

بسم الله الرحمن الرحيم

## پیشگفتار

ایران سرزمینی است خشک با نزولات جوی بسیار کم، بطوریکه اگر میانگین بارندگی سالانه در سطح خشکی‌های کره زمین را که حدود ۸۶۰ میلی‌متر تخمین زده می‌شود با متوسط بارندگی سالانه در ایران، که تقریباً رقمی معادل ۲۵۰ میلی‌متر است مقایسه کنیم، ملاحظه خواهد شد که بارندگی در ایران حتی کمتر از یک سوم متوسط بارندگی در سطح دنیاست. علاوه بر این زمان ریزش نزولات جوی و محل ریزش آنها نیز با نیاز بخش کشاورزی، که مصرف‌کننده اصلی آب در کشور می‌باشد، مطابقت ندارد. اکثر شهرهای ایران هم در مناطقی واقعند که به رودخانه‌هایی که جریان آب آنها مستقیماً از رواناب حاصله از بارندگی‌ها تامین شده باشد دسترسی ندارند. بنابراین باید پذیرفت که خشکی در ایران یک واقعیت اقلیمی است و این ما هستیم که باید خود را با آن سازگاری دهیم. برای زیستن در خشکی چاره کار شناخت اقلیم و سازگاری با آن است نه مقابله با آن. البته با تمام خسارت‌هایی که از کم‌آبی و خشکسالی‌ها عاید کشور می‌شود هنوز هم براساس معیارهای موجود ایران جزء کشورهای کم آب دنیا قلمداد نمی‌شود.

معیاری که برای پرآبی یا کم آبی یک کشور بکار برده می‌شود سرانه آب قابل تجدید در آن کشور است. در حال حاضر با توجه به جمعیت جهان مقدار آب تجدید شونده دنیا حدود ۶،۵۰۰ مترمکعب در سال برای هر نفر است. اما این مقدار بطور یکنواخت تقسیم نشده است. بطوریکه در بعضی مناطق دنیا مقدار آن زیاد و در برخی جاها بسیار کم می‌باشد. متخصصان برنامه ریزی آستانه ۱،۰۰۰ مترمکعب در سال برای هر نفر را مرز کم آبی برای هر کشور تعیین کرده‌اند. مثلاً این رقم در مصر ۳۰، در قطر ۴۰، در لیبی ۱۶۰ و در عربستان سعودی ۱۴۰ مترمکعب در سال برای هر نفر می‌باشد که تمام آنها جزء کشورهای کم آب جهان محسوب می‌شوند. در ایران، با در نظر گرفتن جمعیت کنونی کشور، مقدار سرانه آب تجدید شونده حدود ۱۶۷۰ مترمکعب در سال تخمین زده می‌شود که با این حساب نمی‌توان آن را یک کشور کم آب تلقی کرد و بهتر است در حال حاضر آن را جزء کشورهای با تنش آبی در نظر بگیریم. اما توزیع آب در مناطق جغرافیائی کشور نامناسب است. بطوریکه در مقیاس کوچکتر قسمت اعظم مناطق آن کویری، خشک و کم آب می‌باشد. بخصوص این که جمعیت ایران با نرخ نسبتاً زیادی در حال رشد است و دیر یا زود ایران نیز در ردیف کشورهای کم آب دنیا قرار خواهد گرفت. با روند کنونی رشد جمعیت و مصرف آب پیش‌بینی می‌شود در سال ۱۴۰۰ سرانه آب قابل تجدید کشور به کمتر از ۱۲۵۰ متر مکعب در سال برسد که در این

صورت با مشکلات زیادی مواجه خواهیم بود. یکی از راههای سازگاری با کم‌آبی استفاده بهینه از منابع آب و افزایش بهره‌وری آب است. باید سعی کرد تا حد ممکن از نزولات جوی، جریان آبهای سطحی و منابع زیرزمینی، و رطوبت خاک به نحو مطلوب و بهینه استفاده شود اما این کار عملی نخواهد بود مگر با شناخت پدیده‌های هیدرولوژیکی مرتبط با آنها.

کمبود آب که مردم ایران از قدیم‌الایام با آن مواجه بوده‌اند، چنان پیچیدگیهای فنی، فرهنگی و اقتصادی-اجتماعی بوجود آورده است که حتی استفاده علمی از این منابع را تحت الشعاع قرار داده است. به عنوان مثال در سیستم قناتها و یا حقایبه رودخانه‌ها و چاه‌ها مسائل بسیار مهم فنی اجتماعی وجود دارد که به سادگی نمی‌توان طرح‌های آبی را در حوضه آبریز یک رودخانه اجرا کرد. لذا قبل از هر تصمیم‌گیری باید ابعاد اینگونه مسائل از نظر هیدرولوژیکی شناخته شود. علاوه بر این مسائل اقلیمی ایجاب می‌کنند تا در کاربرد قوانین هیدرولوژی رعایت احتیاط به عمل آید. بنابراین در استفاده مفید از آب علاوه بر موضوعات هیدرولوژیک باید به مسائل فرهنگی، اجتماعی و اقتصادی نیز توجه شود و به یاد داشته باشیم که در مناطق خشک، آب از قدیم‌الایام اساس شکل‌گیری قبایل، روستاها و حتی حکومت‌های محلی بوده و مقوله‌ای نیست که بتوان بدون مطالعه با آن رفتار کرد.

