصوصیات آب‌شناسی**: نگهداشت سطحی و آبهای زیرزمینی.

(۵) ـ **خصوصیات زمین‌شناسی**: نوع سنگها، درز و شکافها، گسلها و چین‌خوردگیها .

(۶) ـ **آب و هوا**: دما، مقدار و نوع بارندگیها و فراوانی وقوع آنها.

(۷) ـ **بار رسوب**: فرسایش، انتقال و رسوبگذاری، تخریب و مناطق رسوب‌خیز حوضه.

(۸) ـ **عوامل انسانی**: عملیات کشاورزی، دامداری، احداث جاده‌ها، تأسیسات و غیره.

هرچند عوامل ۲ تا ۸ در مورد یک حوضه اثرات بسیار بارزی بر حجم رواناب و خصوصیات سیلابها دارد که در جای خود از آنها بحث شده است ولی ویژگیهای هندسی حوضه‌ها نیز در آبدهی حوضه‌ها مؤثر است که در این‌جا به اختصار بحث شده است.

خصوصیات هندسی یا ژئومتری حوضه به مجموعه عوامل فیزیکی گفته می‌شود که

مقادیر آنها برای هر حوضه نسبةً ثابت بوده و نشان دهندهٔ وضع ظاهری حوضه است. این عوامل از این جهت حائز اهمیتند که بین آنها و رواناب حوضه همبستگی وجود دارد و در مورد حوضه‌هایی که در آنها داده‌های اندازه‌گیری دبی وجود ندارد می‌توان از این روابط استفاده نمود و مقدار رواناب یا شدت سیلابها راتخمین زد. خصوصیات مهم ژئومتری حوضه که به آنها **خصوصیات کوه ـ آبنگاری** (oro-hydrography) هم گفته می‌شود عبارتند از: مساحت، محیط، طول آبراهه اصلی، شکل حوضه، عرض متوسط حوضه، شیب حوضه، ارتفاع حوضه، پستی و بلندی (نمودارهای آلتی‌متری و هیپسومتری حوضه) عرض مستطیل معادل و زمان تمرکز. این خصوصیات را ***عوامل مورفومتری*** (morphometry) حوضه نیز می‌نامند.

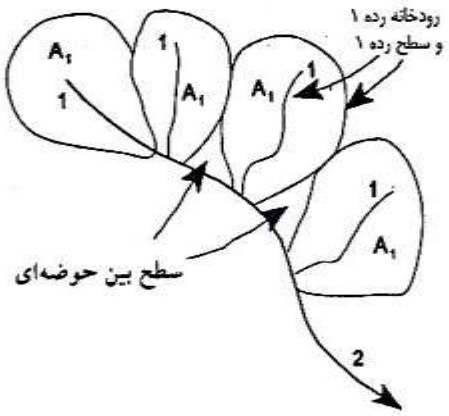
۱۲-۳-۱ مساحت حوضه

بارزترین مشخصهٔ حوضه مساحت آن‌است. دبی‌سیلابها و حجم‌رواناب حوضه بطور مستقیم به مساحت حوضه بستگی دارد. مساحت حوضه معمولاً با علامت A نشان داده می‌شود و برحسب کیلومتر مربع (km^2) یا میل مربع ($mile^2$) توصیف می‌شود.

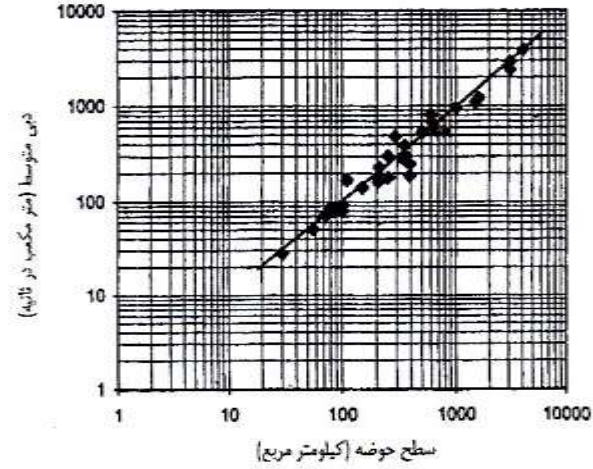
ساده‌ترین وسیله برای سنجش مساحت در نقشه‌های هیدرولوژی استفاده از دستگاه **مساحت سنج** (planimeter) است. حوضه‌ها از نظر مساحت به سه دسته تقسیم می‌شوند: حوضه‌های کوچک با مساحتی کمتر از ۱۰۰ کیلومتر مربع، حوضه‌های متوسط که مساحت آنها بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتر مربع است و حوضه‌های بزرگ که مساحت آنها بالغ بر ۱۰۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد. هرچند مساحت کل حوضه بر مقدار و شدت رواناب مؤثر است اما تفکیک بخشهای **نفوذپذیر** (pervious) و **نفوذناپذیر**(impervious) حوضه و تعیین مقدار یا درصد مربوط به مساحت هر کدام از آنها بهتر می‌تواند چهره حوضه را از نظر سیل‌خیزی روشن کند.

همانطور که در مورد آبراهه‌ها سلسله مراتب رده برقرار بود در حوضه‌های آبریز نیز سلسله مراتب مساحت نیز وجود دارد. هر آبراهه رده یک دارای مساحت رده یک است و مساحت رده A_u به مساحتی گفته می‌شود که رواناب آبراهه رده u را تامین می‌کند. مثلاً در شکل ۱۲-۱۱ مساحت تمام زیر حوضه‌های A_1 به اضافه مساحت‌های بین حوضه‌ای آنها جمعاً مساحت رده ۲ را تشکیل می‌دهد.

مساحت حوضه غالباً برای تخمین حجم رواناب یا حداکثر دبی لحظه‌ای سیلابها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بسیاری از مناطق بین مساحت حوضه و حجم رواناب سالانه حوضه رابطه مستقیمی مانند آنچه در شکل ۱۲-۱۲ نشان داده شده است وجود دارد. این رابطه حالت کلی داشته و معادله آن بصورت $\bar{Q} = K.A^n$ می‌باشد که در آن $\bar{Q}$ رواناب سالانه، A مساحت حوضه و K و n ضرایب ثابت می‌باشند که از روی تحلیل‌های منطقه‌ای بدست می‌آیند.



شکل ۱۲-۱۱ مساحت‌های بین زیرحوضه‌های رده یک (A1)، رواناب زیر حوضه‌های رده ۱ و رواناب مساحت‌های بین زیر حوضه‌ها مستقیماً به رودخانه رده ۲ می‌ریزد.



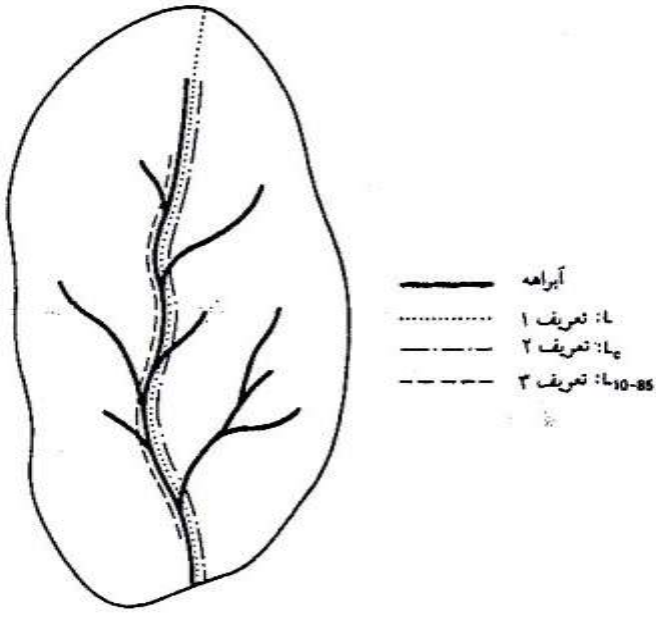
شکل ۱۲-۱۲ تیپ رابطه بین مساحت حوضه و حجم رواناب سالانه

۱۲-۳-۲ محیط حوضه

محیط حوضه (P) به طول خط تقسیم آب گفته می‌شود که حوضه را از حوضه‌های مجاور مجزا می‌سازد. محیط حوضه بر حسب کیلومتر یا میل سنجیده می‌شود. برای اندازه‌گیری محیط حوضه معمولا از **منحنی‌سنج** (curvemeter) استفاده می‌شود. حوضه‌ها یک محیط توپوگرافیک دارند که در طبیعت قابل رؤیت است و یک محدودهٔ ژئولوژیک که به خصوصیات زمین‌شناسی حوضه بستگی داشته و از سطح زمین قابل رؤیت نیست بطوری که ممکن است تغذیهٔ حوضه از مناطقی ورای محدوده سطح حوضه نیز صورت گیرد.

۱۲-۳-۳ طول حوضه

برای مشخص کردن طول حوضه نمایه‌های زیادی بکار برده می‌شود که در تحلیل رواناب و سیل از آنها استفاده می‌شود. در یک تعریف طول حوضه (L) به طول مسیر آبراهه اصلی از نقطه خروج تا دورترین قله روی خط تقسیم آب گفته می‌شود. این طول در شکل ۱۲-۱۳ تحت عنوان تعریف ۱ و با حرف L نشان داده شده است. در تعیین طول حوضه از روی نقشه‌های توپوگرافی غالباً این سؤال پیش می‌آید که کدام آبراهه را باید آبراهه اصلی بحساب آورد درچنین وضعیت آبراهه‌ای که بزرگترین طول را داشته باشد آبراهه اصلی است. در تعریف دیگر لازم نیست که رودخانه را تا قله ارتفاعات ادامه دهیم بلکه طول حوضه فقط از نقطه خروجی تا جائی است که رودخانه بطور مشخص روی نقشه وجود دارد. این طول در شکل ۱۲-۱۳ تحت عنوان تعریف ۲ و با علامت L_c نشان داده شده است. برخی فاصله‌ای از رودخانه اصلی را که بین ۱۰ تا ۸۵ درصد طول رودخانه قرار گرفته است بعنوان طول حوضه مطرح کرده‌اند که در شکل ۱۲-۱۳ تحت عنوان تعریف ۳ و با علامت L_{10-85} نشان داده شده است. یکی دیگر از نمایه‌های طول حوضه این است که از نقطه خروجی در مسیر رودخانه اصلی تا نقطه‌ای که نزدیک‌ترین فاصله را با مرکز ثقل حوضه داشته باشد اندازه گیری کنیم. این نمایه که با علامت L_{ca} نشان داده می‌شود در تحلیل هیدروگراف که بعداً شرح داده خواهد شد مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۱۲-۱۳ تعاریف مختلف طول حوضه.

اگر حوضه‌ای را که در شکل ۱۲-۴ نشان داده شده است در نظر بگیریم با توجه به مقیاس نقشه طول رودخانه اصلی که در زیرحوضه‌های ۱ و ۲ و ۳ روی نقشه رسم شده‌اند به ترتیب ۱۵۸۳، ۷۹۱ و ۱۲۰۰ متر است. اما اگر بخواهیم طول هر زیر حوضه را از نقطه خروجی تا نقطه انتهایی حوضه را بدست آوریم لازم است رودخانه‌های اصلی را در زیرحوضه‌های ۱ و ۲ ادامه دهیم تا مرز حوضه‌ها را قطع کند و سپس طول کلی آنها را بدست آوریم. (در شکل ۱۲-۴ خطوط نقطه‌چین در زیرحوضه‌های ۱ و ۲ این وضعیت‌ها را نشان می‌دهد) . در این حالت طول زیرحوضه‌های ۱ و ۲ به ترتیب ۲۳۷۴ و ۱۶۶۰ متر خواهند بود. اما در زیرحوضه ۳ برای بدست آوردن طول زیرحوضه باید نقطه‌ای را در نظر داشت که دورترین فاصله را با نقطه خروجی داشته باشد. این نقطه گوشهٔ سمت راست و مرز مشترک زیرحوضه‌های ۲ و ۳ می‌باشد که به صورت نقطه‌چین به رودخانه اصلی زیرحوضه ۳ وصل شده است. اگر فاصله این نقطه تا محل اتصال به رودخانه اصلی زیرحوضه ۳ برابر ۸۶۶ متر و فاصله محل اتصال تا نقطه خروجی ۸۵۰ متر باشد در این صورت طول زیرحوضه ۳ برابر ۱۷۱۶ متر خواهد بود (۱۷۱۶=۸۵۰+۸۶۶) که با عدد ۱۲۰۰ متر قبلی متفاوت می‌باشد. در هر حال تعیین طول حوضه و طول آبراهه اصلی عملی است که توسط هیدرولوژیست و با مهارت باید صورت گیرد.

۱۲-۳-۴ شکل حوضه

حوضه‌های آبریز از نظر ظاهری دارای شکلهای گوناگون می‌باشند. تأثیر شکل حوضه بر رواناب سطحی و هیدروگراف سیل محرز و این موضوع را عدهٔ زیادی از هیدرولوژیست‌ها مورد بررسی قرار داده‌اند. در شکل ۱۲-۱۴ تأثیر شکلهای مختلف حوضه بر وضع هیدروگراف و دبی اوج آن نشان داده شده است. در این شکل هفت حوضه که از لحاظ وسعت و سایر خصوصیات با یکدیگر مشابه و فقط از نظر شکل باهم متفاوتند مقایسه شده‌اند. بطوری‌که ملاحظه می‌شود هیدروگراف خروجی از این حوضه‌ها هم از نظر تداوم سیل و هم از نظر دبی ماکزیمم با یکدیگر متفاوتند. حال آنکه بارندگی در تمام آنها یکنواخت در نظر گرفته شده است.

حوضه‌ها از نظر شکل بسیار متنوعند ولی می‌توان سه گروه عمده را مشخص کرد: **حوضه‌های کشیده، پهن و بادبزنی** که در شکل ۱۲-۱۵ نشان داده شده‌اند. برای آن که حوضه‌ها را از نظر شکل مقایسه کنیم از ضرایب یا نمایه‌های خاصّی استفاده می‌شود. نمایه‌های مربوط به شکل ظاهری حوضه عبارتند از:

الف ـ عامل شکل حوضه بر اساس پیشنهاد مهندسین مشاور ارتش آمریکا عامل شکل حوضه (Shape factor) عبارت است از نسبت مجذور طول حوضه (L^2) به مساحت آن (A) که با علامت SF نشان داده می‌شود.

