

درس هیدرولوژی مهندسی

رشته کارشناسی پیوسته عمران

مدرس : مهندس شاکری

۱ مقدمه

۱-۱ معرفی، تعاریف و دسته بندی روش های تحلیل سامانه های آبی

کلمه هیدرولوژی به مفهوم علم شناخت آب است. به دلیل گستردگی این مفهوم و به منظور محدود نمودن مرزهای آن، اینطور تعریف می شود: "هیدرولوژی علم مطالعه آب در کره زمین شامل پیدایش، گردش، انتقال و توزیع، خصوصیات فیزیکی، شیمیایی، اندرکنش آن نسبت به محیط، اعم از زنده و بی جان، است." در این علم، تمام فرآیندهای آبی، مانند گردش، توزیع زمانی و مکانی آن در منطقه مورد مطالعه اعم از سطحی (نظیر رودخانه و دریاچه ها)، زیرزمینی و تاثیرات اکولوژیکی آن بررسی می شود.

پایه های هیدرولوژی بر تجربه استوار است. لذا جنبه های عملی آن بیش از جنبه های نظری آن توسعه یافته است. کاربرد عملی هیدرولوژی در زمینه طراحی انواع سازه های هیدرولیکی نظیر سد ها، بندها، پل ها، سیستم های جمع آوری و دفع آب های سطحی شهری، شبکه های زهکشی، مهندسی رودخانه، کنترل فرسایش و رسوب، کنترل سیلاب، آبخیز داری و آبخوان داری، تولید برق (با نیروگاه های برقابی) است. علم هیدرولوژی با توجه به گستردگی آن، که ناشی از چرخش آب در محیط های اتمسفر، سطح زمین، زیرزمین و نیز اندرکنش های کمی و کیفی آب با محیط است، به زیر شاخه های زیر تقسیم می شود که عبارتند از علوم آب و هوا (Hydrometeorology)، دریاچه (Limnology)، اقیانوس (Oceanography) یخ و برف (Cryology)، رودخانه (Potamology)، آب های زیرزمینی(Hydrogeology)، هیدروگرافی (Hydrography)، هیدرومتری (Hydrometry) و کیفیت آب (Water Quality). با پیشرفت سریع این علم، هر روز بر این زیرشاخه ها افزوده می شود. از آنجا که کاربرد این علم بیشتر در مسائل مهندسی نظیر کشاورزی، عمران، محیط زیست، مکانیک، شیمی و زمین شناسی است، لذا از واژه هیدرولوژی مهندسی (Engineering hydrology) به جای هیدرولوژی کاربردی (Applied hydrology) نیز استفاده می شود.

فرآیند گردش آب در طبیعت بسیار پیچیده است و عوامل بسیار متعددی (شامل زمانی و مکانی) در کمیت و کیفیت آن موثرند. در کاربردهای مربوط به طراحی های هیدرولوژیکی، بررسی و تعیین پارامترهای هیدرولوژیکی موثر عملا کار بسیار مشکلی است. ولی با ساده سازی و قبول میزان خطای معقول می توان به تخمین این پارامترها دست یافت. بسیاری از مدل های هیدرولوژی، که معرف شماتیک از حوضه آبریز واقعی در طبیعت است، با روش های استوکستیک (Stochastic) {در مقایسه با روش های جبری (Deterministic)} تحلیل می شوند. در تعریف یک مدل