با تمام اهمیتی که آب در اقتصاد ایران دارد و خرابی‌هایی که هر سال از سیلابها به بار می‌آید و آب‌های که بلااستفاده از کشور خارج و یا به کویرها سرازیر می‌شود هنوز هیدرولوژی برای مهندسان ما آنطور که باید و شاید شناخته شده نیست. حتی تا همین سالهای اخیر در مجموعه دروس دانشجویان رشته‌های مهندسی عمران، آبیاری و یا کشاورزی درس‌هایی مانند هیدرولوژی آبهای سطحی و زیرزمینی جایگاهی نداشت و یا با وجودی که مثلاً قنات و بهره‌برداری از آبهای زیرزمینی از فناوری‌های ایرانیان است، در مجموعه دروس دانشگاهی درسی با عنوان قنات‌سازی و قنات‌داری وجود ندارد. گرچه در چند سال گذشته تا حدی به مسأله آب و بهره‌وری آن اهمیت داده شده است، ولی این نباید بدان معنی باشد که بدون شناخت خصوصیات هیدرولوژیکی حوضه‌ها اقدام به اجرای طرح‌های آبی کرد. در این رابطه باید توجه داشت که آب و چرخش آن در طبیعت جزئی از سیستم محیط زیست است و هرگونه رفتار با آن باید براساس اصول بوم‌شناسی باشد.

سهم آب در ایران با توجه به وضعیت اقلیمی کشور ثابت است و بر اساس شواهد علمی دنبال کردن روش‌های تولید آب جدید، مانند بارورسازی ابرها یا شیرین‌کردن آبهای شور در مقیاس کلان مقرون بصره و شاید عملی نباشد لذا راه حل اساسی، زیستن در کم‌آبی همراه اب مدیریت منابع آب است. تلاش در تغییر موضعی سیکل هیدرولوژی و جابجایی بین حوضه‌ای آب هم ممکن است بازخورهایی در برداشته باشد که ترمیم آن امکان‌پذیر نباشد. زیرا آب در طبیعت وظایف متعدد محیطی بر عهده دارد که استفاده انسان نباید این وظایف را بطور کامل مختل نماید. بنابراین تنها با شناخت قوانین هیدرولوژی و زیست محیطی و کاربرد

صحیح آنها در طرحهای آبی است که می توان انتظار داشت از منابع آب بصورت پایدار استفاده شود. عدم رعایت این قوانین مسائلی از قبیل پر شدن مخازن سدها از رسوب، شور شدن و یا باتلاقی شدن اراضی، کم شدن جریان آب برای ذخیره در مخازن خشک شدن چاهها و قنوت و یا خراب شدن تأسیسات در اثر طغیانها را به دنبال خواهد داشت که بعضاً در چند ساله اخیر در کشور شاهد آنها بوده ایم.

امروزه در سطح دنیا نمونه های زیادی از طرحهای آبی وجود دارد که تغییر چرخه طبیعی آب در آنها در دراز مدت نتیجه معکوس بیار آورده است. از بارزترین این طرحها می توان احداث کانال قره قوم در ترکمنستان را نام برد که جریان بسیار زیاد آن از انحراف آب رودخانه سیحون (آمو - دریا) تأمین می شود. کانال قره قوم گرچه در کوتاه مدت در تولید پنبه و دیگر محصولات کشاورزی ترکمنستان مؤثر بوده است اما بنظر دانشمندان علم محیط زیست در مرگ دریاچه آرال نیز نقش بسزائی داشته است.