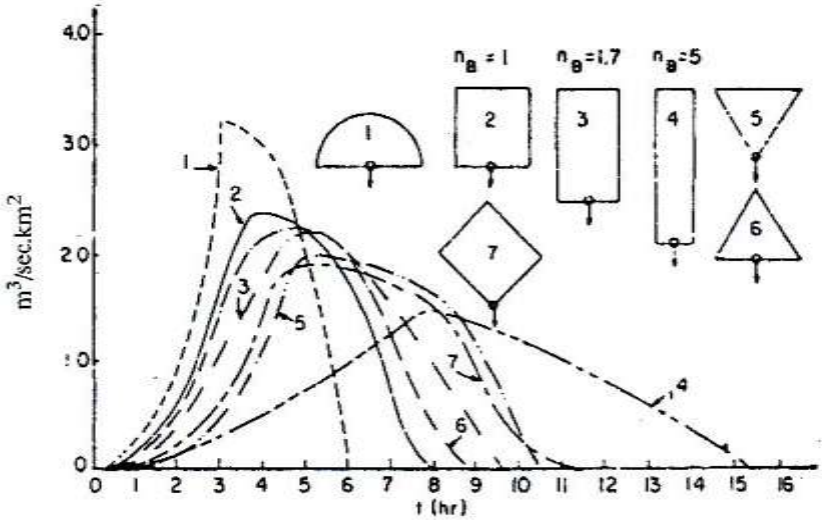
$$SF = \frac{L^2}{A} \qquad (۱۲-۸ \text{الف})$$

در این معادله L طول حوضه (فاصله نقطه خروجی تا دورترین قسمت حوضه) برحسب کیلومتر و A مساحت حوضه برحسب کیلومتر مربع است که SF بدون بعد خواهد بود.

هورتون (Horton) نیز ضریب مشابهی بنام عامل فرم حوضه (form factor) را تعریف کرده است که در واقع عکس عامل شکل حوضه بوده و علامت FF نشان داده می‌شود.

$$FF = \frac{A}{L^2} \qquad (۱۲-۸ \text{ب})$$

مثلاً چنانچه مساحت یک حوضه آبریز ۱۲۲ کیلومتر مربع و فاصله دورترین نقطه حوضه تا نقطه خروجی رودخانه از آن برابر ۱۸/۳۵ کیلومتر باشد عامل شکل این حوضه ۲/۷۶ و عامل فرم حوضه ۰/۳۶ خواهد بود. در حوضه‌هائی که به شکل مربع یا مشابه آن باشند عامل شکل و فرم حوضه برابر یک خواهد بود.



شکل ۱۲-۱۴ تأثیر شکل حوضه بر هیدروگراف سیل.

اگر حوضه را مستطیلی فرض کنیم که طول آن L و عرض متوسط آن B باشد A = B.L بوده و لذا عامل فرم حوضه عبارت است از:

$$FF = \frac{B.L}{L^2} = \frac{B}{L} \qquad (۱۲-۹)$$

بنابراین عامل فرم حوضه نسبت عرض متوسط حوضه به طول آن می‌باشد. نسبت طول به عرض که عکس عامل شکل می‌باشد گاهی اوقات بعنوان نمایه شکل نیز بکار برده می‌شود. در این صورت خواهیم داشت:

$$n_B = \frac{L}{B} \qquad (۱۲-۱۰)$$

که n_B نمایه طول به عرض حوضه می‌باشد. در شکل ۱۲-۱۴ مشاهده می‌شود که نمایه طول

به‌عرض از ۱ برای حوضه‌های مربع شکل تا چندین برابر آن در حوضه‌های کشیده متغیر است.

نمایه شکل (n_B) حداکثر یک (برای حوضه‌های مربع شکل) بوده و هرچه مقدار آن کوچکتر باشد نشان‌دهنده کشیدگی شکل حوضه است. مثلاً در شکل ۱۲-۱۴ نمایه n_B در حوضه‌های ۲، ۳ و ۴ (مربع، مستطیل، و مستطیل کشیده) به ترتیب ۱، ۱/۷ و ۵ است که تأثیر آنها بر شکل هیدروگراف سیل نیز نشان داده شده است.

ب ـ ضریب فشردگی ضریب فشردگی (compactness) که به نام *ضریب گراویلیوس* (Gravelius) نیز نامیده می‌شود عبارت است از نسبت محیط حوضه (P) به محیط دایرهٔ فرضی که مساحت آن برابر مساحت حوضه باشد(P′).

$$C = \frac{P}{P'}$$

$$A = \pi R^2$$

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

$$P' = 2\pi R$$

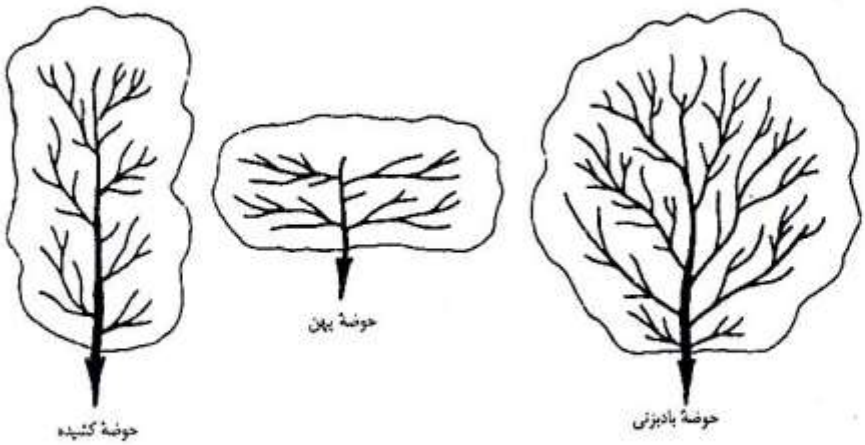
$$P' = 2\pi \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

$$C = \frac{P}{2\pi\sqrt{A/\pi}} = \frac{P}{2\sqrt{A\pi}}$$

که آن را می‌توان بصورت زیر نیز نوشت :

$$C = \frac{0.28P}{\sqrt{A}} \qquad (۱۲-۱۱)$$

اگر حوضه دایره‌ای کامل باشد ضریب $C = 1$ است در غیر این صورت مقدار این ضریب بزرگتر از یک خواهد بود که نشان‌دهندهٔ انحراف شکل آن از دایره است. ضریب گراویلیوس حوضه‌ها معمولاً بین ۱/۵ تا ۲/۵ می‌باشد.



شکل ۱۲-۱۵ شکلهای مختلف حوضه‌های آبریز.

ج ـ نسبت دایره‌ای نسبت دایره‌ای حوضه (R_c) عبارت است از نسبت مساحت حوضه (A) به مساحت دایره‌ای (A^o) که محیط آن مساوی محیط حوضه (P) باشد یعنی:

$$R_c = \frac{A}{A^o} = 12.57 \frac{A}{p^2} \qquad (۱۲-۱۲)$$

در این صورت بین ضریب گراویلیوس و نسبت دایره‌ای رابطه زیر قرار است.

$$R_c = \frac{1}{C^2} \qquad (۱۳-۱۲)$$

در برخی نوشته‌های هیدرولوژی از نسبت دایره‌ای بعنوان ضریب فشردگی حوضه نیز یاد شده است. لذا توجه شود که نام یک ضریب یا نمایه مطرح نبوده و آنچه اهمیت دارد طرز بدست آوردن آن نمایه می‌باشد.

د ـ نسبت کشیدگی در یک حوضه اگر مساحت آن A باشد در این صورت قطر دایره معادل آن $(\frac{A}{\pi})^{0.5}$ 2 خواهد بود. در چنین حوضه‌ای بر حسب تعریف **نسبت کشیدگی** (elongation ratio) بصورت زیر بیان شده است.

$$R_e = \frac{2}{Lm}(\frac{A}{\pi})^{0.5} = (\frac{A}{0.786})^{0.5} \frac{1}{Lm} \qquad (۱۴-۱۲)$$

که Lm طول حوضه در جهت موازی با طولانی‌ترین آبراهه حوضه و A مساحت حوضه‌است. لذانسبت کشیدگی برابر است با نسبت قطر دایره فرضی هم مساحت حوضه به طول حوضه.

بعنوان مثال چنانچه مساحت حوضه‌ای ۱۵۷ کیلومتر و طول آن در جهت موازی با طولانی‌ترین آبراهه (رودخانه اصلی) ۱۶ کیلومتر باشد نسبت کشیدگی آن برابر ۰/۸۸ خواهد بود زیرا:

$$R_e = \frac{1}{16}(\frac{157}{0.786})^{0.5} = 0.88$$

باید توجه داشت که ضرایب یا نمایه‌هائی که بنام‌های عامل شکل، فاکتور شکل، نمایه شکل بکار می‌رود و یا نسبت‌هائی مانند کشیدگی و دایره‌ای و غیره تماماً قراردادی بوده و بعضاً ممکن است توسط افراد مختلف ولی با نام‌های متفاوت ارائه شوند لذا دقت شود که هر زمان از آن‌ها استفاده می‌شود همراه با تعریف آن واژه باشد.

هـ ـ مستطیل معادل غالباً حوضه‌ها از نظر شکل ظاهری با یک مستطیل فرضی بنام *مستطیل معادل* مقایسه می‌شوند. مستطیل معادل نمایش دهندهٔ حوضهٔ آبریزی است که محیط آن به شکل مستطیل تغییر یابد ولی مساحت آن برابر مساحت حوضه باشد.بعبارت دیگر مستطیل معادل دارای سطح، محیط و ضریب گراویلیوس مساوی حوضه اصلی است. با داشتن مساحت و ضریب گراویلیوس حوضه می‌توان طول (L) و عرض (B) مستطیل معادل حوضه را بدست آورد. زیرا:

$$C = \frac{0.28\ P}{\sqrt{A}}$$

$$P = 2(L + B)$$

$$P = \frac{C\sqrt{A}}{0.28}$$

$$2(L + B) = \frac{C\sqrt{A}}{0.28}$$

$$L = \frac{A}{B}$$

$$L = \frac{C\sqrt{A} + \sqrt{(C^2A - 1.2544\ A)}}{1.12} \qquad (۱۲-۱۵)$$

$$B = \frac{C\sqrt{A} - \sqrt{(C^2A - 1.2544\ A)}}{1.12} \qquad (۱۲-۱۶)$$

بدین ترتیب با داشتن معادله‌های فوق می‌توان ابعاد مستطیل معادل حوضه یعنی طول و عرض آن را بدست آورد. لازم به ذکر است که معادله‌های فوق در شرایطی صادقند که ضریب گراویلیوس حوضه بیشتر از ۱/۱۲ باشد.

● مثال ۱۲-۵

مساحت یک حوضهٔ آبریز ۳۵ کیلومتر مربع و محیط آن ۳۰ کیلومتر است. عرض و طول مستطیل معادل آن چقدر است؟

$$\text{ضریب گراویلیوس} = C = \frac{0.28(30)}{\sqrt{35}} = 1.42$$

$$L = \frac{1.42\sqrt{35} + \sqrt{[(1.42)^2(35) - 1.2544(35)]}}{1.12}$$

$$L = 12.1 \approx 12$$

$$B = \frac{1.42\sqrt{35} - \sqrt{[(1.42)^2(35) - 1.2544(35)]}}{1.12}$$

$$B = 2.9 \approx 3$$

از رابطه ساده $B=A/L = 35/12.1 = 2.9$ نیز می‌توان عرض مستطیل معادل را بدست آورد.

و ـ فاصله تا مرکز ثقل حوضه نمایه طولی فاصله تامرکز ثقل حوضه (L_{cg}) را بدین صورت می‌توان تعریف کرد که هر حوضه آبریز دارای یک **مرکز ثقل** است که ممکن است مانند شکل ۱۲-۴ روی رودخانه اصلی و یا این که خارج از رودخانه اصلی واقع باشد. اگر مرکز ثقل روی رودخانه اصلی واقع باشد فاصله آن تا انتهای حوضه با علامت L_{cg} نشان داده می‌شود. این نمایه از عوامل مهمی است که در تخمین رواناب از آن استفاده بعمل می‌آید. چنانچه این نقطه خارج از رودخانه اصلی قرار گیرد در این صورت روی رودخانه اصلی نقطه‌ای راکه در مقابل مرکز ثقل حوضه است مشخص می‌کنیم (معمولا از مرکز ثقل بر رودخانه اصلی خط عمود وارد می‌شود و نقطه تلاقی بعنوان تصویر مرکز ثقل روی رودخانه در نظر گرفته می‌شود) و سپس فاصله این

نقطه راتا نقطه خروجی حوضه بعنوان L_{ca} در نظر می‌گیریم. بطوریکه مشاهده می‌شود مشخص کردن موقعیت مرکز ثقل در حوضه‌ها دارای اهمیت می‌باشد. برای بدست آوردن مرکز ثقل حوضه کافی است که شکل آن حوضه را روی یک کاغذ مقوایی رسم کرده و سپس حاشیه حوضه را با قیچی ببریم تا صفحه‌ای مشابه شکل حوضه در اختیار قرار گیرد. سپس در دو نقطه از گوشه‌های حوضه سوراخی را ایجاد کرده و یک نخ از آن گذرانده و حوضه را در امتداد آن نخ رها کنید. خط امتداد نخ را در هر یک از حالات روی حوضه رسم کنید. محل تقاطع آنها مرکز ثقل حوضه خواهد بود.

ز ـ فاکتور شکل در هر حوضه آبریز اگر L طول رودخانه اصلی و L_{ca} فاصله عمودی یا کوتاهترین فاصله رودخانه اصلی تا مرکز ثقل حوضه باشد بر حسب تعریف فاکتور که با علامت L_i نشان داده می شود برابر است با:

$$L_i = (L.L_{ca})^{0.3} \qquad (۱۲-۱۷)$$

در این معادله L و L_{ca} باید برحسب میل باشند (هر میل ۱/۶۰۹ کیلومتر است).

● مثال ۱۲-۶

در شکل ۱۲-۴ فاصله نقطه خروجی حوضه (در امتداد رودخانه اصلی) تا نقطه‌ای که در مقابل مرکز ثقل حوضه قرار دارد ۲۱۳۰ متر می‌باشد حساب کنید فاکتور عامل شکل حوضه را:

حل

طول حوضه = $L = 2374 + 1200 = 3574$ m

طول حوضه = $L = 3.574$ Km $= 2.22$ mile

$L_{ca} = 2130$ m $= 2.13$ Km $= 1.32$ mile

$L_i = (L \,.\, L_{ca})^{0.3}$

$L_i = [(2.22)(1.33)]^{0.3}$

$L_i = 1.38$

۱۲-۳-۵ ارتفاع حوضه (پستی و بلندی)

ارتفاع حوضه نسبت به سطح دریا نشان دهندهٔ موقعیت اقلیمی آن حوضه است. در حوضه‌های مناطق مرتفع نه تنها بارندگی بیش از حوضه‌های پست است بلکه در قلل ارتفاعات غالباً نزولات جوی به صورت برف می‌باشد که هیدرولوژی آن متفاوت با رگبارهاست.