استوکستیک، همواره از مفهوم احتمالاتی استفاده می شود. از طرف دیگر، مدل های جبری در هیدرولوژی به سه دسته مدل های تجربی (Empirical)، مدل های مفهومی (Conceptual) {که خود نیز از دو نوع یکجا (Lumped) و توزیعی (Distributed) تشکیل می شوند}، و مدل های فیزیکی (Physically) تقسیم می شود. ۱- مدل های تجربی بر اساس داده های مشاهداتی ورودی و خروجی تعریف می شوند. ۲- مدل های فیزیکی مبتنی بر شناخت کامل از نوع فرآیند هیدرولوژیکی در آن ها است. ۳- مدل های مفهومی دارای منطق تحلیلی بوده که نه از دسته اول (بدون نیاز به اطلاعاتی از حوضه آبریز) و نه از دسته دوم (با نیاز به اطلاعات زیاد از حوضه آبریز) هستند. توضیح در مورد دسته سوم مدل ها اینکه، فقط با شناخت بعضی از ویژگی های فیزیکی حوضه آبریز مانند مساحت، نوع و پوشش خاک قابل تحلیل اند. با پیشرفت علم هیدرولوژی، به تبع پیشرفت های علوم نرم افزاری و سخت افزاری و نیز گسترش مفاهیم ریاضی در این علم، امروزه کاربرد مدل های مفهومی در هیدرولوژی بسیار متداول شده است. ولی به هر حال، استفاده از این مدل ها بدون شناخت کافی از عوامل و پارامترهای هیدرولوژیکی و نوع فرآیندهای مرتبط با آن ها خالی از اشکال نیست. لذا، در استفاده از این دسته مدل ها بایستی شناخت کافی از مفاهیم اولیه هیدرولوژی در اولویت (نسبت به کاربرد مدل های موجود) قرار گرفته سپس اقدام به استفاده از این مدل ها نمود.

۱-۲ گردش آب در طبیعت

گردش آب در طبیعت یا چرخه هیدرولوژیکی (Hydrologic cycle) به کلیه مراحل حرکت، تغییر شکل، تغییر وضعیت، تغذیه، تلفات و ذخیره آب بر روی کره زمین، زیر زمین و آتمسفر اطراف آن گفته می شود که هیدروسفر (Hydrosphere) نام دارد. هیدروسفر خود از دو لایه آتمسفر (Atmosphere) و لیتوسفر (Lithosphere)، یا پوشش جامد سطحی زمین، تشکیل می شود. آب موجود بر روی سطح و داخل پوسته سطحی زمین به صورت جریانات سطحی نظیر رودخانه ها، دریاچه ها بوده و در داخل پوسته به صورت آب زیرزمینی موجود است. علت عمده چرخش آب در طبیعت انرژی خورشیدی است، که سالانه بطور میانگین 13.4×10^{23} کیلوکالری به سطح زمین می رسد و باعث تبخیر آب و در فرایندی معکوس، باعث بارش از اتمسفر به زمین می شود.

گردش آب در طبیعت دارای یک سیستم بسته است. می توان اینطور تصور نمود آب از سطوح دریاها، اقیانوس ها و نیز خشکی ها تبخیر شده و وارد اتمسفر می شود. سپس در اتمسفر پس از متراکم و سرد شدن بصورت بارش به سطح زمین بازگردانده می شود. این ریزش های جوی یا روی سطح دریاها و یا اقیانوس ها بوده و یا روی سطوح خشکی زمین، به

صورت برگاب (گرفته شده توسط شاخه ها و برگ های گیاهان)، یا به صورت رواناب (جاری شده در سطح زمین،، و یا به صورت نفوذ در خاک در می آید. برگاب یا به مرور تبخیر شده (برگشت به اتمسفر) و یا در اثر تکان خوردن شاخ و برگ درختان به سطح زمین ریخته شده رواناب گشته یا نفوذ می کند. قسمتی از رواناب ها نیز ممکن است به صورت چالاب به طور موقت در سطح زمین ذخیره شده که نهایتا نفوذ کرده یا تبخیر می شوند.آب نفوذی چنانچه در لایه های سطحی خاک ذخیره شود، ممکن است تبخیر شده و دوباره به اتمسفر بازگردد و در صورت نفوذ عمقی می تواند آب های زیرزمینی را تغذیه نماید. این آب نیز می تواند با تراوش به سطح زمین (به عنوان چشمه های سطحی) یا نفوذ به رودخانه ها در سطح زمین ظاهر و یا به صورت ذخیره در منابع آب زیرزمینی باقی بمانند. قسمتی از آب نفوذ یافته می تواند جذب ریشه گیاهان شده از طریق آوندهای گیاهان (داخل ساقه و برگ) به سطوح گیاهان رسیده و تبخیر شوند. این نوع تبخیر از سطوح گیاهان را تعرق نامیده که در چرخه هیدرولوژی نیز وارد می شود. لازم به ذکر است که منظور از ریزشهای جوی از اتمسفر انواع مختلف آن بوده که شامل باران، برف، تگرگ، یخ و یخچه، مه و شبنم است.