علم هیدرولوژی در سالهای آتی از اهمیت بیشتری برخوردار خواهد بود. زیرا با تجمع گازهای گلخانه ای در اتمسفر و گرم شدن هوای کره زمین پدیده های هیدرولوژیکی دچار ناهنجاری خواهند شد. بطوری که ممکن است نتوانیم بر تجزیه و تحلیل های آماری داده های گذشته ایستگاههای هواشناسی و هیدرولوژی اعتماد کنیم. ما در سالهای اخیر شاهد بی نظمی های زیاد در روند بارندگی و سیلاب و بطور کلی تغییرات آب و هوایی در برخی نقاط جهان بوده ایم. بنابراین مهندسان و کارشناسان برای برخورد با چنین پدیده های اقلیمی باید از بهره علمی کافی برخوردار باشند و بردانش هیدرولوژی خود بیفزایند. لازم است مهندسان و کارشناسان ما با علم هیدرولوژی آنطور که باید و شاید، آشنایی پیدا کنند و آن را در رابطه با کارهای مهندسی فراگیرند. برای این منظور احساس می شود وجود نوشته های علمی، که بتواند نیاز آنان را فراهم آورد، ضروری است. بخصوص که استفاده از کتب و نشریات خارجی برای همه خوانندگان فارسی زبان امکان پذیر نمی باشد.

هدف از نوشتن این کتاب، که چاپ اول آن در سال ۱۳۶۷ منتشر گردید، آن بود تا مطالب درسی مورد نیاز دانشجویان رشته های مهندسی عمران، آبیاری، زمین شناسی، جغرافیا و دیگر کسانی که درسهای را در زمینه هیدرولوژی می گذرانند بصورت مدون ارائه شده باشد. علاوه بر این تصور می شد این مجموعه بتواند نیاز طراحان را در طرح های کوچک آبی و آبخیزداری برطرف نماید. خوشبختانه از هنگام چاپ اول تاکنون کتابهای دیگری نیز در زمینه هیدرولوژی به فارسی ترجمه یا تألیف شده اند که هرکدام به سهم خود در بالا بردن سطح دانش علاقمندان مؤثر بوده اند. باید توجه کرد که علم هیدرولوژی تنها به همین مختصر محدود نمی شود و در این کتاب تنها سعی شده است اصول کلی آن که در مسائل روزمره کاربرد دارند - آنهم به زبانی ساده - مورد بررسی قرار گیرد. بطور یقین علاقمندان و کسانی که بخواهند در موضوعات وابسته و جنبه های تخصصی این علم آگاهی کسب کنند می بایست به سراغ منابع و



مأخذ علمی دیگر که پاره‌ای از آنها در انتهای هر فصل ذکر شده است بروند. کتاب حاضر براساس تجارب عملی و آموزشی مؤلف تدوین شده و سعی بر این بوده است تا جنبه‌های کاربردی مطالب مورد تأکید بیشتری قرار گیرند. با این وجود در اکثر موارد از شکلها و مثالهای مندرج در سایر کتابهای درسی هیدرولوژی که عمدتاً به زبان انگلیسی بوده‌اند استفاده شده است. که لیست مأخذی که مطلب، نمودار و یا جداول از آنها اخذ شده است در انتهای هر فصل ذکر گردیده است.

شاید در حال حاضر انجام محاسبات هیدرولوژیکی بدون استفاده از کامپیوتر امری بسیار مشکل باشد. به همین منظور در بخشهای مختلف کتاب به برنامه‌های کامپیوتری خاصی نیاز می‌باشد تا با اجرای آن بتوان مسائل مختلف را سریعتر و با دقت بیشتر حل کرد. از آنجایی که ارائه آنها در این کتاب حجم وسیعی را در بر می‌گرفت. لذا دانشجویان و افرادی که تمایل به داشتن این برنامه‌ها دارند می‌توانند با ناشر کتاب (دانشگاه امام رضا (ع) در مشهد) و یا مؤلف مکاتبه نمایند تا در اختیارشان قرار داده شود. کسانی که دسترسی به اینترنت دارند نیز می‌توانند با مراجعه به سایت <http://www.hydrology.i8.com> برنامه‌های مورد نظر را دریافت (download) نمایند.

هر چند چاپهای گذشته کتاب با استقبال فراوان روبرو بوده است و تاکنون ۲۳ بار تجدید چاپ و ۷ مرتبه مورد تجدید نظر قرار گرفته است اما باز هم طی این مدت نظرات و راهنمایی‌های زیادی توسط دانشجویان عزیز و دیگر خوانندگان محترم ارائه شده بود که می‌بایست مد نظر قرار گیرد. حال که فرصت مناسبی دست داده است تا بتوانم در چاپ بیست و چهارم آن را مجدداً مورد تجدید نظر قرار دهم، لازم می‌دانم از تمام این عزیزان سپاسگزاری کنم. امید است در آینده نیز از تذکرات خود اینجانب را بی‌نصیب نگردانند.