برحسب تعریف ارتفاع متوسط حوضه رقومی است که ۵۰ درصد مساحت اراضی حوضه ارتفاعی بالاتر از آن و ۵۰ درصد مساحت حوضه ارتفاعی پایین‌تر از آن داشته باشند. بنابراین

تشخیص ارتفاع متوسط حوضه از روی نقشه‌های توپوگرافی ساده نخواهد بود مگر این که منحنی تجمعی تغییرات سطح حوضه نسبت به ارتفاع از پائین‌ترین رقوم حوضه را روی یک دستگاه مختصات رسم کرده و سپس از روی آن ارتفاعی را که مربوط به نیمی از مساحت حوضه باشد مشخص کنیم.

نحوه توزیع ارتفاعات در حوضه‌ها معمولاً با دو نمودار که بنامهای منحنیهای ارتفاعی معروفند (هیپسومتری hypsometry و آلتی متری altimetry) رسم می‌شود که هر دو مفهوم واحدی داشته اما بصورتهای متفاوت رسم می‌شوند.

برای رسم منحنی هیپسومتری ابتدا پس از تعیین و رسم مرز حوضه روی نقشه توپوگرافی مساحتی از حوضه که بین هر دو خط تراز واقع شده است با پلانی‌متر اندازه‌گیری می‌شود. سپس در یک دستگاه محور مختصات، ارتفاع نسبت به مساحتی از حوضه که بالاتر از آن ارتفاع قرار دارد به صورت تجمعی رسم می‌شود. به عنوان مثال اگر فرض شود در حوضه‌ای مطابق شکل ۱۲-۱۶ خطوط تراز ۱۱۵۰ تا ۱۷۵۰ متر با فواصل ۱۰۰ متری رسم شده باشد، مساحتی از حوضه که بین هر دو خط تراز قرار گرفته است در ستون دوم جدول ۱۲-۱ نوشته شده است. در ستون سوم این جدول مساحتی از حوضه که در بالای هر خط تراز قرار می‌گیرد محاسبه شده است. ارقام ستون چهارم این مساحت‌ها را برحسب درصد نسبت به سطح کل حوضه نشان می‌دهد.

حال اگر ارقام ستون اول نسبت به ستونهای ۳ یا ۴ رسم شود شکلی مطابق منحنی ۱۲-۱۷ بدست خواهد آمد که منحنی ارتفاعی یا **هیپسوگراف** حوضه نامیده می‌شود. ارتفاع مربوط به ۵۰ درصد مساحت حوضه نشان‌دهندهٔ ارتفاع متوسط حوضه است که در شکل ۱۲-۱۷ مربوط به رقوم ۱۴۶۰ متر است. ارتفاع متوسط حوضه از فرمول ۱۲-۱۸ نیز محاسبه می‌شود.

$$\bar{H} = \frac{\Sigma(a \times H)}{A} \qquad (۱۲-۱۸)$$

a = مساحت جزیی حوضه که بین هر دو خط تراز واقع شده است

H = متوسط ارتفاع در جزء a از مساحت (از جمع کردن خط تراز بالایی و پایینی و تقسیم آن بر ۲ به دست می‌آید).

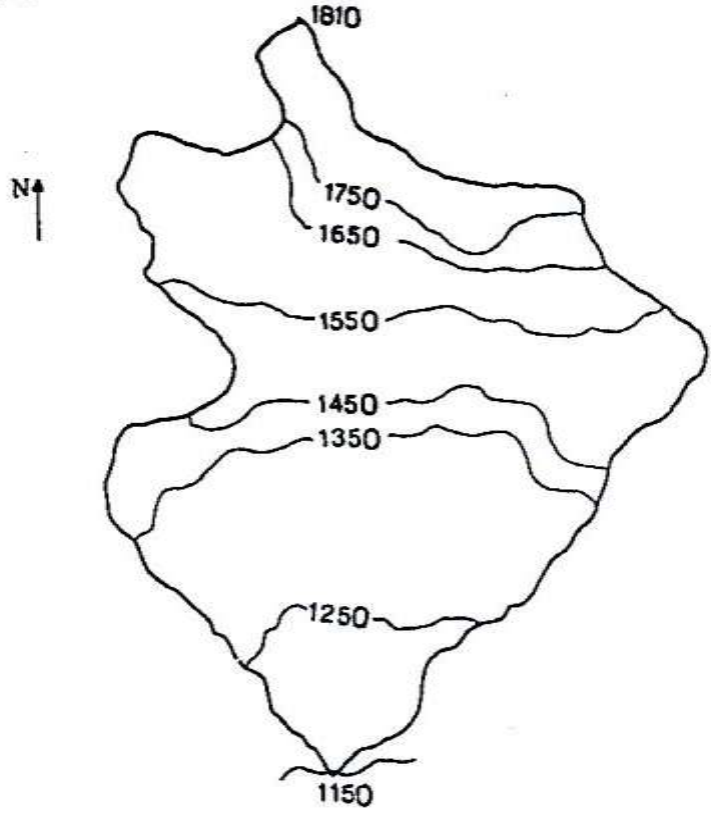
A = مساحت کل حوضه

بعنوان مثال برای شکل ۱۲-۱۶، مقدار $\bar{H}$ برابر است با:

$$\bar{H} = \frac{22[(1150 + 1250)/2] + 50[(1250 + 1350)/2] + \ldots + 19[(1750 + 1810)/2]}{182}$$

$$\bar{H} = \frac{26400 + 65000 + 21000 + 49500 + 49600 + 20400 + 33820}{182} = 1460 \text{ m}$$

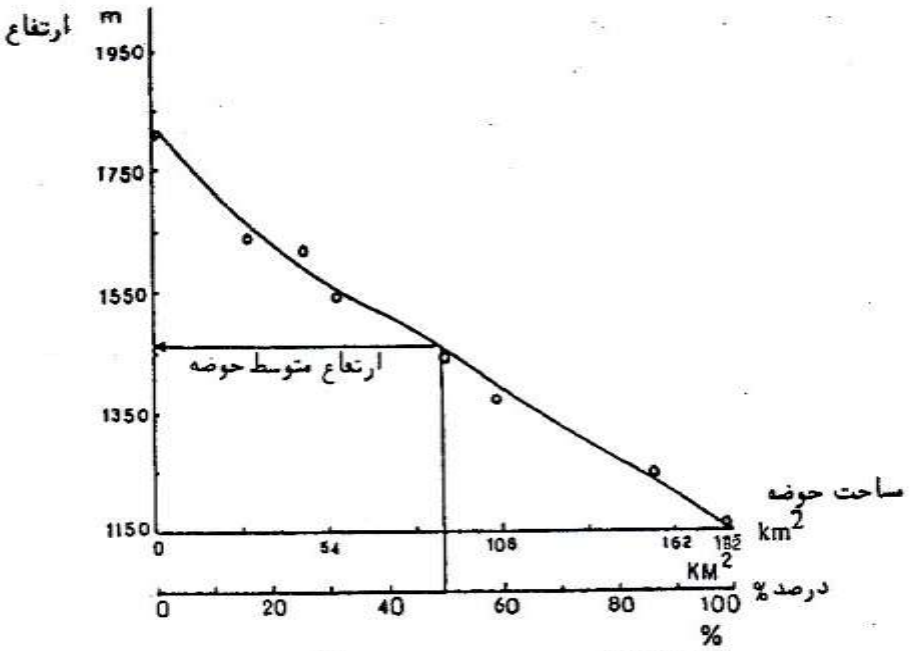
داشتن منحنی هیپسومتری حوضه‌ها در هیدرولوژی کاربرد فراوان دارد از جمله این که می‌توان از روی آن مساحت سطوح پوشیده از برف را اندازه‌گیری کرده و یا با داشتن ارتفاع متوسط حوضه مقادیر دما، بارندگی و تبخیر در سطح حوضه را تخمین زد.



شکل ۱۲-۱۶ خطوط تراز در محدوده حوضه آبریز

جدول ۱۲-۱

(1)	(2)	(3)	(4)
ارتفاع (m)	مساحت بین دو خط تراز km^2	مساحتی از حوضه که بالاتر از ... قرار گرفته است	درصدی از مساحت حوضه که ارتفاعی بیش از ... دارند
1150	22	182	100
1250	50	160	88
1350	15	110	60
1450	33	95	52
1550	31	62	34
1650	12	31	17
1750	19	19	10
1810			0

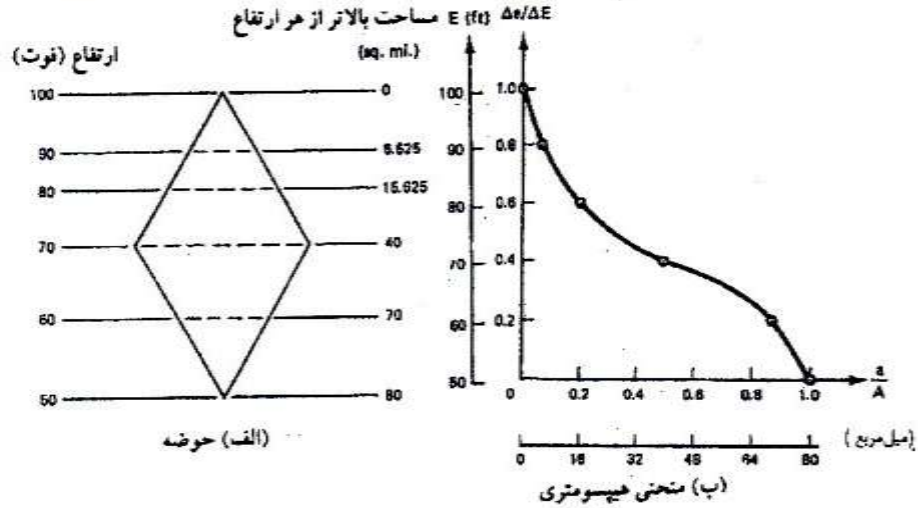


شکل ۱۲-۱۷ منحنی هیپسومتری حوضه شکل ۱۲-۱۶

غالباً منحنی‌های هیپسومتری بصورت بی‌بعد نیز رسم می‌شوند تا بتوانند برای حوضه‌هایی که اطلاعات فیزیکی از آنها در دست نمی‌باشد مورد استفاده قرار گیرد. برای این منظور کافی است که در شکل ۱۲-۱۷ اعداد محور افقی را بر مساحت حوضه و ارقام محور عمودی را بر بلندترین ارتفاع حوضه تقسیم کنیم تا هر دو محور اعدادشان از صفر تا ۱ باشد. مثلاً در حوضه فرضی شکل ۱۲-۱۸ الف که یک حوضه به شکل لوزی نشان داده شده است. تغییرات ارتفاع از ۵۰ تا ۱۰۰ فوت و مساحت کل حوضه ۸۰ میل مربع می‌باشد منحنی هیپسومتری بصورت بی بعد رسم شده است.

حال از روی منحنی بی‌بعد هیپسومتری می‌توان برخی از نمایه‌های فیزیکی مهم را که در مقایسه حوضه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد بدست آورد. این نمایه‌ها عبارتند از:

رسم منحنی هیپسومتری حوضه مذکور به این صورت بوده است که در شکل سمت راست دو محور عمودی و محور افقی در نظر گرفته شده است. درجه بندی محور عمودی اول از ۵۰ تا ۱۰۰ فوت مربوط به ارتفاع حوضه (E) برحسب فوت است که بین پائین‌ترین (۵۰) و بالاترین (۱۰۰) نقطه حوضه است. درجه‌بندی محور عمودی دوم از صفر تا یک می‌باشد و مربوط به اختلاف ارتفاع نسبی ($\Delta e/\Delta E$) است . بطوریکه مشاهده می‌شود در مقابل عدد ۵۰ فوت صفر



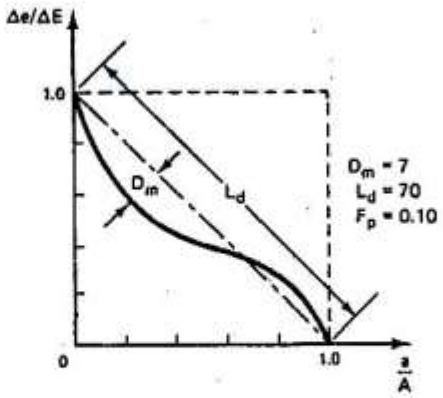
شکل ۱۲-۱۸ منحنی هیپسومتری بی بعد برای یک حوضه فرضی

نوشته شده است زیرا هیچ مساحتی از حوضه پائین‌تر از ۵۰ فوت ارتفاع ندارد. در مقابل عدد ۶۰ فوت چون $\Delta e = 60\text{-}50$ و $\Delta E = 100\text{-}50$ می‌باشد لذا: $(\Delta e/\Delta E) = \frac{60 - 50}{100 - 50} = 0.2$ و یا در مقابل عدد ۷۰ فوت چون $\Delta E = 100 - 50$ و $\Delta E - 100 - 50$ می‌باشد. $\frac{\Delta e}{\Delta E} = \frac{70 - 50}{100 - 50} = 0.4$ و الی آخر نوشته شده است. در این شکل محور افقی که مربوط به مساحت حوضه می‌باشد از صفر تا ۸۰ میل مربع که بصورت $\frac{a}{A}$ با تقسیم بر ۸۰ از صفر تا یک بی‌بعد شده و محور افقی دیگر را تشکیل داده‌اند. مختصات نقاط تشکیل دهنده منحنی هیپسومتری عبارت بوده‌اند از:

ارتفاع(فوت)	مساحت a	a/A	Δe/ΔE
50	80	1	0
60	70	0.87	0.2
70	40	0.50	0.4
80	15.62	0.19	0.6
90	5.62	0.07	0.8
100	0	0	1.0

آنچه در شکل ۱۲-۱۸ رسم شده است اعداد ستون سوم نسبت به ستون چهارم می‌باشد.

(۱) - **نسبت مساحت هیپسومتریک** (hypsometric area ratio, Ha) این نسبت برابر است با سطح زیر منحنی هیپسومتریک بی‌بعد به مساحت مربع تشکیل شده از نقاطی با مختصات (۰ ، ۱) و (۰ ، ۰) و (۱ ، ۰) و (۱ ، ۱). مثلاً در شکل ۱۲-۱۹ این نسبت ۰/۴۳ می‌باشد.