در بررسی گردش آب در طبیعت، که در واقع بررسی کنش ها و اندرکنش های بین محیط و مولفه های هیدرولوژیکی مانند بارش(p)، تبخیر (E)، تعرق(T) ، نفوذ(I)، آبهای زیرزمینی (G) و رواناب سطحی (R) مورد توجه است، نه تنها وضعیت کمی آب (مقدار آب) بلکه کیفی آب (کیفیت آب) نیز مورد توجه است. هرچند عوامل هیدرولوژیکی محدود اند، ولی به دلیل فرایندهای اندرکنشی پیچیده آنها با محیط، بررسی چرخه آب در طبیعت امری دشوار و پیچیده است که نیاز به شناسایی، تخمین و تبیین فرایندهای اندرکنشی داخل آن دارد.

۱-۳ توازن یا بیلان آب (بیلان هیدرولوژیکی) سامانه های آبی (حوضه آبریز)

مقدار آب موجود در کره زمین محدود وثابت است، لذا سیستم هیدرولوژیک کره زمین را می توان یک سامانه بسته نامید. اما در مطالعات هیدرولوژی، معمولا سیکل جهانی آب مورد نظر نیست. یعنی، سیکل آب در مورد سامانه های محلی یا منطقه ای، به نام حوضه آبریز، مطرح است. به دلیل نیاز به برآورد دبی آب در مقاطع آبراهه ها (رودخانه ها) به منظور طراحی سازه های آبی و یا مدیریت منابع آب، چنین سامانه هایی عموما سامانه (حوضه آبریز) باز به شمار می آیند. در این سامانه ها، ذر یک گام زمانی معین Δt، بین مقدار آب های ورودی به آنها ($\sum I$) و آب های خروجی از آنها ($\sum O$) و تغییراتی که از نظر ذخیره آب در داخل آنها بوقوع می پیوندد (ΔS) رابطه ساده ای زیر برقرار است.

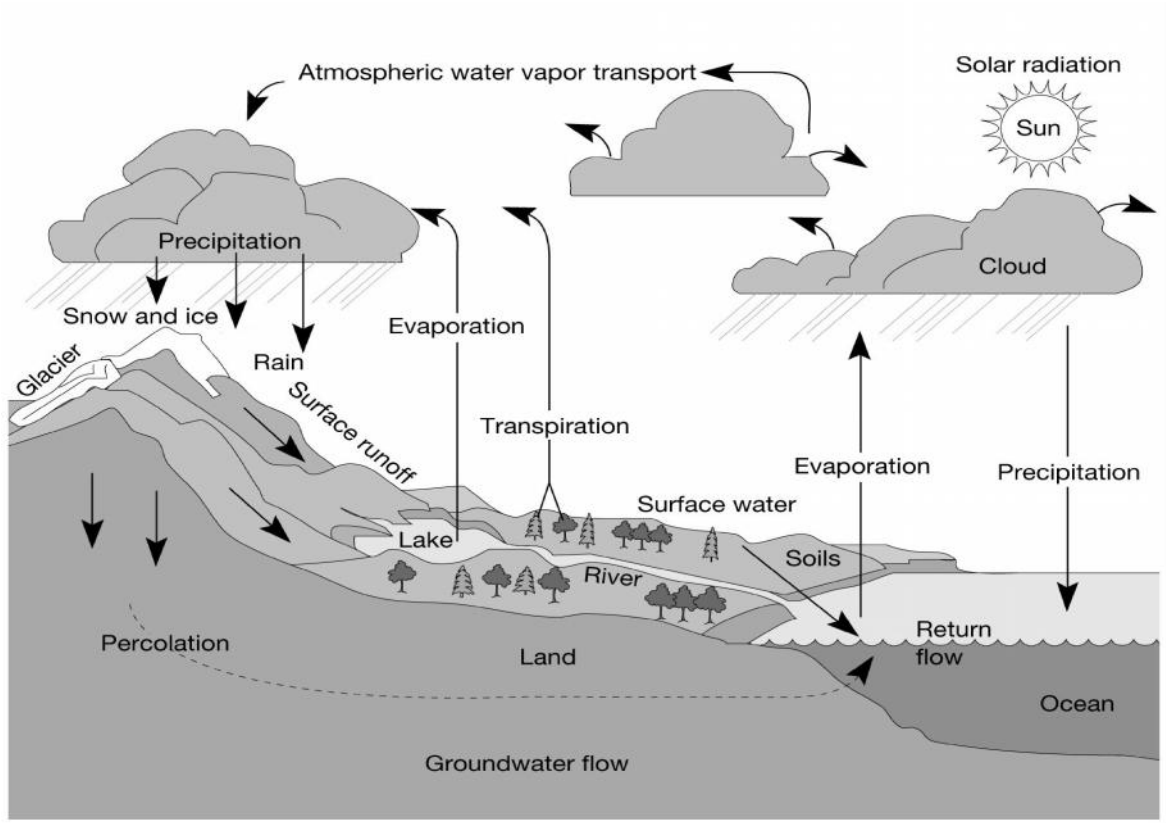
$$\sum I - \sum O = \Delta S \qquad (۱-۱)$$