همیشه بر این عقیده بوده‌ام که اگر کسی بخواهد مطلبی را خوب بیاموزد بهترین وسیله معلمی و آموزش دادن آن مطلب به دیگران است. زیرا با آموزش به دیگران می‌توان آن مطلب را بخوبی آموخت. لذا اندک بضاعت علمی خود در هیدرولوژی را مدیون تمام دانشجویانی می‌دانم که به آنها درس هیدرولوژی داده‌ام و این کتاب را به همه آن عزیزان تقدیم می‌کنم. در خاتمه لازم می‌دانم از مسئولان دانشگاه امام رضا (ع) برای موافقت با چاپ مجدد کتاب و نیز همکاری کارکنان مؤسسه جم کامپیوتر برای انجام امور حروف‌چینی و صفحه‌آرایی کتاب سپاسگزاری نمایم.

دکتر امین علیزاده

استاد دانشگاه فردوسی مشهد

۱۳۸۷

## مقدمه

تعاریف	هیدرولوژی در کانال‌های مهندسی
چرخه هیدرولوژی	پیشرفت‌های رایانه‌ای
موجودیت آب در کره زمین	پایگاه‌های داده‌ها و اطلاعات
توازن هیدرولوژیکی	واحدهای اندازه‌گیری در هیدرولوژی
بیان آب در ایران	مسائل
تاریخچه علم هیدرولوژی	منابع برای مطالعه بیشتر

## ۱-۱ تعاریف

هیدرولوژی (hydrology) که بعضاً به آن آب‌شناسی هم گفته می‌شود به معنای وسیع کلمه علم چگونگی آب است. یعنی، علمی که در مورد پیدایش، خصوصیات و نحوه توزیع آب در طبیعت بحث می‌کند. اما عملاً واژه هیدرولوژی به شاخه‌ای از جغرافیای فیزیکی اطلاق می‌شود که گردش آب در طبیعت را مورد بررسی قرار می‌دهد. براساس تعریفی که انجمن دولتی علوم و فناوری آمریکا برگزیده است هیدرولوژی علم مطالعه آب در کره زمین است و در مورد پیدایش، چرخش و توزیع آب در طبیعت، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب، واکنشهای آب در محیط و ارتباط آن با موجودات زنده بحث می‌کند. بنابراین ملاحظه می‌شود که در واقع هیدرولوژی در برگیرنده تمامی داستان آب در طبیعت می‌باشد. امروزه برحسب استفاده انسان و با توجه به گستردگی موضوع، مسائل مربوط به آب در زیر شاخه‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد که از جمله می‌توان رشته‌های علمی زیر را نام برد:

هیدرومتئورولوژی (hydrometeorology) یا آب - هواشناسی کاربرد هواشناسی را در مسائل هیدرولوژی مورد بررسی قرار می‌دهد. به عبارت دیگر هیدرومتئورولوژی را می‌توان علمی دانست که در باره مسائل مشترک بین هواشناسی و هیدرولوژی بحث می‌کند. بعضی هیدرومتئورولوژی را بخشی از علم هیدرولوژی دانسته‌اند که فرایندهای آن در بالای سطح زمین یعنی در اتمسفر اتفاق می‌افتد.

لیمنولوژی علم مطالعه آبهای داخل خشکی (دریاچه‌ها، برکه‌ها و ...) را لیمنولوژی

(limnology) گویند. در این علم خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و دیگر توده‌های آب موجود در داخل خشکیها مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بنابراین مطالعه فرایندهایی که در مخازن آب پشت سدها اتفاق می‌افتد و یا مطالعه دریاچه‌ها حتی دریاچه‌های بزرگی مانند دریای خزر نیز در محدوده علم لیمنولوژی قرار دارند.

**کرایولوژی** یخ‌شناسی یا کرایولوژی (cryology) علمی است که در آن خصوصیات مختلف آب در حالت جامد (برف و یخ) بررسی می‌شود. به زبان دیگر کرایولوژی علم یخ‌شناسی و بررسی یخچالهاست. هرچند یخچال‌شناسی (glaciology) امروزه خود شاخه علمی جداگانه را تشکیل می‌دهد اما می‌توان آن را نیز زیرشاخه‌ای از علم کرایولوژی بحساب آورد.

**ژئوهیدرولوژی** علم ژئوهیدرولوژی (geohydrology) در اصل به معنی هیدرولوژی آبهای زیرزمینی یا علم مطالعه آب در زیر زمین است که در طرف دیگر آن علم مطالعه آب در سطح زمین که هیدرولوژی آبهای سطحی باشد، قرار دارد. غالباً مشاهده می‌شود که دو واژه ژئوهیدرولوژی و هیدروژئولوژی اشتباه بکار برده می‌شوند اما باید دانست که از نظر معنی در ژئوهیدرولوژی تأکید بر هیدرولوژی است و مفهوم آن هیدرولوژی در زیر زمین است. اما در هیدروژئولوژی تأکید بر زمین‌شناسی بوده و معنی آن مطالعه وضع زمین در زیر آب می‌باشد. هرچند در فارسی برای مطالعه آب در زیر زمین از واژه هیدروژئولوژی استفاده می‌شود ولی باید دانست که اصطلاح صحیح آن ژئوهیدرولوژی است. چون در فارسی واژه هیدروژئولوژی به معنی مطالعه آبهای زیرزمینی پذیرفته شده است در این کتاب نیز بر همین روال از آن استفاده خواهد شد.