شکل ۱۲-۱۹ تخمین پارامترهای هیپسومتریک حوضه

(۲) - عامل نیمرخ حوضه (profile factor, F_p) اگر مطابق شکل ۱۲-۱۹ دو نقطه ابتدا و انتهای منحنی هیپسومتریک بی‌بعد را بهم وصل کنیم و طول این خط L_d و حد اکثر فاصله آن تا منحنی هیپسومتری D_m باشد عامل نیمرخ حوضه برابراست با D_m/L_d.

● مثال ۱۲-۷

اگر معادله گرادیان بارندگی نسبت به ارتفاع در منطقه‌ای که حوضه مربوط به شکل ۱۲-۱۶ در آن واقع شده است بصورت $P = 125 + 0.2H$ باشد (در این فرمول P بارندگی سالانه (mm) و H ارتفاع (m) است)، متوسط بارندگی در این حوضه چقدر تخمین زده می‌شود.

حل

$$H = \frac{22[(1150 + 1250)/2] + 50[(1250 + 1350)/2] + \ldots + 19[(1750 + 1810)/2]}{182}$$

$$P = 125 + 0.2(1460)$$

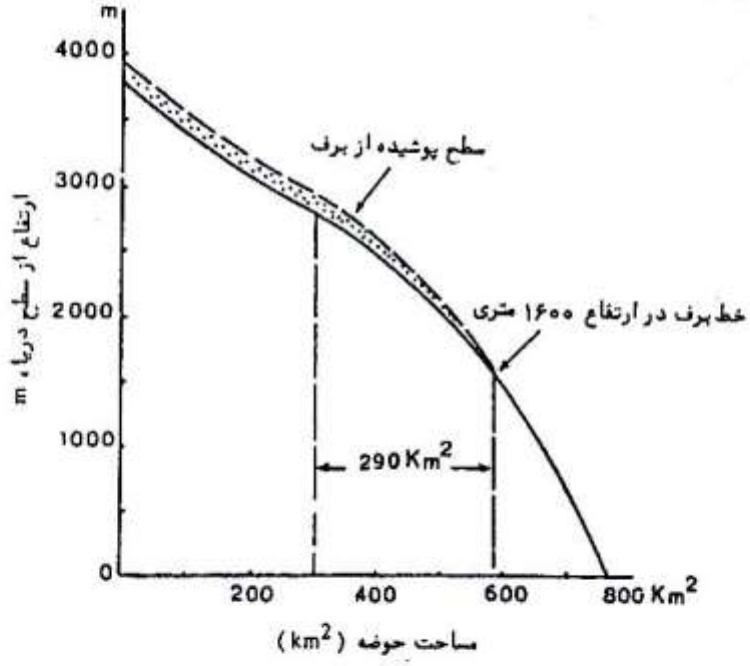
$$P = 417 \text{ mm}$$

● مثال ۱۲-۸

در یک حوضهٔ آبریز منحنی هیپسومتری مطابق شکل ۱۲-۲۰ رسم شده است. در این حوضه در روز ۱۷ فروردین خط برف در ارتفاع ۱۶۰۰ متری قرار گرفته است (یعنی در روز مذکور کلیهٔ ارتفاعات بالاتر از ۱۶۰۰ متر پوشیده از برف بوده است). در ارتفاع ۲۰۰۰ متری این حوضه یک ایستگاه هواشناسی وجود دارد که در آن متوسط دما در روز ۱۷ فروردین ۷ درجه سلسیوس بوده است. اگر کاهش دما (افتاهنگ واقعی) به ازای هر ۱۰۰ متر یک درجهٔ سانتی‌گراد و ضریب ذوب برف ۰/۳ میلی‌متر برای هر درجه ـ روز باشد، دبی سیلاب حاصله از ذوب برف را محاسبه کنید.

حل

چون ایستگاه واقع در ارتفاع ۲۰۰۰ متری متوسط دما را ۷ درجه نشان می‌دهد هرچه از آن پایین برویم متوسط دما بیشتر از ۷ درجه و هرچه از آن بالا برویم دما کمتر از ۷ خواهد بود. خط برف در ۱۶۰۰ متری واقع است و فاصلهٔ عمودی این خط تا ایستگاه هواشناسی ۴۰۰ متر (۴۰۰ = ۱۶۰۰ - ۲۰۰۰) است. لذا به ازاء ۴۰۰ متر دمای هوا ۴°C افزایش یافته است و در خط برف در روز ۱۷ فروردین متوسط دما ۱۱°C=۴+۷ خواهد بود. در ضمن اگر از ارتفاع ۲۰۰۰ متری به اندازهٔ ۷۰۰ متر بالا برویم (ارتفاع ۲۷۰۰=۷۰۰+۲۰۰۰) متوسط دما در روز مذکور در آن نقطه به صفر می‌رسد. بدین ترتیب تاارتفاع ۲۷۰۰ متری که دما بالاتر از صفر است برف ذوب خواهد شد و از ارتفاع ۲۷۰۰ متری به بالا چون متوسط دمای روزانه کمتر از صفر است برف ذوب نمی‌شود. از روی شکل وسعتی از حوضه که پوشیده از برف بوده و در آن برف ذوب



شکل ۱۲-۲۰

می‌شود ۲۹۰ کیلومتر مربع است. در این منطقه ۲۹۰ کیلومترمربعی دما در پایین‌ترین قسمت آن ۱۱ °C و در بالاترین قسمت آن صفر است. لذا میانگین دمای روز ۱۷ فروردین در سطحی از برف که در حال ذوب شدن است ۵/۵ °C است. چون آستانه ذوب برف صفر درجه است تعداد درجه ـ روز در ۱۷ فروردین ۵/۵ می‌باشد (۵/۵=۰-۵/۵) که به ازاء آن برف ذوب خواهد شد.

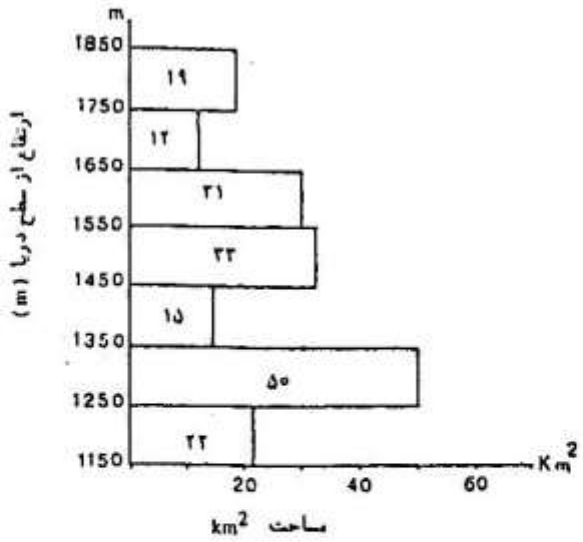
اگر ضریب ذوب برف را ۰/۳ میلی‌متر برای هر درجه روز در نظر بگیریم مقدار حجم آب حاصله در یک روز برابر ۴۷۸۵۰۰ متر مکعب و دبی حاصله از آن ۵/۵ متر مکعب در ثانیه است زیرا:

$$\left(\frac{0.3}{1000}\right)(5.5)(290 \times 10^6) = 478500 \text{ m}^3$$

$$\frac{478500}{86400} = 5.5 \text{ m}^3/\text{sec}$$

روش دیگر برای مشخص کردن توزیع ارتفاعات حوضه رسم **نمودار آلتی‌متری** است. اگر روی محور عرضها ارتفاع و روی محور طولها مساحتی ازحوضه که بین دو ارتفاع موردنظر واقع شده است به صورت نمودار ستونی تصویر شوند شکل به دست آمده را نمودار آلتی‌متری حوضه گویند.

به عنوان مثال در مورد حوضه‌ای که منحنی هیپسومتری آن قبلا رسم شده بود (شکل ۱۲-۱۶) اگر ارقام ستون ۱ و ۲ جدول ۱۲-۱ نسبت بهم به صورت هیستوگرام رسم شود منحنی آلتی‌متری حوضه بدست می‌آید (شکل ۱۲-۲۱). از روی این نمودار بهتر می‌توان تشخیص داد که بیشترین سطح حوضه دارای چه ارتفاعی است. مثلاً در شکل ۱۲-۲۱ مشاهده می‌شود که ۵۰ کیلومتر مربع از مساحت حوضه دارای ارتفاعی بین ۱۲۵۰ تا ۱۳۵۰ متر می‌باشد.



شکل ۱۲-۲۱ نمودار آلتی‌متری.

۱۲-۳-۶ شیب حوضه

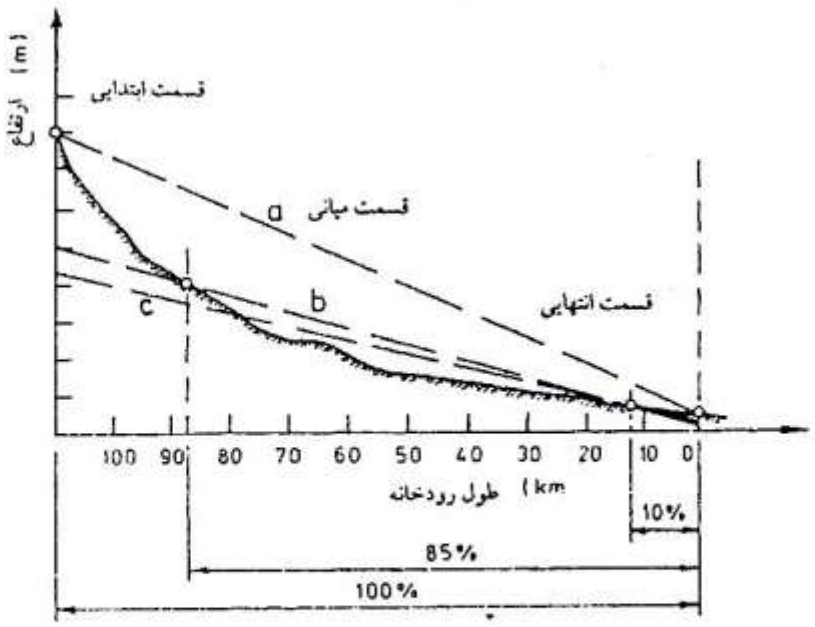
نیمرخ طولی رودخانه اصلی می‌تواند اطلاعات مفیدی در مورد حوضه مانند سرعت حرکت آب، قدرت فرسایشی رودخانه و زمان تمرکز را به دست دهد. اگر به شکل ۱۲-۲۲ توجه شود نیمرخ رودخانه‌ها معمولاً از سه قسمت مجزا تشکیل شده است؛

الف ـ قسمت فرازآب: که شیب آن تند و سرعت آب در این قسمت زیاد است. بستر رودخانه در این قسمت از مسیر مرتب در حال فرسایش است تا بتدریج از حالت جوان بودن خارج و به مرحله تکامل برسد.

ب ـ قسمت میانی: که شیب آن کمتر از شیب قسمت سرآب است. در این قسمت اغلب شاخه‌های فرعی به رودخانه می‌پیوندند و دبی رودخانه در قسمتهای مختلف آن دفعةً افزایش می‌یابد. خصوصیات این قسمت از رودخانه عوامل اصلی طراحی را تشکیل می‌دهد زیرا این قسمت از رودخانه تقریباً تکامل یافته است.

ج ـ قسمت فرود آب یا پایاب: که رودخانه شیب خود را از دست داده و محلی است که بار رسوب برجای گذاشته می‌شود و رودخانه به سن تکاملی رسیده است (رودخانه مسنّ).

برای اندازه‌گیری شیب آبراههٔ اصلی روشهای متعددی مرسوم است که از بین آنها سه روش عمده مورد استفاده قرار می‌گیرد و انتخاب نوع روش به قضاوت شخصی مهندسان بستگی دارد. این سه روش نیز در شکل ۱۲-۲۲ تشریح شده‌اند.



شکل ۱۲-۲۲ نیمرخ طولی و شیب متوسط آبراهه.

روش اول – ابتدا و انتهای رودخانه روی نقشه بهم وصل می‌شوند تا خط مستقیمی مانند خط a در شکل ۱۲-۲۲ بدست آید، شیب این خط را می‌توان بعنوان شیب رودخانه اصلی در نظر گرفت. دراین روش اگر اختلاف ارتفاع ابتدا و انتهای آبراهه اصلی Δz و طول آن L باشد متوسط شیب برابر $S = (\Delta z)/L$ خواهد بود ولی از آنجائی که در بالای حوضه‌ها ارتفاع بطور ناگهانی زیاد می‌شود شیب بدست آمده از این طریق در یک ضریب اصلاحی (C) ضرب می‌شود تا شیب تعدیل شده بدست آید. مقدار ضریب اصلاحی C بسته به این که نیمرخ آبراهه اصلی مقعر یا محدب باشد از فرمول‌های زیر بدست می‌آید:

$$C = \frac{A_p}{A_t}$$ (۱۲-۱۹) برای نیمرخ‌های مقعر

$$C = \frac{2\,A_t - A_p}{A_t}$$ (۱۲-۲۰) برای نیمرخ‌های محدب

در این فرمول‌ها:

A_p = سطح واقعی در زیر نیمرخ طولی آبراهه اصلی (شکل ۱۱-۲۲)

A_t = سطح مثلثی که از وصل کردن ابتدا و انتهای آبراهه اصلی بدست می‌آید (شکل ۱۲-۲۲).

روش دوم – روی نیمرخ رودخانه دو نقطه را که یکی مربوط به ۱۰ درصد طول (از انتهای رودخانه) و دیگری مربوط به ۸۵ درصد طول رودخانه (از انتها) باشد مشخص کرده و آن دو را بهمدیگر وصل می‌کنیم تا خطی مشابه b در شکل ۱۲-۲۲ بدست آید. شیب این خط نیز بعنوان شیب آبراهه اصلی می‌تواند در نظر گرفته شود.

روش سوم– روی نیمرخ رودخانه خط مستقیمی مانند C طوری رسم می‌شود که اولاً نقطه انتهایی آن منطبق بر نقطه انتهایی نیمرخ رودخانه باشد و ثانیاً سطح مثلث ایجاد شده توسط آن با محورهای مختصات برابر سطح زیر منحنی نیمرخ رودخانه با این محورها باشد. در این صورت نیز شیب این خط برابر شیب متوسط رودخانه در نظر گرفته‌می‌شود. معمولاً در کارهای هیدرولوژی بیشتر از این روش و یا روش دوم استفاده می‌شود.