یعنی تغییراتی که از نظر آب در سیستم اتفاق می افتد برابر است با تفاضل آب ورودی به سیستم و آب خروجی از سیستم. اگر در این معادله بعد زمان نیز دخالت داده شود، یعنی دخالت دادن بازه زمانی مورد نظر، رابطه به شکل ریاضی زیر در می آید.

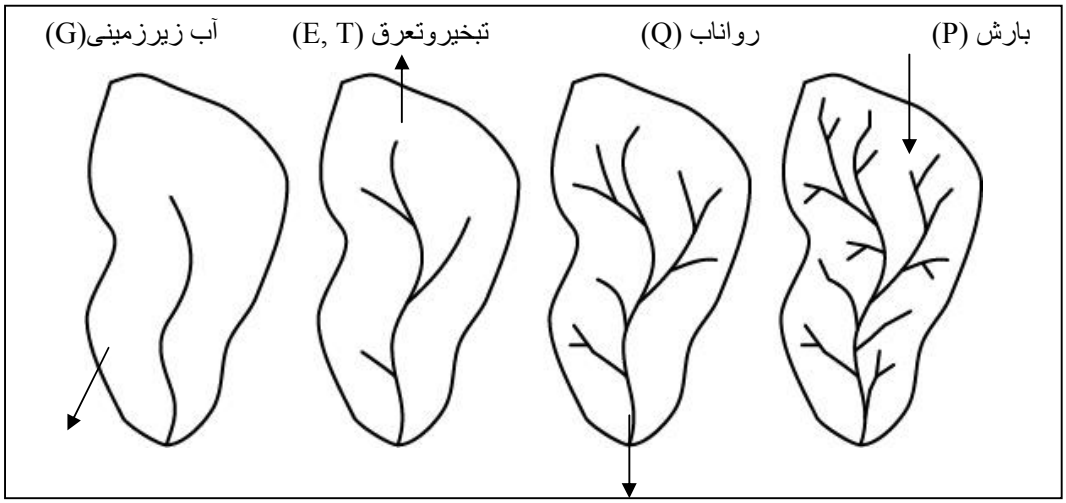
$$I - O = \frac{dS}{dt} \qquad (۲-۱)$$

که $\frac{dS}{dt}$ تغییرات ذخیره آب در سیستم (dS)نسبت به زمان (مدت) (dt) است. این معادله به نام **"معادله اساسی بیلان آب"** معروف است. این معادله ساده ترین و در عین حال مهمترین معادله در هیدرولوژی است که در محاسبات مربوط به مولفه های موازنه یا توازن آب مورد استفاده قرار می گیرد. با توجه به وضعیت سیستم حوضه آبریز، هر یک از اجزای معادله بالا می تواند از چندین بخش تشکیل شود. مثلا اگر به حوضه آبریز شکل ۱-۱ توجه شود و هدف تبیین معادله ۱-۱ در مورد آن باشد، با ترسیم شماتیک آن به صورت شکل ۱-۲ می توان رابطه ای به صورت زیر نوشت.