**پوتامولوژی** رودخانه‌شناسی یا پوتامولوژی (potamology) مسائل مربوط به جریان آب در رودخانه‌ها را مورد مطالعه قرار می‌دهد. در این رابطه بیشتر تأکید بر جنبه‌های فیزیکی موضوع است تا بیولوژیکی آن.

**هیدروگرافی** علم مطالعه وضعیت و خصوصیات فیزیکی آب بخصوص در رابطه با مسائل کشتیرانی را هیدروگرافی (hydrography) گویند. مطالعه جزر و مد در دریاهای آزاد و نوسانات سطح آب و موج‌شناسی نیز در قلمرو این علم قرار دارد.

**هیدرومتری** هیدرومتری (hydrometry) که به آن آب‌سنجی نیز گفته می‌شود علم اندازه‌گیری آب و مسائل مربوط به آن می‌باشد. در واقع این علم سنجش‌های مختلف تراز آب، مقدار جریان، سرعت آب و موارد مشابه آن را در بر می‌گیرد.

**اقیانوس‌سنجی** در اقیانوس‌سنجی (oceanography) خصوصیات فیزیکی، شیمیایی،



بیولوژیکی و دیگر ویژگیهای اقیانوسها و دریاهای آزاد مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این علم خود بخشی از دانش وسیع اقیانوس‌شناسی (oceanology) به شمار می‌رود.

گرچه علمی که در بالا به آنها اشاره شد هر کدام به نحوی جنبه‌های مختلف آب را در طبیعت مورد بررسی قرار می‌دهند اما به آنها هیدرولوژی گفته نمی‌شود. در واقع هیدرولوژی یک علم بین رشته‌ای است که از هواشناسی شروع شده و با عبور از جنگل، زراعت، مرتعداری، خاکشناسی، زمین‌شناسی و هیدرولیک سرانجام به اقیانوس‌شناسی ختم می‌گردد.

باید به این نکته اشاره کرد که به لحاظ کاربردی، واژه هیدرولوژی مواردی را در بر می‌گیرد که به مراتب محدودتر از معنای لغوی آن است. وقتی سخن از هیدرولوژی به میان می‌آید مفاهیمی در ذهن تداعی می‌شود که باید توسط آن بتوان مشکلات روزمره انسان را در رابطه با بهره‌برداری از منابع آب حل نمود. بنابراین هیدرولوژی یک علم محض (pure science) نبوده و جنبه‌های عملی آن بمراتب مهمتر از جنبه‌های نظری آن است. به آن قسمت از علم هیدرولوژی که بر مسائل عملی تأکید دارد، هیدرولوژی کاربردی (applied hydrology) گفته می‌شود. چون کاربرد علم هیدرولوژی بیشتر در زمینه‌های هیدرولیک، کشاورزی، مهندسی بهداشت، سدسازی و دیگر رشته‌های فنی و مهندسی است، لذا به جای هیدرولوژی کاربردی گاهی اوقات واژه هیدرولوژی مهندسی (engineering hydrology) نیز به کار برده می‌شود. از طرف دیگر به آن قسمت از کارهای فنی که در زمینه هیدرولوژی صورت می‌گیرد مهندسی هیدرولوژی گفته می‌شود. با این وجود گاهی اوقات در مطالعات هیدرولوژی تأکید بر موارد علمی است که در این صورت به آن هیدرولوژی علمی (scientific hydrology) یا هیدرولوژی محاسباتی (computational hydrology) اطلاق می‌گردد. بنابراین می‌توان گفت که هیدرولوژی به دو شاخه عمده هیدرولوژی علمی و هیدرولوژی عملی تقسیم‌بندی می‌شود که در مورد اول فقط به جنبه‌های آکادمیک هیدرولوژی پرداخته می‌شود ولی در هیدرولوژی عملی به مسائلی مانند (۱) تخمین منابع آب، (۲) مطالعه فرایندهای بارندگی، تبخیر، رواناب و روابط آنها با یکدیگر، (۳) مطالعه خصوصیات آب در طبیعت و (۴) مسائل زیست محیطی مانند خشکسالی یا سیل و امثال آن پرداخته می‌شود.