در مطالعات هیدرولوژی ممکن است فقط داشتن شیب رودخانهٔ اصلی کفایت کند ولی از آنجائی که حوضهٔ آبریزیک صفحهٔ سه بُعدی است که رودخانه‌ها در جهات مختلف آن جریان دارند و شیب حوضه نیز در قسمتهای مختلف متفاوت است، لذا در بعضی موارد ممکن است علاوه بر شیب رودخانه اصلی به محاسبهٔ شیب اراضی حوضه نیز نیاز باشد. در این صورت می‌توان به یکی از روشهای زیر عمل کرد.

در روش نخست که به روش هورتون معروف است اگر مساحت حوضه A کیلومتر مربع و مجموع طول خطوط تراز داخل حوضه که با فاصله ارتفاعی H رسم شده‌اند برابر ΣL کیلومتر

باشد شیب متوسط حوضه (S) حدوداً برابر خواهد بود با:

$$S = (H. \Sigma L)/A \qquad (۲۱-۱۲)$$

که S شیب اراضی حوضه می‌باشد.

در روش دوم اگر حداکثر ارتفاع حوضه H_{max} (کیلومتر) و حداقل ارتفاع آن H_{min} (کیلومتر) و مساحت حوضه A (کیلومترمربع) باشد شیب متوسط حوضه از فرمول تجربی زیر محاسبه می‌شود.

$$S = (H_{max} - H_{min}) / \sqrt{A} \qquad (۲۲-۱۲)$$

برای مثال اگر حد اکثر ارتفاع در یک حوضه که وسعت آن ۱۰۰ کیلومتر مربع است ۲۸۵۰ متر و حد اقل ارتفاع برابر ۱۲۰۰ متر از سطح دریا باشد متوسط شیب اراضی این حوضه ۰/۱۶۵ یا ۱۶/۵ درصد خواهد بود.

در یک روش دیگر نقشهٔ توپوگرافی حوضه که فاصله ارتفاعی خطوط تراز آن مشخص است شبکه‌بندی شده و یا کاغذ شفاف شبکه‌بندی شده‌ای بر روی نقشهٔ توپوگرافی حوضه قرار داده می‌شود. طول خطوط افقی و عمودی شبکه که داخل محدودهٔ حوضه قرار می‌گیرند (در جهت افقی و عمودی) و تعداد محلهایی که خطوط شبکه و خطوط تراز نقشه یکدیگر را قطع می‌کنند اندازه‌گیری می‌شود سپس شیب حوضه در دو جهت افقی (S_H) و عمودی (S_V) از فرمول‌های زیر محاسبه و از روی آنها بدون در نظر گرفتن حالت برداری و جهت شیب متوسط (S) حوضه بدست می‌آید.

$$S_H = \frac{(N_1)\,(H)}{L_1} \qquad (۲۳-۱۲)$$

$$S_V = \frac{(N_2)\,(H)}{L_2} \qquad (۲۴-۱۲)$$

$$S = \frac{(S_H)+(S_V)}{2} \qquad (۲۵-۱۲)$$

در معادله‌های فوق:

S_H = شیب حوضه در جهت افقی (شرقی - غربی)

S_V = شیب حوضه در جهت عمودی (شمالی - جنوبی)

N_1 = تعداد نقاط تلاقی خطوط تراز با خطوط افقی شبکه در محدوده داخل حوضه

H = فاصله ارتفاعی خطوط تراز (متر).

L_1 = مجموع طولهای خطوط افقی شبکه در داخل حوضه (متر).

N_2 = تعداد نقاط تلاقی خطوط تراز با خطوط عمودی شبکه رسم شده در محدوده حوضه

L_2 = مجموع طولهای خطوط عمودی شبکه در داخل محدوده حوضه (متر).

S = شیب متوسط حوضه

● **مثال ۱۲-۹**

نقشهٔ یک حوضهٔ آبریز با خطوط تراز ۵۰ متری شبکه‌بندی شده است. مجموع طول خطوط افقی شبکه که در داخل حوضه قرار می‌گیرد ۸۵۹۰۰ متر و طول خطوط قائم آن ۷۰۱۰۰ متر است. تعداد تقاطع خطوط افقی شبکه با منحنی‌های تراز ۸۳ و تعداد تلاقی خطوط عمودی با منحنی‌های تراز ۱۰۱ می‌باشد، شیب متوسط حوضه را محاسبه کنید.

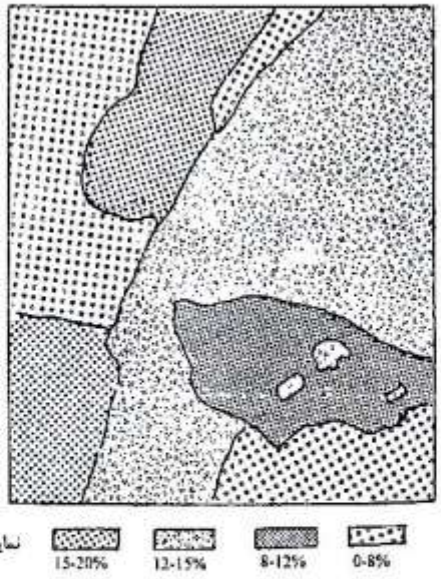
حل

$$\text{شیب در جهت شرقی - غربی (٪)} = \frac{(83)(50)}{85900} \times 100 = 4.83$$

$$\text{شیب شمالی - جنوبی (٪)} = \frac{101 \times 50}{70100} \times 100 = 7.20$$

$$\text{شیب متوسط (٪)} = \frac{4.83 + 7.20}{2} = 6$$

در روش رایج دیگر حوضه شبکه‌بندی شده و بزرگترین شیب در داخل هر یک از مربعهای شبکه از روی کمترین فاصله خطوط تراز داخل همان مربع بدست می‌آید که به عنوان شیب نقطه مرکزی آن مربع در نظر گرفته و سپس مساحاتی که شیب آنها در یک بازه خاص قرار می‌گیرند مشخص می‌شود. مثلا مشخص می‌گردد که فرضا ۲۵ کیلومترمربع از مساحت حوضه شیبی بین ۵ تا ۱۰ درصد دارد. بدین ترتیب نقشه شیب مطابق نمونه شکل ۱۲-۲۳ بدست می‌آید.



شکل ۱۲-۲۳ نمونه یک نقشه شیب

بطور دقیق‌تر می‌توان شیب در چهارگوشه مربع و وسط مربع را از روی خطوط ترازی که از آن نقاط می‌گذرد بدست آورده و میانگین این ۵ نقطه را بعنوان شیب متوسط آن مربع حساب کرده و سپس نقشه شیب را رسم نمود. با داشتن نقشه شیب و متوسط شیب در داخل هر محدوده می‌توان شیب متوسط حوضه را از فرمول زیر بدست آورد.

$$\text{شیب متوسط حوضه} = \left[\frac{\Sigma(\text{متوسط شیب قطعه})\ (\text{مساحت هر قطعه شیب})}{\text{مساحت حوضه}}\right] \times 100$$

۷-۳-۱۲ جهت شیب حوضه

عامل جهت شیب از نظر تاثیر آن بر بعضی فرآیندهای هیدرولوژیک مانند ذوب برفها و تنوع پوشش گیاهی در حوضه‌های آبریز حائز اهمیت است. جهت حوضه را بطرق مختلف می‌توان اندازه‌گیری و توصیف کرد. یک روش آن است که فقط جهت عمومی حوضه را در نظر بگیریم مثلاً یک حوضه ممکن است در دامنه‌های شمالی یک رشته کوه قرارگیرد در این صورت کلاً مشخص است که جهت شیب حوضه رو به شمال است. ممکن است بطور دقیق‌تر برای تعیین جهت حوضه جهات چهارگانه (شمال، شرق، جنوب و غرب) و یا جهات هشت گانه مورد بررسی قرار گیرد. در مطالعات آبخیزداری از نظر تأثیری که جهت دامنه‌های حوضه بر نوع فرسایش خاک دارد لازم است نقشه جهت شیب نیز تهیه شود.

در مطالعات هیدرولوژی غالباً شیب و جهت حوضه بصورت گرافیکی بررسی می‌شود تا بتواند تصویر عینی از وضعیت حوضه را در اختیار قرار دهد. برای این منظور به ترتیبی که در زیر بیان شده است عمل می‌گردد.

۱- از حوضه نقشه توپوگرافی تهیه کرده و آن را مطابق شکل ۱۲-۲۴ شبکه‌بندی کنید.

۲- در محل تقاطع هر یک از خطوط افقی و عمودی این شبکه جهت شیب را رسم کرده و مقدار آن را اندازه‌گیری کنید. لازم به ذکر است که خطی که از رئوس شبکه عمود بر نزدیکترین خط تراز رسم شود امتداد شیب بوده و جهت شیب از طرف خط تراز بالاتر به سمت خط تراز پایین‌تر خواهد بود. در شکل ۱۲-۲۴ جهت شیب‌ها با پیکان‌های سیاه در رأس هر مربع مشخص شده است.

۳- زاویه‌ای که هر یک از پیکان‌ها (جهت شیب‌ها) با خط شمال می‌سازند توسط یک نقاله اندازه‌گیری و یادداشت شود. مثلاً این زاویه برای پیکان شمالی صفر و برای پیکان جنوبی ۱۸۰ و پیکان غربی ۲۷۰ درجه خواهد بود.

۴- مقدار شیب را بر حسب درصد در محل هر یک از خطوط شبکه اندازه‌گیری و آن را یادداشت کنید لازم به ذکر است که با داشتن فاصله دو خط تراز محل نقاط شبکه و اختلاف ارتفاع دو خط تراز در این محل مقدار شیب قابل اندازه‌گیری است. مثلاً اگر فاصله دو خط تراز دو

نقطه ۵۰ متر و اختلاف آنها ۲ متر باشد مقدار شیب ۴ درصد است.

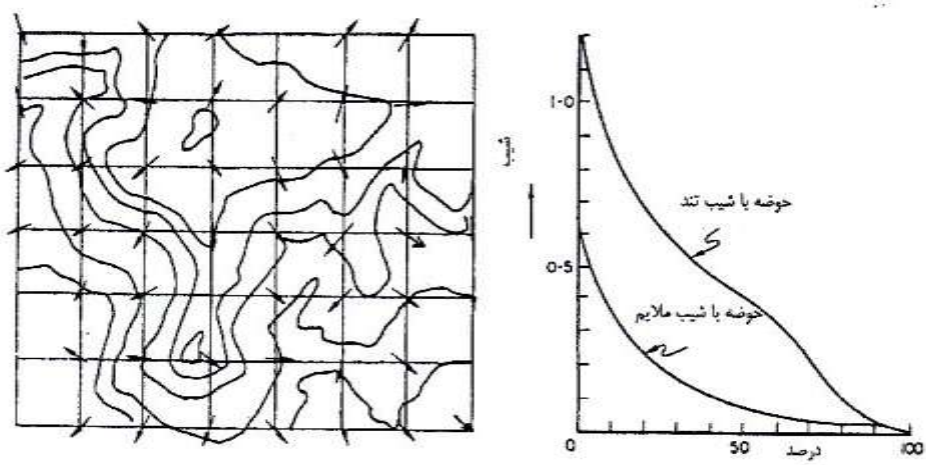
۵- بدین ترتیب با توجه به نقشه‌ای که رسم کرده‌اید تقریباً به تعداد نقاط شبکه جهت شیب (از نظر زاویه نسبت به شمال) و بهمان تعداد مقدار شیب خواهید داشت. مثلاً در شکل ۱۲-۲۴ ممکن است به ازاء ۵۶ نقطه شبکه ۵۶ عدد برای مقدار شیب حوضه در اختیار داشته باشید (n = 56) اعدادستون ۲ جدول ۱۲-۲ مقادیر شیب در محل هر گره شبکه می‌باشد.

۶- اعداد بدست آمده برای شیب را به ترتیب صعودی ردیف کنید و به هر کدام یک شماره ردیف (m) اختصاص دهید (ستون ۳ جدول در شکل ۱۲-۲).

۷ - با استفاده از فرمول $p = \frac{m}{n}$ احتمال وقوع هر یک از شیب‌ها را بدست آورید (ستون ۵ جدول در شکل ۱۲-۲). ستون۶ احتمال بیشتر از .... را نشان می‌دهد

۸- در یک دستگاه محور مختصات معمولی ستون ۳ و ۶ یا ۳ و ۵ را نسبت به همدیگر رسم کنید تا منحنی تغییرات شیب نسبت به درصد احتمال هر وقوع بدست آید (شکل ۱۲-۲۴).

نقاط شبکه	شیب(٪) (در محل هر گره)	شیب(٪) (ترتیب صعودی)	شماره ردیف ترتیب صعودی	احتمال کمتراز(٪) m/n	احتمال بیشتراز(٪) n/m
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0.2	0	1	1.78	98.13
2	0.5	0.1	2	3.56	96.44
3	1.2	0.2	3	5.35	94.65
4	0.7	0.3	4	7.12	92.88
5	0	0.3	5	8.90	91.1
6	0.1	0.4	6	10.68	89.32
7	0.2	0.05	7	12.46	87.54
8	0.3	0.6	8	14.24	85.76
9	0.4	0.7	9	16.02	83.98
10	1.1	1.1	10	17.08	82.92
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
56	0.6	1.5	56	100	0



شکل ۱۲-۲۴

۹- از نقطه مربوط به ۵۰ درصد روی محور افقی (احتمال) خط عمودی رسم کنید تا منحنی شیب را در نقطه‌ای تلاقی کند. از محل تلاقی یک خط افقی اخراج نمایید تا محور قائم را قطع نماید. عدد بدست آمده روی محور قائم متوسط شیب اراضی حوضه را بدست می‌دهد

در شکل ۱۲-۲۴ دو منحنی بعنوان نمونه برای شیب اراضی حوضه رسم شده است که یکی از آنها نشان دهنده شیب ملایم و دیگری شیب تند است.

برای بدست آوردن جهت شیب حوضه نیز بصورت زیر عمل شود.

۱- یک صفحه دایره‌ای را انتخاب کرده و آن را مطابق شکل ۱۲-۲۵ از نظر زاویه‌ای که با شمال می‌سازد به ۱۶ قسمت تقسیم کنید که هر قسمت شامل ۲۲/۵ درجه خواهد بود.

۲- با توجه به زاویه‌ای که برای هر یک از نقاط شبکه (مثلاً برای ۵۶ نقطه) از لحاظ جهت شیب بدست آورده‌اید مشخص کنید هر یک از نقاط شبکه از نظر جهت در کدام یک از قسمت‌های ۱۶ گانه صفحه دایره‌ای قرار می‌گیرند. می‌توانید این قسمت‌ها را در جهت حرکت عقربه ساعت از ۱ تا ۱۶ شماره‌گذاری کنید.