$$P - R - G - E - T = \Delta S \qquad (۳-۱)$$



شکل ۱-۱ سامانه یک حوضه آبریز همراه با اغلب مولفه های آبی (هیدرولژیک) موثر بر آن. مولفه های قابل مشاهده (پیکان ها) عبارت است از بارش (شامل برف)، تبخیر، تعرق، نفوذ، رواناب سطحی (دامنه ای و بین لایه ای) و آب زیرزمینی



شکل ۱-۲ شکل شماتیک حوضه آبریز (از ساده به پیچیده از نظر شبکه آبراهه) همراه با مولفه های آبی مورد نظر

به این ترتیب، مقدار تغییر ذخیره آب در حوضه آبریز (ΔS) عبارت است از تفاضل بین ورودی بارش (P) و جمع خروجی هایی مانند رواناب سطحی(R)، جریان آبی که بطور زیرزمینی خارج می شود (G)، تبخیر از سطح حوضه آبریز (E) و تعرق از خاک حوضه آبریز (T). مقدار تبخیر (E) و تعرق (T) معمولا بصورت یکجا تخمین زده می شود که با علامت ET در معادلات ظاهر می شود. با این توضیح، شکل دیگر معادله موازنه (بیلان) آبی حوضه آبریز به صورت زیر در می آید.

$$P - R - G - ET = \Delta S \qquad (۴-۱)$$

مثال ۱-۱: در یک حوضه آبریز با مساحت ۲۵۰۰ km^2، میانگین سالانه بارش ۱۳۰۰ mm و متوسط جریان خروجی از حوضه در طول سال ۳۰ متر مکعب در ثانیه اندازه گیری شده است. حساب کنید مقدار تلفات آبی را که به صورت تبخیر- تعرق و نفوذ عمقی از دسترس خارج می شود. مقدار رواناب سطحی که به رودخانه این حوضه وارد می شود چند سانتی متر است؟ ضریب رواناب (درصدی از بارش سالانه که به رواناب سطحی تبدیل می شود) چقدر است؟

حل: اگر فرض کنیم که تغییرات ذخیره آب در داخل حوضه از سالی به سال دیگر صفر باشد در این صورت $\Delta S=0$ است، لذا معادله ۱-۴ عبارت خواهد بود از:

$$P - R - G - ET = \Delta S = 0, \quad ET + G = P - R$$

$$ET + G = (130cm) - \frac{(30\frac{m^s}{sec})(86.400\frac{sec}{day})(365\frac{day}{yr})(100\frac{cm}{m})}{(2500km^2)(1000\frac{m}{km})^2} = 130cm - 37.9cm = 92.1cm$$

بدین ترتیب مقدار تلفات آب در حوضه در اثر تبخیر- تعرق و نفوذ عمقی 92.1cm و ارتفاع رواناب (باقیمانده بارش) ۳۷.۹ سانتی متر $(130-92.1=37.9)$ است. ضریب رواناب، یعنی نسبت مقدار میانگین رواناب سالانه به مقدار میانگین بارش سالانه، عبارت است از:

$$R/P=(37.9\text{ cm})/(130\text{ cm})=0.29=29\%$$

توجه: ضریب رواناب ۲۹٪ یعنی در هر بارش ۲۹ درصد آن به رواناب تبدیل شده و در دسترس قرار می گیرد.

مثال ۱-۲: مقدار بارش قابل انتظار طی دو ماه از سال در یک حوضه آبریز به مساحت ۶۵ کیلومترمربع، واقع در بالا دست یک سد مخزنی، ۲۵۴ میلیمتر پیش بینی شده است. پیش بینی می شود ۸۵ میلیمتر آن صرف تبخیر–تعرق، ۲۰ میلیمتر با نفوذ در داخل خاک ذخیره شده و بقیه جاری و وارد مخزن شود. مقدار رواناب چند متر مکعب و یا چند لیتر خواهد بود؟ اگر مصرف سرانه هر نفر برای شرب و بهداشت در روز ۱۶۰ لیتر آب باشد با این مقدار رواناب نیاز آبی چند نفر به مدت ۲ ماه تامین خواهد شد.