باید توجه داشت که در هیدرولوژی و حل مسائل مربوط به آن از دیگر رشته‌های علمی نیز استفاده می‌شود که از آن جمله می‌توان به کاربرد هواشناسی، مکانیک سیالات و هیدرولیک، خاکشناسی، کشاورزی، فیزیک، ریاضیات، آمار و احتمالات، زمین‌شناسی، جغرافیا، گیاه‌شناسی، جنگل‌شناسی، اقتصاد، علم کامپیوتر و جامعه‌شناسی در هیدرولوژی اشاره نمود. با توجه به اینکه در حل مسائل هیدرولوژیکی نیز معمولاً از روشهایی که در سایر علوم بکار می‌رود استفاده می‌شود، لذا بسته به اینکه تحلیل یا تفسیر داده‌های هیدرولوژی با چه روشی انجام شود، هیدرولوژی به زیر شاخه‌های دیگر مانند هیدرولوژی آماری (statistical)،



هیدرولوژی تصادفی (stochastic)، هیدرولوژی ریاضی (mathematical)، هیدرولوژی تجربی (empirical)، هیدرولوژی سیستمی (systems)، هیدرولوژی عملیاتی (operational) و یا هیدرولوژی عددی (numerical) نیز تقسیم می‌گردد.

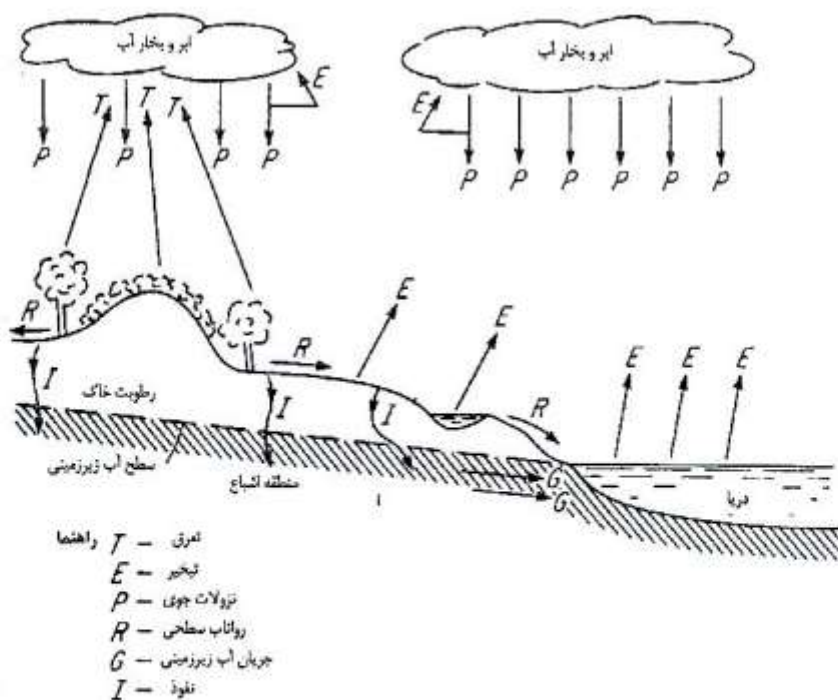
در بررسی‌های هیدرولوژیکی که شامل اندازه‌گیری و ثبت داده‌ها، تجزیه و تحلیل داده‌ها و کاربرد نتایج حاصله از آنها در حل مسائل گوناگون می‌باشد، فرضیات مختلفی وارد می‌شوند که ممکن است نتیجه‌گیری نهایی بطور کامل با واقعیت منطبق نباشند، لذا هیدرولوژی جزء علوم دقیق (exact) به شمار نمی‌رود و فقط تخمینی از واقعیت را بدست می‌دهد. بسیاری از مهندسان و دانشجویان در هنگام حل مسائل هیدرولوژی برای بدست آوردن پارامترهای فنی طرح‌های در دست مطالعه وقتی با این واقعیت روبرو می‌شوند که برای یک مسأله ممکن است چندین جواب وجود داشته باشد که لازم می‌شود از بین آنها یکی را برگزینند و یا انتخاب روشهای پیشنهادی مختلف برای حل یک مسأله آنها را به جوابهای متفاوت می‌رساند، با تصویری که از علوم ریاضی و فیزیک و حتی هیدرولیک و مکانیک سیالات بعنوان علوم دقیق دارند نسبت به هیدرولوژی و نتایج آن بدگمان می‌شوند. اما باید دانست که همین تخمین‌ها تا بحال توانسته است بسیاری از مشکلات بشر را در ارتباط با مسائل آبی حل نمایند. بنابراین باید از همان ابتدا بپذیریم که هیدرولوژی اصولاً جزء علوم غیردقیق (non-exact) طبقه‌بندی می‌شود و نباید از آن انتظار یک جواب مشخص و صد در صد واقعی و دقیق را داشت. البته باید گفت که اولاً غیر دقیق بودن در اینجا به مفهوم ریاضی - فیزیکی آن بوده و به این معنی نخواهد بود که جوابها بسیار هم با واقعیت مغایرند. ثانياً بکارگیری روشهای علمی در کارهای هیدرولوژی بمقدار فراوان بر دقت نتایج افزوده است.