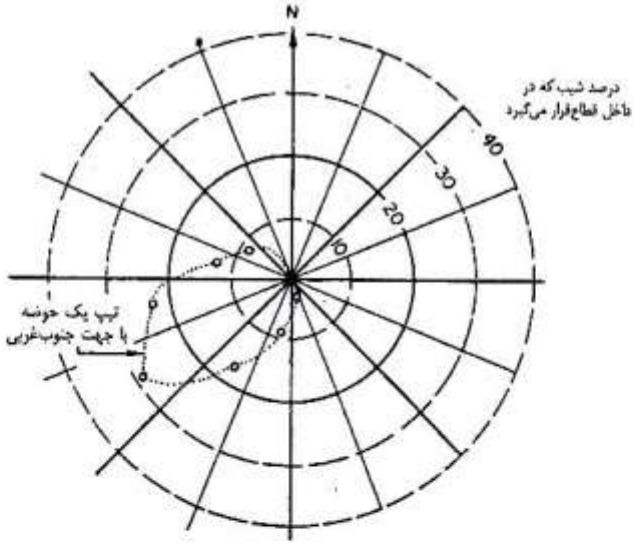
۳- تعداد نقاطی را که در هر قطاع ۲۲/۵ درجه‌ای قرار می‌گیرند شمارش کرده و درصد آن را نسبت به کل نقاط شبکه بدست آورید. مثلاً اگر در قطاع ۶ که زاویه آن نسبت به شمال بین ۱۱۲/۵ و ۱۳۵ درجه می‌باشد ۱۱ نقطه قرار گرفته‌اند درصد شیب هایی که در این جهت می‌باشند ۱۹/۶ می‌باشد.

۴- روی صفحه‌ای دایره‌ای که در اختیار دارید دوایر متحدالمرکز به فواصل مساوی رسم کرده و آنها را از مرکز به سمت خارج از صفر تا ۱۰۰ که نشان دهنده درصد می‌باشد درجه بندی

کنید. مثلاً در شکل ۱۲-۲۵ این دوایر برای درصدهای ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ و ۴۰ رسم گردیده که این مقادیر روی دوایر نوشته شده است.

۵ - موقعیت نقاطی راکه در بند ۳ از نظر درصد بدست آورده‌اید با توجه به قطاع شیب و مقدار درصد شیب روی صفحه درجه بندی شده مشخص کنید. مثلاً اگر برای جهت ۱۱۲/۵ تا ۱۳۵ درجه (منطقه ۶) ۱۱ نقطه وجود داشت و درصد آن ۱۹/۶ می‌باشد نقطه‌ای را در مرکز ناحیه ۶ و نزدیک خط ۲۰ درصد علامت گذاری کنید. توجه شود که ممکن است برای برخی نقاط هیچ درصدی وجود نداشته باشد.

۶- پس از تکمیل شدن نقشه، نقاط بدست آمده را با نقطه چین همانطور که در شکل نشان داده شده است، بهم وصل کنید تا محدودهٔ مسدودی متناسب با وضعیت جهت شیب حوضه بصورت تصویری نشان داده شود. مثلاً در شکل مشاهده می‌شود که برای یک حوضه جهت شیب عمدتاً بطرف جنوب غربی (SW) می‌باشند. یعنی حوضه از نظر جهت یک حوضه جنوب غربی است.

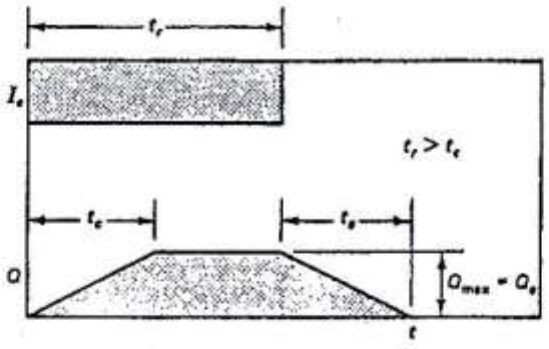


شکل ۱۲-۲۵ دیاگرام جهت شیب

۱۲-۳-۸ زمان تمرکز

حداکثر زمانی که طول می‌کشد تا آب از دورترین نقطه حوضه مسیر هیدرولوژیکی خود را طی کرده و به نقطه خروجی برسد **زمان تمرکز** (time of concentration) نام دارد. دورترین نقطه نسبت به خروجی حوضه ممکن است فاصله فیزیکی آن دو نقطه‌نباشد بلکه فاصلهٔ هیدرولوژیکی آنها مورد نظر است. اگر فرض شود بارانی باشدت یکنواخت (Ie) و برای مدت

بسیار طولانی (t_r) روی حوضه‌ای ببارد و شدت بارندگی نیز زیادتر از ظرفیت نفوذ باشد بلافاصله پس از بارندگی جریان رواناب نیز ایجاد می‌شود. بتدریج با گذشت زمان دبی خروجی از حوضه افزایش می‌یابد (زیرا رواناب دیگر نقاط حوضه نیز در دبی خروجی مشارکت می‌نمایند). سرانجام پس از مدتی دبی به حداکثر خود (Q_{max}) می‌رسد و از آن به بعد تغییری در دبی رخ نخواهد داد. از شروع رواناب تا زمانی که دبی به حداکثر مقدار یا تعادل خود (Q_e) برسد مدتی به طول می‌انجامد که آن را زمان تمرکز (t_c) گویند (شکل ۱۲-۲۶). چنانچه مدّت بارندگی از زمان تمرکز حوضه بیشتر باشد و شدت بارندگی نیز افزون بر ظرفیت نفوذ باشد که حالتی مشابه شکل ۱۲-۲۶ اتفاق افتد بدست آوردن زمان تمرکز از روی شکل بسیار ساده است اما این وضعیت، بخصوص در حوضه‌های بزرگ، کمتر اتفاق می‌افتد لذا همیشه زمان تمرکز برابر فاصله شروع سیلاب تا نقطه اوج منحنی سیل نمی‌باشد. علاوه بر این در حوضه‌های تحت مطالعه که فاقد داده‌های اندازه‌گیری شده قبلی از باران و سیل می‌باشند تخمین زمان تمرکز امری است که می‌بایست بدون توجه به این مسائل انجام شود. برای این منظور فرمول‌ها و روشهای تجربی زیادی توسط متخصصان پیشنهاد شده است که به ذکر پاره‌ای از آنها می‌پردازیم.



شکل ۱۲-۲۶ مفهوم زمان تمرکز.

(۱) - **معادله ایزارد** *ایزارد* (Izzard) در سال ۱۹۴۴ میلادی معادله زیر را برای تخمین زمان تمرکز پیشنهاد نمود.

$$t_c = \frac{(0.024\, i^{0.33} + 878\, K/i^{0.67})L^{0.67}}{(CH^{0.5})^{0.67}} \qquad (۱۲-۲۶)$$

در این فرمول که t_c (زمان تمرکز) را برحسب ساعت بدست می‌دهد:

L = طول مسیر آبراهه اصلی (km)

i = شدت بارندگی (mm/hr)

H = اختلاف ارتفاع دو طرف آبراهه اصلی (m)

C = ضریب رواناب که مقادیر آن برای سطوح مختلف از جدول ۱۲-۲ بدست می‌آید.

K = ضریب مربوط به نوع سطح که مقدار آن برابر است با:

اسفالت	K = 0.007
بتن	K = 0.012
اراضی لخت	K = 0.017
اراضی کشاورزی	K = 0.046
مراتع	K = 0.060

برحسب تجربه معادله ایزارد برای شرایطی صادق است که در آن $i.L < 3.8$ باشد که i شدت بارندگی برحسب mm/hr و L طول مسیر آبراهه برحسب کیلومتر می‌باشد.

(۲) ـ معادله کربای کربای (Kerby) در سال ۱۹۵۹ معادله زیر را برای تعیین زمان تمرکز پیشنهاد نمود.

$$t_c = 3.03 \left(\frac{r\, L^{1.5}}{H^{0.5}} \right)^{0.467} \qquad (۱۲-۲۷)$$

در این معادله r ضریب مربوط به سطح حوضه می‌باشد که مقادیر آن به شرح زیر می‌باشد.

- سطوح صاف	r = 0.02
- خاکهای لخت و متراکم	r = 0.10
- خاکهای با پوشش گیاهی کم	r = 0.30
- مراتع معمولی و فقیر	r = 0.40
- مراتع با پوشش خوب	r = 0.80

بقیه‌اجزاءفرمول‌درمعادله ۱۲-۲۶ توصیف شده‌اند. براساس تجارب حاصله ازکاربرد این فرمول معادله کربای فقط برای حوضه‌های بسیار کوچک با حداکثر طول ۴۰۰ تا ۵۰۰ متر صادق است.

جدول ۱۲-۲ ضریب رواناب (C) برای استفاده در معادله تخمین زمان تمرکز به روش ایزارد

وضعیت سطح حوضه	ضریب C	ملاحظات (اضافه یا کسر شود)
اراضی کشاورزی	0.30	
اراضی لخت و بدون پوشش گیاهی	0.40	برای شیبهای کمتر از ۵ درصد (-0.05)
اراضی با پوشش گیاهی	0.35	برای شیبهای بیش از ۱۰ درصد (+0.05)
اراضی جنگلی	0.18	برای بارندگی سالیانه کمتر از 600mm (-0.03)
		برای بارندگی سالیانه بیش از 900mm (+0.03)
پوشش آسفالتی	0.7-0.9	
پارکها	0.05-0.10	
اراضی سکونی	0.18-0.22	
پشت‌بامها	0.7-0.9	
چمن‌زارها	0.15-0.2	برای شیبهای بیش از ۷ درجه

(۳) ـ معادله برانس‌بای - ویلیامز معادله‌ای که توسط برانس‌بای (Bransby) و ویلیامز (Williams) برای زمان تمرکز پیشنهاد گردید بصورت زیر می‌باشد. در این فرمول A مساحت حوضه بر حسب کیلومتر مربع و سایر اجزای فرمول واحدهای معادله ایزارد را دارند.

$$t_c = \frac{0.96\ L^{1.2}}{H^{0.2}\ A^{0.1}} \qquad (۲۸-۱۲)$$

این معادله نیز برای حوضه‌های کوچک بخوبی قابل استفاده است.

(۴) ـ معادله سازمان هوانوردی آمریکا سازمان هوانوردی آمریکا برای ساخت فرودگاهها و تخلیه رواناب حاصله از بارندگیها روی باند فرودگاهها دستورالعملی را پیشنهاد نموده است که در آن محاسبه زمان تمرکز از فرمول زیر صورت می‌گیرد.

$$t_c = \frac{3.64\ (1.1 - C)L^{0.83}}{H^{0.33}} \qquad (۲۹-۱۲)$$

که در آن اجزاء فرمول و واحدهای مربوطه مشابه معادله ایزارد می‌باشد.

(۵) ـ معادله اورتون ـ میدوز در سال ۱۹۷۶ اورتون (Overton) و میدوز (Meadows) بر اساس فرمول مانینگ معادله‌ای رابرای تخمین زمان تمرکز پیشنهاد نمودند. در این روش ابتدا زمان حرکت جریان ورقه‌ای بصورت زیر محاسبه و از روی آن زمان تمرکز بدست می‌آید.

$$t_i = \frac{0.007\ (n\ L)^{0.8}}{(P_2)^{0.5}(S)^{0.4}} \qquad (۳۰-۱۲)$$

t_i = زمان از شروع رواناب تا هنگامی که بصورت ورقه‌ای در سطح حوضه جریان دارد.

n = ضریب زبری مانینگ

L = طول آبراهه اصلی (فوت)

P_2 = میانگین حداکثر بارش ۲۴ ساعته (اینچ)

S = شیب آبراهه (ft/ft)

معمولاً پس از این که آب فاصله‌ای بطول ۳۰۰ فوت را روی حوضه طی کرد جریان ورقه‌ای بصورت آبراهه‌ای درآمده و سرعتی پیدا می‌کند که باتوجه به معادله مانینگ برابر خواهد بود با:

$$v = (1.49/n)(R^{0.66})(S^{0.5}) \qquad (۳۱-۱۲)$$

که در آن n ضریب مانینگ برای آبراهه، R شعاع هیدرولیکی آبراهه (فوت)، S شیب آبراهه (ft/ft) و v سرعت حرکت آب (ft/sec) در آبراهه است.

از روی شکل ۱۲-۲۷ نیز می‌توان سرعت حرکت آبراهه‌ای آب باتوجه به نوع پوشش و درصد شیب بدست آورد. با داشتن سرعت حرکت جریان آب در آبراهه و طول مسیر، زمان طی حرکت بدست می‌آید که اگر آن را با زمان بدست آمده از معادله ۱۲-۳۰ جمع کنیم زمان تمرکز حوضه بدست می‌آید (به مثال ۱۲-۱۰ توجه کنید). مثلاً مطابق این شکل سرعت حرکت آب در سطح حوضه‌ای که شیب متوسط آن ۵ درصد و نوع پوشش جنگلی باشد معادل ۰/۵۵ فوت در

ثانیه (۰/۱۷ متر در ثانیه) است. زمان لازم برای این که جریان مسیر آبراهه‌ای خود را طی کند از تقسیم طول مسیر بر سرعت حرکت آب بدست می‌آید.

(۶) ـ معادله کرپیچ در سال ۱۹۴۰ کرپیچ (Kirpich) براساس داده‌های حاصله از ۶ حوضه کوچک معادله زیر را برای تخمین زمان تمرکز ارائه داده است.

$$t_c = 0.949\left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385} \qquad (۳۲-۱۲)$$

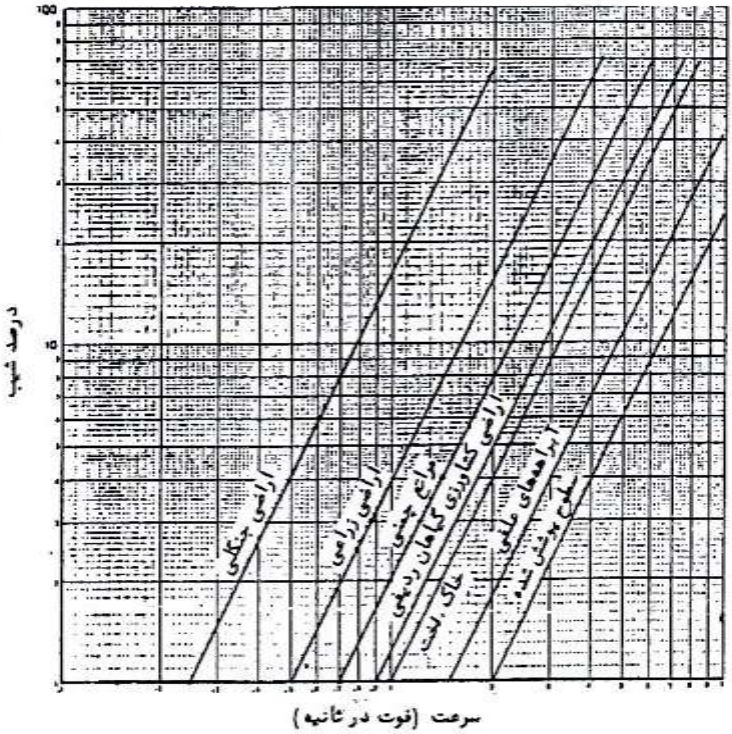
که در آن:

t_c = زمان تمرکز بر حسب ساعت

L = طولانی‌ترین مسیر حرکت آب در داخل حوضه (کیلومتر) یا طول مسیر آبراهه اصلی

H = اختلاف ارتفاع بین نقطهٔ تمرکز و بلندترین قسمت حوضه (متر) یعنی اختلاف ارتفاع بلندترین و پایین‌ترین نقطهٔ حوضه.