حل:

$$P-R-ET=\Delta S,\quad R=P-ET-\Delta S=254-85-20=149\text{ mm}$$

$$R=\left[\frac{149\text{ mm}}{1000\dfrac{\text{mm}}{\text{m}}}\right](65\text{ km}^2)\left(10^6\frac{\text{m}^2}{\text{km}^2}\right)=9.685(10^6)\text{ m}^3=9.685(10^9)\text{ lit}$$

مصرف آب توسط هر نفر در دوماه برابر است با ۲×۳۰×۱۶۰ لیتر. لذا تعداد افرادی که نیاز آنها طی این مدت تأمین خواهد شد برابر است با:

$$N=\frac{9.685\left(10^9\right)}{160\times30\times2}=1,008,854$$

مثال ۱-۳: دریاچه یک سد بطور متوسط ۱۵۰۰ هکتار وسعت دارد اگر مقدار تبخیر سالانه از سطح این دریاچه ۲۴۰ سانتی متر باشد هر روز چند هکتار-متر آب از سطح این دریاچه تبخیر می شود.

حل:

حجم آب تبخیر شده $=1500(240)=360000\text{ ha.cm}=3600\text{ ha.m}$

متوسط تبخیر روزانه $=3600/365=9.863\text{ ha.m}$

۱- ۴ کلیات اقلیم و بیلان آب ایران

متوسط بارش سالانه در ایران برابر حدود یک سوم میزان متوسط سالانه جهانی آن است. توزیع مکانی این بارش مبین این است که ۲۸ درصد از سطح کشور دارای مقدار بارش متوسط سالانه کمتر از ۱۰۰ میلی متر است. از طرف دیگر، مقدار بارش متوسط در۹۶ درصد از سطح کشور دارای ۲۰۰ میلی متر و کمتر نیز می باشد. با تعریف پذیرفته شده جهانی، به این ترتیب ایران در اقلیم خشک قرار می گیرد. از ویژگی های دیگر ایران (علاوه بر کمی بارش)، بالا بودن نسبی مقدار تبخیر و تعرق (پتانسیل) در آن است. با استفاده از معادله توازن آب، می توان به محدودیت دسترسی به آب پی برآورد. موضوع ریزش فصلی این بارش (توزیع زمانی) علاوه بر پراکندگی نامنظم آن (توزیع مکانی)، نیز موضوع قابل توجه است.

در زیر مقادیر تقریبی بارش، تبخیروتعرق (پتانسیل) و رواناب سالانه در ایران در مقایسه با جهان نشان داده شده است.

مولفه توازن آب	ایران	جهان
بارش (میلیمتر) P	242	860
تبخیر و تعرق پتانسیل (میلیمتر)	900	1130
تبخیر و تعرق واقعی (میلیمتر) ET	172	485
رواناب یا آب قابل استحصال (میلیمتر) Q	P-ET=242-172=70	P-ET=860-485=375

مطابق مقادیر اندازه گیری شده (آمار) توسط وزارت نیرو، میانگین حجم بارش سالانه در ایران حدود ۴۰۰ میلیارد متر مکعب برآورد می شود. از این میزان، حدود ۳۱۰ میلیارد متر مکعب درسطح ۸۷۰ هزار کیلومتر مربع روی حوضه های آبریز کوهستانی و۹۰ میلیار متر مکعب در سطح ۷۷۸کیلومتر مربع روی حوضه های آبریز دشتی می باشد. با تبخیر و تعرق متوسط سالانه از حوضه های آبریز کوهستانی حدود ۲۰۰ میلیارد متر مکعب و از حوضه های آبریز دشتی حدود ۸۴ میلیارد متر مکعب آب از دسترس خارج می شود که جمعا ۷۱ درصد از حجم بارش سالانه را شامل می شود. از حجم باقیمانده ۵۹ میلیارد متر مکعب در حوضه های آبریز کوهستانی و ۲ میلیارد متر مکعب در حوضه های آبریز دشتی نفوذ عمقی کرده رواناب زیرزمینی را تشکیل می دهد. بقیه حجم آب، یعنی ۵۱ میلیارد متر مکعب در حوضه های آبریز کوهستانی و ۴ میلیارد متر مکعب در حوضه های آبریز دشتی به شکل رواناب سطحی ظاهر می شود. از نظر مصارف سالانه آب در کشور، حدود ۸۰ درصد در بخش کشاورزی، ۱۵ درصد در بخش آب شرب و حدود ۵ درصد در بخش صنعت برآورد شده است.