## ۲-۱ چرخه هیدرولوژی

چرخه آب یا سیکل هیدرولوژی (hydrological cycle) که همان گردش آب در طبیعت باشد مفهومی است مربوط به مسیر حرکت آب در کره زمین. سیکل هیدرولوژی یک چرخش ساده نیست بلکه مجموعه‌ای از حرکات و حلقه‌های مختلف است که در سه بخش از کره زمین یعنی اتمسفر (هواسپهر یا جو)، هیدروسفر (آب سپهر) و لیتوسفر (سنگ سپهر) صورت می‌گیرد. جو (atmosphere)، پوشش گازی شکل اطراف زمین، هیدروسفر (hydrosphere) توده آب موجود در سطح زمین و لیتوسفر (lithosphere) پوشش سخت رویه زمین است که چرخش آب در داخل و بین این بخشها و در لایه‌ای به ضخامت تقریبی ۱۶ کیلومتر صورت می‌گیرد که ۱۵ کیلومتر آن در اتمسفر و تنها یک کیلومتر آن در داخل لیتوسفر قرار دارد.

سیکل هیدرولوژی چرخه‌ای است بدون ابتدا و انتها. بدین ترتیب که آب از سطح دریاها و

خشکی‌ها تبخیر شده و وارد اتمسفر می‌گردد و سپس دوباره بخار آب موجود در جو طی فرایندهای گوناگون به صورت نزولات جوی به سطح زمین یا روی دریاها فرو می‌ریزد. نزولات جوی ممکن است با سه حالت روبرو شوند: یا قبل از رسیدن به سطح زمین توسط شاخ و برگ گیاهان گرفته شوند (برگاب یا باران گیرش)، که بعداً مستقیماً از همان جا تبخیر و به هوا باز می‌گردند، یا در سطح زمین جاری می‌شوند (رواناب) و یا در خاک نفوذ می‌کنند. آب نفوذی نیز یا بطور موقت در خاک ذخیره می‌شود که سپس در اثر تبخیر به هوا بر می‌گردد و یا منابع آب زیرزمینی را تشکیل می‌دهد که سرانجام از طریق چشمه‌ها و یا تراوش به داخل رودخانه‌ها مجدداً در سطح زمین ظاهر می‌گردد. در تمام این موارد آب با تبخیر و بازگشت مجدد به اتمسفر چرخه هیدرولوژی را تکمیل می‌کند. در شکل ۱-۱ نموداری از چرخه هیدرولوژی و نقل و انتقالاتی که در رابطه با آب در طبیعت صورت می‌گیرد نشان داده شده است. همانطور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود عناصر مهم سیکل هیدرولوژی را بارندگی ( $P$ )، رواناب سطحی ( $R$ )، تبخیر از سطح آب یا خاک ( $E$ )، تعرق توسط پوشش گیاهی ( $T$ )، نفوذ ( $I$ ) و جریانهای زیرزمینی ( $G$ ) تشکیل می‌دهند که در زیر به اختصار در مورد آنها شرح داده شده است. علم هیدرولوژی را در واقع می‌توان مطالعه کمی و کیفی این عناصر و روابط آنها با یکدیگر دانست.



شکل ۱-۱ چرخه آب و اجزای تشکیل دهنده آن در طبیعت

بارندگی مقدار آبی که از سطح خشکی‌ها و دریاها تبخیر می‌شود بطور موقت در جو زمین بصورت بخار ذخیره می‌گردد. بخار آب موجود در جو طی فرایندهای فیزیکی خاصی متراکم شده و به شکل ابر درمی‌آید که پس از اشباع شدن، قطرات آب یا ذرات یخ در آن شکل گرفته و به صور گوناگون مانند باران، برف، تگرگ و غیره که به همه آنها واژه نزولات جوی و یا بعضاً بارندگی (precipitation) اطلاق می‌شود دوباره به زمین بر می‌گردد. بارندگی پدیده‌ای است که انسان کمتر می‌تواند بطور مستقیم در آن دخل و تصرف نماید. لذا اینکه بعضاً گفته می‌شود با اجرای طرح‌های توسعه فضای سبز یا احداث دریاچه‌های مصنوعی و سدسازی آب و هوا تعدیل شده و باعث افزایش بارندگی خواهد شد صحیح نمی‌باشد. بطور کلی هر سال روی دریاها ۱۲۷۸ و در سطح خشکی‌های کره زمین حدود ۸۶۵ میلی‌متر بارندگی وجود دارد.