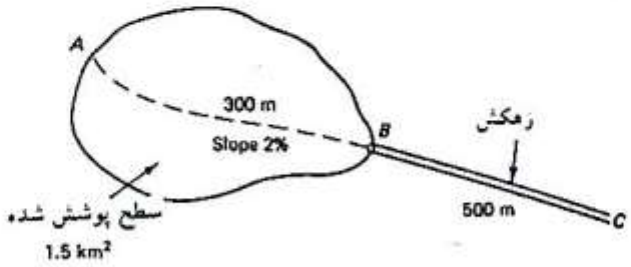
معادله کرپیچ نیز برای حوضه‌های کوچک قابلیت کاربری دارد.



شکل ۱۲-۲۷ سرعت حرکت آب در سطح حوضه برای تخمین زمان تمرکز.

● **مثال ۱۲-۱۰**

در یک حوضه آبریز شهری (urbanized watershed) که تصویر آن در شکل ۱۲-۲۸ نشان داده شده است. زمان تمرکز را تا نقطه C با روشهای مختلف بدست آورید. متوسط سرعت حرکت آب در زه‌کش یک متر در ثانیه و معادله شدت - مدت بارندگی بصورت $i = \frac{131.1}{t + 19}$ می‌باشد که در آن: t = مدت بارش بر حسب دقیقه و i = شدت باران برحسب اینچ در ساعت است.



شکل ۱۲-۲۸

حل

- با استفاده از روش کربای (معادله ۱۲-۲۷) برای سطوح صاف

$r = 0.02$

$H = \text{شیب} \times \text{فاصله} = \left(\frac{2}{100}\right)(300) = 6\text{m}$

$$t_c = 3.03\left[\frac{0.02(0.3)^{1.5}}{6^{0.5}}\right]^{0.467}$$

$t_c = 0.138 \text{ hr} = 8.3 \text{ min}$

- با استفاده از روش برانسبای ـ ویلیامز (معادله ۱۲-۲۸).

$$t_c = \frac{0.96(0.3)^{1.2}}{(6)^{0.2}(1.5)^{0.1}}$$

$t_c = 0.152 \text{ hr} = 9.1 \text{ min}$

- با استفاده از معادله سازمان هوانوردی امریکا (معادله ۱۲-۲۹). اگر ضریب رواناب را برابر ۰/۹ درنظر بگیریم (C = 0.9).

$$t_c = 3.64\left[\frac{(1.1 - 0.9)(0.3)^{0.83}}{(6)^{0.33}}\right]$$

$t_c = 0.148 \text{ hr}$

$t_c = 8.9 \text{ min}$

- با روش ایزارد (معادله ۱۲-۲۶) ابتدا شدت بارندگی را بدست می‌آوریم برای این کار لازم

است مدت بارندگی که برابر زمان تمرکز حوضه باشد داشته باشیم. اگر زمان تمرکز را ۱۵ دقیقه در نظر بگیریم:

$$i = \frac{131.1}{t + 19}$$

$$i = \frac{131.1}{15 + 19} = 3.85 \text{ in/hr}$$

$$i = = 98 \text{ mm/hr}$$

شرط استفاده از این روش آنست که اگر i.L را محاسبه کنیم کمتر از ۳/۸ باشد.

$$i.L = 98(0.3) = 29.4 > 3.8$$

لذا با فرض $t = 15$ min معادله ایزارد کاربرد ندارد هرچه t راکوچکتر بگیریم i بزرگتر و در نتیجه i.L بزرگتر خواهد بود لذا این معادله در مورد اخیر کاربرد ندارد. در روش ایزارد لازم می‌شود که با سعی و خطا آنقدر حل مسأله را ادامه داد تا به جواب موردنظر برسیم.

– با استفاده از روش اورتون ـ میدوز، از معادله ۱۲–۳۰ با در نظر گرفتن این که ضریب زبری مانینگ $n = 0.011$ و حداکثر بارش ۲۴ ساعته $P_2 = 3.5$ (inch) باشد ابتدا زمان جریان ورقه‌ای محاسبه می‌شود.

$$t_1 = \frac{0.007[0.011(300)]}{(3.5)^{0.5}(0.02)^{0.4}}$$

$$t_1 = 0.047 \text{ hr}$$

$$t_1 = 2.8 \text{ min}$$

بدین ترتیب از شروع رواناب بمدت ۲/۸ دقیقه جریان بصورت ورقه‌ای بوده و پس از آن حالت آبراهه‌ای بخود می‌گیرد که سرعت حرکت آبراهه‌ای از روی شکل ۱۲–۲۷ برابر ۲/۸ فوت در ثانیه (۰/۸۵ متر در ثانیه) بدست می‌آید لذا از طول ۳۰۰ متر حوضه ۲۰۸/۶ متر آن بصورت آبراهه‌ای طی خواهد شد. زیرا:

$$L = 300 - \frac{300}{3.281}$$

$$L = 208.6 \text{ m}$$

که ۳/۲۸۱ ضریب تبدیل متر و فوت می‌باشد. بنابراین زمان لازم برای طی این فاصله ۴/۱ دقیقه است. زیرا:

$$t_{t2} = \frac{208.6}{0.85} = 245.4 \text{ sec}$$

$$t_{t2} = 4.1 \text{ min}$$

در نتیجه زمان تمرکز یا زمانی که آب سطح حوضه را طی کند برابر ۶/۹ دقیقه خواهد بود زیرا:

$t_c = 2.8 + 4.1$

$t_c = 6.9$ min

اگر جریان رواناب مسیر ۵۰۰ متری کانال انتقال بعد از حوضه را با سرعتی معادل یک متر در ثانیه طی کند زمان طی جریان در این قسمت از مسیر ۸/۳ دقیقه است.

$$t_r = \frac{\text{طول کانال}}{\text{سرعت}} = \frac{500}{1} = 500$$

$t_r = 500$ sec $= 8.3$ min

که اگر مقدار ۸/۳ دقیقه به اعداد محاسبه شده قبلی اضافه شوند زمان تمرکز تا نقطه C به‌روشهای مختلف بین ۱۵/۲ تا ۱۷/۴ دقیقه خواهد بود. زیرا کوچکترین مقدار محاسبه شده ۶/۹ دقیقه (۱۵/۲=۸/۳+۶/۹) و بزرگترین مقدار محاسبه شده ۹/۱ دقیقه (۱۷/۴=۸/۳+۹/۱) بوده است.

روشهایی که تابحال گفته شد بیشتر در مورد حوضه‌های کوچک مورد استفاده داشته و برای حوضه‌های بزرگ کارایی چندانی ندارند. هرچند از روش کرپیچ در حوضه‌های متوسط نیز استفاده می‌شود اما در عملیات هیدرولوژی برای حوضه‌های بزرگ از روشهای دیگری مانند روش پیشنهادی سازمان حفاظت منابع طبیعی امریکا (NRCCS) که به روش زمان تأخیر (lag time) معروف است استفاده می‌شود. زمان تأخیر بر حسب تعریف فاصله زمانی بین مرکز بارش (نقطه زمانی وسط بارندگی) تا زمان اوج هیدروگراف است. در روش SCS ابتدا زمان تأخیر از فرمول زیر محاسبه می‌گردد.

$$t_{lag} = \frac{L^{0.8}\,(S + 1)^{0.7}}{1900\, y^{0.5}} \qquad (۳۳-۱۲)$$

که در آن t_{lag} زمان تأخیر (فاصله زمانی بین مرکز بارندگی تا نقطه اوج هیدروگراف) حوضه برحسب ساعت، L طول رودخانه اصلی برحسب فوت، y متوسط شیب حوضه (درصد) که غالباً برابر شیب متوسط رودخانه اصلی (محاسبه شده به روش C در شکل ۱۲-۲۲) و S نمایه نگهداشت آب در داخل حوضه (اینچ) است که مقدار آن برابر است با

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \qquad (۳۴-۱۲)$$

در این فرمول CN نمایه خصوصیات حوضه از نظر نفوذپذیری است. پس از محاسبه t_{lag} زمان تمرکز حوضه (t_c) از معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$t_c = 1.67\,(t_{lag}) \qquad (۳۵-۱۲)$$

● **مثال ۱۲-۱۱**

در یک حوضه آبریز CN=70 ، طول رودخانه اصلی ۶۴۰۰ فوت شیب آن ۴ درصد است. زمان تمرکز این حوضه چقدر تخمین زده می‌شود.

حل

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

$$S = \frac{1000}{70} - 10 = 4.28 \text{ inch}$$

$$t_{lag} = \frac{(6400)^{0.8}(4.28 + 1)^{0.7}}{1900(4)^{0.5}}$$

$$t_{lag} = 0.94 \text{ hr}$$

$$t_c = 1.67\ (0.94)$$

$$t_c = 1.56 \text{ hr}$$

بطوریکه مشاهده می‌شود در روش SCS برای تخمین زمان تمرکز ابتدا لازم است نمایه مربوط به خصوصیات نفوذ حوضه که بنام CN یا **شماره منحنی** (Curve Number) معروف است تعیین شود. برای تعیین CN در سطح حوضه به ترتیب زیر عمل می‌شود.

(۱) ابتدا گروه هیدرولوژیک خاکهای حوضه را باتوجه به نفوذپذیری خاکها مشخص کنید. در این رابطه حوضه‌ها به یکی از گروههای A ، B ، C یا D تقسیم می‌شوند. برای این منظور می‌توان از ارقام جدول ۱۲-۳ استفاده نمود.

جدول ۱۲-۳ طبقه‌بندی خاکهای حوضه برحسب نفوذپذیری.

گروه	حداقل نفوذپذیری (میلی‌متر در ساعت)
A	۷/۵-۱۱/۵
B	۳/۸-۷/۵
C	۱/۳-۳/۸
D	۰-۱/۳

(۲) ـ از جدول ۱۲-۴ با توجه به نوع خاک و پوشش حوضه مقدار CN حوضه را به دست آورید.

(۳) ـ CN بدست آمده از بند ۲ برای وضعیتی است که در آن فرض شده است خاک به لحاظ رطوبتی قبل از بارندگی در وضعیت متوسط باشد، یعنی نه زیاد خشک باشد و نه زیاد مرطوب. ولی اگر بارندگی زمانی‌باشد که از قبل حوضه خشک باشد و یا بارندگی در زمانی صورت گیرد که قبل از آن باران دیگری باریده و خاک حوضه مرطوب باشد، در این صورت باید CN برای هر یک از دو وضعیت خشک یا مرطوب اصلاح شود. در جدول ۱۲-۵

با داشتن CN برای حالت متوسط می‌توان CN را برای شرایط خشک یا مرطوب اصلاح کرد. مثلاً چنانچه حوضه از نوع مراتع خوب با گروه هیدرولوژیکی B باشد مقدار CN در آن ۶۱ می‌باشد ولی در صورتی بارندگی روی خاک مرطوب صورت گرفته باشد لازم است که CN برابر ۷۹ در نظر گرفته شود.

جدول ۱۲-۴ مقدار CN برای حوضه‌های مختلف باتوجه به‌نفوذپذیری خاک (گروههای A، B، C، D) و پوشش سطح حوضه.

خصوصیات پوشش سطح حوضه	A	B	C	D
پوشش جنگلی متوسط	36	60	73	79
پوشش جنگلی خوب	25	55	70	77
مراتع طبیعی با پوشش متوسط	49	69	79	84
مراتع طبیعی با پوشش خوب	39	61	74	80
اراضی کشاورزی				
زیر کشت حبوبات	55	69	78	83
زیرکشت غلات (ردیفهای مستقیم)	65	76	84	88
زیرکشت غلات (ردیفها به موازات خطوط تراز)	60	73	81	84
زیرکشت گیاهان ردیفی				
ردیفهای مستقیم با پوشش متوسط	72	81	88	91
ردیفهای مستقیم با پوشش خوب	67	78	85	89
ردیفها به موازات خطوط تراز				
با پوشش متوسط	70	79	84	88
با پوشش خوب	65	75	82	86
پشت‌بامها، پارکینگها و دیگر جاهای اسفالتی	98	98	98	98
مناطق مسکونی با ۶۵٪ اسفالت	77	85	90	92
مناطق مسکونی با ۲۰٪ اسفالت	51	68	79	84
خیابانها و جاده‌های اسفالتی	98	98	98	98
جاده‌های خاکی	72	82	87	89
جاده‌های شوسه	76	85	89	91

جدول ۱۲-۵ تبدیل CN از شرایط متوسط به شرایط خشک و مرطوب.

CN در وضعیت متوسط رطوبتی خاک	CN تصحیح شده	
	برای زمین خشک	برای زمین مرطوب
100	100	100
95	87	99
90	78	98
85	70	97
80	63	94
75	57	91
70	51	87
65	45	83
60	40	79
55	35	75
50	31	70
45	27	65
40	23	60
35	19	55
30	15	50
25	12	45
20	9	39
15	7	33
10	4	26
5	2	17
0	0	0

● **مثال ۱۲-۱۲**

در یک حوضهٔ آبریز که اراضی آن مرتعی با پوشش متوسط می‌باشد آزمایش نفوذپذیری به عمل آمده و نفوذپذیری ۴ میلی‌متر در ساعت گزارش شده است. برای بارانی که در اوایل تابستان رخ می‌دهد مقدار CN را برآورد کنید.