فصل دوم: حوضه‌های آبریز و خصوصیات آنها

در طراحی هیدرولوژیکی همواره عواملی وجود دارند که وابسته به موقعیت و مکان طرح هستند، یعنی خصوصیات منطقه به لحاظ کاربری اراضی، شیب، پوشش گیاهی، وجود ذخیرهٔ آب، نوع رودخانه و نهایتاً موقعیت نقطهٔ تخلیهٔ آب سطحی می‌تواند به طور مستقیم در طرح تأثیرگذار باشد. این مسأله به ویژه در زمینهٔ مستحدثاتی که به طور مستقیم از رواناب سطحی متأثرند، نظیر سدها، سازه‌های کنترلی، سازه های انحرافی، تونل‌های انتقال آب، عملیات آبخیزداری و سازه‌های جلوگیری کننده از فرسایش‌های آبی حائز اهمیت است.

حوضهٔ آبریز به محدوده ای اطلاق می‌شود که رواناب حاصل از بارش روی آن به طور طبیعی به یک نقطه ختم شود. اگر این نقطه بر روی مرز حوضهٔ آبریز باشد آن را حوضهٔ آبریز برون‌ریز و اگر در داخل حوضه باشد آن را حوضهٔ آبریز درون‌ریز گویند. خصوصیات حوضه‌های آبریز از جمله مساحت، شکل، طول آبراهه اصلی، خصوصیات هندسی، شیب متوسط، نوع خاک و پوشش گیاهی، زمان تمرکز و کاربری اراضی که در میزان رواناب حوضه و به طور کلی طراحی هیدرولوژیکی به طور مستقیم مؤثرند در این فصل به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۱ حوضه آبریز

حوضهٔ آبریز (Watershed/Catchment) یک واژه هیدرولوژیکی است که در آن مفهوم نسبی بودن نهفته است و لذا در هنگام تعریف آن باید نقطهٔ خروج آب (Outlet) از آن مشخص باشد. براساس تعریف حوضهٔ آبریز شامل مساحتی از منطقهٔ بالادست نقطهٔ خروجی است که آب باران آن به این نقطه تخلیه می‌شود. از این رو حوضهٔ آبریز می‌تواند در مقیاس کوچک بر روی شاخه‌های یک رودخانه اصلی که به آن زیرحوضهٔ آبریز (Sub-watershed/Sub-catchment) گفته می‌شود تعریف و یا در مقیاس بزرگ براساس نقطهٔ تخلیه رودخانه به دریا یا دریاچه‌ها و یا منابع آبی بزرگ نظیر خورها و یا باتلاق‌ها به عنوان حوضهٔ آبریز اصلی تعریف شود.

در شکل ۲-۱ مفهوم حوضه آبریز در مقیاس کوچک برای نقطهٔ B که بر روی شاخه یک رودخانه تعریف شده و همچنین مفهوم حوضهٔ آبریز بزرگ یا اصلی، که برای رودخانهٔ اصلی و نقطهٔ خروجی A تعریف شده نشان داده شده است.

به هر جهت برای تعیین مرز حوضهٔ آبریز نسبت به نقطهٔ خروج آب از آن بایستی مرتفع‌ترین نقاط منطقه مشرف به آبراهه اصلی حوضه آبریز را به یکدیگر متصل تا به نقطهٔ خروجی برسیم، بدین مفهوم آب باریده در خط الرأس ها به دو سوی نقاط گود حرکت کرده و بخشی از آن که مربوط به حوضهٔ مورد نظر است به سمت نقطهٔ خروجی حوضه حرکت و از آن