حل

باتوجه به جدول ۱۲-۳ حوضه از نظر نفوذپذیری در گروه B قرار می‌گیرد مقدار CN برای شرایط متوسط در مراتع طبیعی متوسط ۶۹ می‌باشد، از جدول ۱۲-۵ برای شرایط رطوبتی خاک خشک (اوایل تابستان) CN از ۶۹ (حدود ۷۰) به ۵۱ تصحیح می‌شود. لذا CN = ۵۱.

در صورتی که شرایط حوضه از نظر عوامل مؤثر بر CN یکنواخت نباشد باید مقدار میانگین وزنی CN برای کل حوضه محاسبه گردد، بدین ترتیب که:

$$\overline{CN} = [\Sigma (A_i / 100) (CN_i)] \qquad (۳۶-۱۲)$$

در این معادله:

$\overline{CN}$ = میانگین وزنی CN در سطح حوضه

Ai = درصد مساحتی از حوضه که شماره منحنی آن CNi است.

این موضوع در مثال زیر روشن شده است.

● **مثال ۱۲-۱۳**

در یک حوضهٔ آبریز ۴۰ درصد اراضی را پوشش جنگلی خوب و ۶۰ درصد دیگر را اراضی مسکونی تشکیل می‌دهد. در هر کدام از این پوششها ۷۵ درصد خاکهای حوضه درگروه هیدرولوژیکی B و ۲۵ درصد دیگر در گروه C قرار می‌گیرد. متوسط CN را حساب کنید.

حل

نوع پوشش	گروه هیدرولوژیک خاک	مساحت	CN
جنگلی	B	0.4(0.75)=0.3	55
جنگلی	C	0.4(0.25)=0.1	70
مسکونی	B	0.6(0.75)=0.45	85
مسکونی	C	0.6(0.25)=0.15	90

$$\overline{CN} = 0.3(55) + 0.1(70) + 0.45(85) + 0.15(90) = 75$$

از روش شماره منحنی برای تخمین زمان تمرکز نیز استفاده می‌شود. بر اساس فرمول پیشنهادی توسط شواب (Schwab) زمان تمرکز عبارت است از (برحسب ساعت):

$$t_c = \frac{L^{0.8}\left[\left(\frac{1000}{CN}\right) - 9\right]^{0.7}}{4470\,(S)^{0.5}}$$

در این فرمول:

L = طول آبراهه اصلی (متر)

CN = شماره منحنی

S = شیب متوسط حوضه (m/m)

مثلاً با توجه به مثال ۱۲-۱۱ که در آن CN = 70، طول آبراهه 1951 m = 6400 ft و شیب حوضه ۰/۰۴ می‌باشد. زمان تمرکز برابر است با:

$$t_c = \frac{(1951)^{0.8}\left[\left(\frac{1000}{70}\right) - 9\right]^{0.7}}{4470\,(0.04)^{0.5}} = 1.53$$

۱۲-۴ خطوط هم-پیمایش

خطوط هم-پیمایش (isochronal) مکان هندسی نقاطی هستند که زمان تمرکز آنها مساوی باشد. اگر در یک حوضه آبریز خطوط هم‌پیمایش همانند خطوط همباران رسم شده باشد آن را نقشه ایزوکرونال یا هم-پیمایش گویند. وجود نقشه‌های ایزوکرونال که نمونه‌ای از آن در شکل ۱۲-۲۹ رسم شده است در محاسبه حداکثر دبی لحظه‌ای سیلابهای حوضه مفید واقع می‌گردد.

بعنوان مثال اگر نقاطی از حوضه راکه فاصله زمانی حرکت آب از آن نقاط تا نقطه خروجی حوضه یک ساعت باشد بهم وصل کنیم خط ایزوکرونال یک ساعته بدست می آید. بهمین ترتیب می توانیم از روی تجربه یا به روشهای غیر مستقیم خطوط ایزوکرونال ۲، ۳، و یا ... ساعته حوضه را رسم کرد.

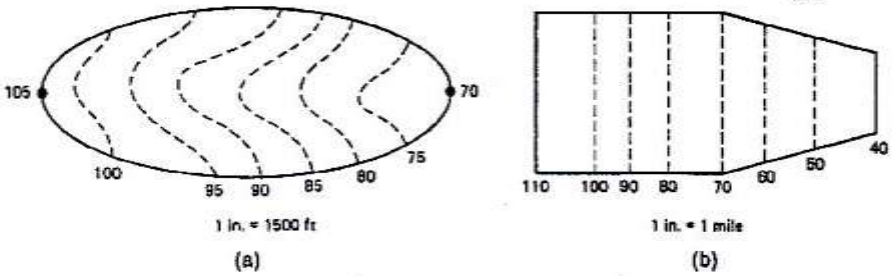
برای رسم خطوط هم-پیمایش می‌توان از نقطه خروجی حوضه خطوط شعاعی اخراج کرده و با توجه به شیب زمین در امتداد هرکدام از این خطوط سرعت آب را تخمین زده و سپس نقاطی راکه زمان پیمایش آنها یکسان است بدست آورد. برای بدست آوردن سرعت حرکت آب در امتداد هر یک از خطوط می‌توان از شکل ۱۲-۲۷ نیز استفاده کرد. با این وجود رسم خطوط هم‌پیمایش بستگی به مهارت هیدرولوژیست و دیدگاههای تجربی وی دارد.

شکل ۱۲-۲۹ نقشهٔ خطوط هم-پیمایش حوضه.

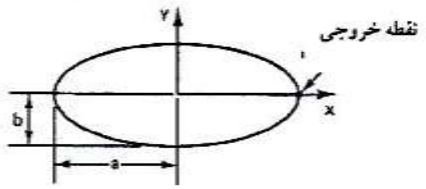
نکته قابل توجه آن است که خطوط ایزوکرونال علاوه بر شیب حوضه و خصوصیات سنگ‌شناسی به وضعیت پوشش گیاهی حوضه نیز بستگی داشته و لذا می‌تواند در طول سال ویا از سالی به سال دیگر تغییر نماید.

مسائل

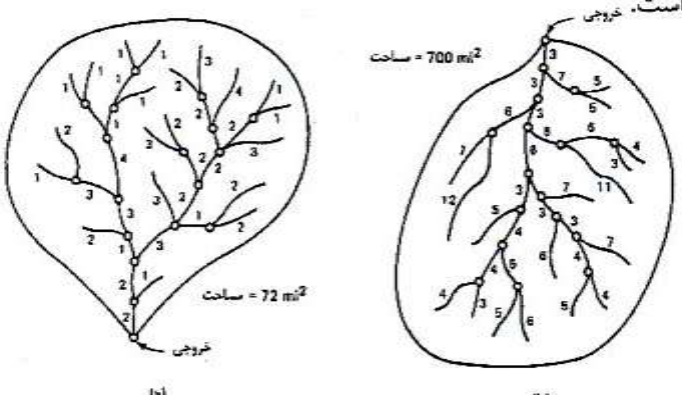
۱۲-۱ برای حوضه فرضی زیر که با مقیاس رسم شده است منحنی هیپسومتریک و پارامترهای: نسبت سطح هیپسومتریک (H_s)، عامل نیمرخ (F_p)، D_m و L_d را بدست آورید



۱۲-۲ یک حوضه آبریز به شکل بیضی و یا مشخصات زیر می‌باشد. پارامترهای شکل حوضه را بر حسب قطر بزرگ (2a) و کوچک (2b) حوضه استخراج کنید



۱۲-۳ شکلهای زیر مربوط به دو حوضه آبریز (a) و (b) می‌باشد. شبکه رودخانه برای این دو حوضه رسم شده و طول هر قسمت از مسیر آبراهه‌ها بر حسب کیلومتر روی هر یک از قطعات نوشته شده است.



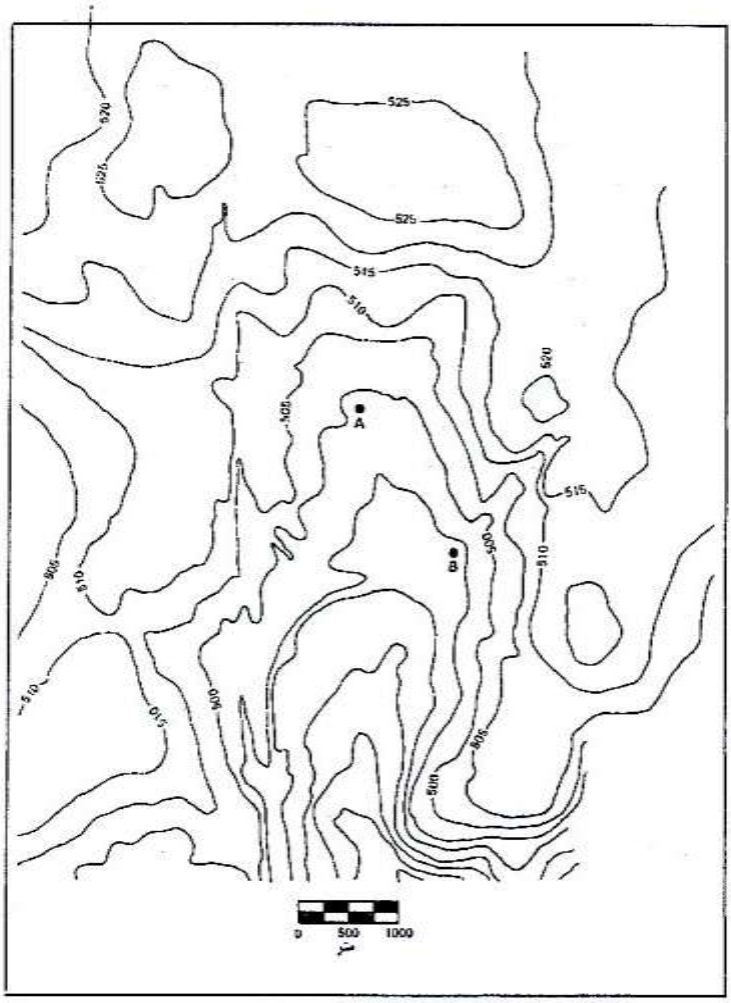
الف - تراکم شبکه رودخانه را در دو حوضه بدست آورید.

ب - شماره رده رودخانه‌ها و نسبت انشعاب را در هر کدام از حوضه محاسبه کنید.

۱۲-۴ نقشه زیرمربوط به یک حوضه آبریز است که خطوط تراز ۵ متری آن رسم شده است.

الف - مرز حوضه و نقطه خروجی آن را مشخص کنید.

ب - مساحت، محیط، طول حوضه و طول آبراهه اصلی را بدست آورید.
ج - ضرایب شکل حوضه را مشخص کنید.
د - منحنی آلتی‌متری و هیپسومتری حوضه را رسم کنید.
ه - شیب حوضه و آبراهه اصلی را بدست آورید.
و - زمان تمرکز حوضه را با روش‌هایی که می‌دانید بدست آورید.
ز - برای خصوصیات کوه -آبنگاری این حوضه یک گزارش هیدرولوژی بنویسید.



۵-۱۲ مسیر یک رودخانه را از نقطه خروجی تا بالاترین نقطه حوضه در امتداد رودخانه اصلی نقشه برداری کرده و نتایج زیر بدست آمده است.

ایستگاه	ارتفاع از سطح دریا (m)	فاصله تا نقطه خروجی (m)
1	134	0
2	141	4300
3	146	5600
4	180	7800
5	235	10400
6	242	1300

الف – پروفیل رودخانه را رسم کنید.

ب – شیب رودخانه را به روش هایی که می‌دانید بدست آورید.

۱۲–۶ نقشه یک حوضه آبریز را در منطقه خود پیدا کرده و قوانین هورتون را برای آن بدست آورید.

۱۲–۷ برای شکل ۱۲–۱۶ منحنی هیپسومتریک بی‌بعد را رسم کنید.

۱۲–۸ برای یک بارش مشخص رابطه بین نسبت انشعاب، دبی اوج و زمان رسیدن دبی به اوج در حوضه‌های مختلف چگونه است.

۱۲–۹ روش شماره منحنی معمولاً برای چه موردی استفاده می‌شود.

الف – تعیین تبخیر از یک سطح ب – تخمین رواناب پس از نفوذ

ج – تعیین حجم بارندگی د – تخمین حجم تبخیر

(جواب: ب)

۱۲–۱۰ اگر بارانی روی یک سطح پوشیده از آسفالت ببارد شماره منحنی چند در نظر گرفته می‌شود؟

الف – ۹۸ ب – ۱۴۰ ج – ۸۰ د – ۳۵

(جواب – الف)

۱۲–۱۱ روش شماره منحنی معمولاً برای چه نوع بارندگی‌هائی مناسب‌تر است:

الف – باران‌های مجزا ب – هفته‌ای ج – ماهانه د – سالانه

(جواب – الف)

۱۲–۱۲ در نظر گرفتن رطوبت اولیه خاک قبل از بارندگی در تخمین شماره منحنی در واقع در نظر گرفتن کدام حالت است.

الف – متوسط در سطح حوضه ب – کمتر از متوسط

ج – بیشتر از متوسط د – وضعیت اشباع

(جواب – الف)

۱۲-۱۳ چنانچه خاک سطح حوضه بسیار مرطوب و نزدیک اشباع باشد، شماره منحنی چند در نظر گرفته می‌شود؟

الف - ۱۰۰ ب - صفر ج - ۱۵۰ د - ۵۰

(جواب - الف)

منابع برای مطالعه بیشتر

1- Chebotarev, N.P., *Theory of stream run-off*, 1st. Prog. Sci. Trans. Jerusalem, 1966.
2- Chow, V.T., *Open channel hydraulics*, McGraw Hill Book Co. New York, 1959.
3- Chow, V.T., *Hand book of applied hydrology*, McGraw Hill Book Co. NewYork, 1964.
4- Gray, D.M., *Hand book of the Principles of hydrology*, water Inf. center, New York, 1973.
4- Gupta, R.S., *Hydrology and hydraulic systems*, Pretice Hall inc. New Jersey, 1989.
6- Kinori, B. and J.Mevorach, *Manual of surface drainage engineering*, Elsevier, NewYork, 1984.
7- Linsley, R. and J. Franzini, *Water Res. Eng.*, McGraw Hill Book Co. NewYork, 1964.
8- McCuen, R., *A Guide to hydrologic analysis using SCS methods*, Prentice-Hall Inc. London, UK, 1982.
9- Nemec. J., *Engineering hydrology*, McGraw Hill Book Co. New York, 1964.
10- SCS (Soil Conservation Service), *hydrology*, suppl. A to Sec. 4. Engineer-ing Handbook. Washington, D.C.,1968.
11- Wilson, E.M., *Engineering hydrology*, Mac Millan, London, 1969.
12- Zanoianu, I., *Morphometery of drainage basins*, Elsevier, New York, 1985.