**تبخیر** بر حسب تعریف، تبخیر (evaporation) پدیده‌ای است که از هرگونه سطح مرطوب مانند سطوح آزاد آب یا سطح مرطوب خاک صورت گرفته و طی آن آب مایع به بخار (که حالتی بین گاز و مایع می‌باشد) تبدیل شده و مجدداً به جو زمین باز می‌گردد. از عوامل مؤثر بر تبخیر می‌توان دمای هوا، سرعت باد، تابش خورشید و رطوبت هوا را نام برد که همگی بر میزان تبخیر مؤثرند. همانطور که مشاهده می‌شود در مورد تبخیر نیز دخالت انسان در مقیاس وسیع ناچیز است. بطور متوسط هر سال از سطح دریاها ۱۴۰۰ میلی‌متر آب تبخیر می‌شود.

**تعرق** پس از آنکه آب وارد خاک شد بخشی از آن توسط ریشه‌ها جذب شده و وارد گیاه می‌شود. آب موجود در گیاه از طریق روزنه‌های موجود در برگ‌ها خارج و وارد جو می‌شود. این پدیده فیزیکی - بیولوژیک را تعرق (transpiration) گویند که از نظر ماهیت مشابه تبخیر بوده و در واقع یکی از تولیدات جانبی عمل فتوسنتز و تنفس گیاه به شمار می‌رود. گیاهان مختلف به دلیل تفاوت‌های فیزیولوژیکی تعرق متفاوت دارند.

**تبخیر-تعرق** به دلیل اینکه در حوضه‌های آبریز دو پدیده تبخیر از سطح مرطوب خاک و تعرق از سطح گیاهان را نمی‌توان از همدیگر مجزا ساخت غالباً این دو فرایند توأم با یکدیگر و بنام تبخیر-تعرق (evapotranspiration) توصیف می‌شوند. تقریباً نیمی از آبی که وارد خاک می‌شود دوباره از طریق تبخیر-تعرق به جو زمین باز می‌گردد. در ایران بیش از ۷۰ درصد آبی که بصورت نزولات جوی فرو می‌ریزد بلافاصله و در مدتی کوتاه از طریق تبخیر یا تبخیر - تعرق مجدداً به اتمسفر باز می‌گردد.

**نفوذ** وارد شدن آب به داخل خاک را نفوذ (infiltration) گویند. نفوذ از یک نقطه به نقطه دیگر بسیار متغیر است زیرا سرعت نفوذ آب در خاک بستگی به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک دارد. نفوذپذیری یکی از نمایه‌های فیزیکی خاک است که نشان دهنده سرعت ورود آب به



داخل خاک می‌باشد. وضعیت سطح زمین نیز بر مقدار نفوذ مؤثر است. خاکهای فشرده شده و یا برخی پوششهای مصنوعی مانند سنگفرش، آسفالت و غیره مقدار نفوذ را به شدت کاهش می‌دهند. پوشش گیاهی نیز در پدیده نفوذ نقش عمده دارد. مثلاً نفوذپذیری در سطوح جنگل و مراتع به مراتب بیشتر از سطح یک خاک فشرده شده است. از عوامل مؤثر دیگر بر نفوذ می‌توان شیب زمین، پستی و بلندی، زبری سطح خاک و فعالیت‌های انسان را نام برد.

نفوذ عمقی و تغذیه آبهای زیرزمینی بخشی از آبی که به داخل خاک نفوذ می‌کند به حرکت خود در داخل خاک ادامه داده و به لایه‌های آبدار زیرزمینی می‌پیوندد. این فرایند که باعث افزایش حجم آب‌های زیرزمینی می‌گردد نفوذ عمقی یا تغذیه آب زیرزمینی (deep percolation) نام دارد. عامل محرک در نفوذ و تغذیه آبهای زیرزمینی نیروی گرانش (ثقل) و عامل بازدارنده آن مقاومت خاک در مقابل جریان آب می‌باشد. نفوذ عمقی را نباید با نفوذ سطحی یکی دانست زیرا نفوذ سطحی فرایند وارد شدن آب از هوا به داخل خاک است و نفوذ عمق فرایند جابجایی آب (redistribution) در داخل خاک به شمار می‌رود.

رواناب و جریان سطحی بخشی از نزولات جوئی که روی زمین به جریان درآمده و به منابع آبهای سطحی مانند رودخانه، دریاچه، دریا و یا نقاط گود رویه زمین می‌پیوندد رواناب (run-off) نام دارد. رواناب زمانی رخ می‌دهد که شدت بارندگی بیش از سرعت نفوذ آب در خاک و نگهداشت آب در گودال‌ها و پستی و بلندیهای سطح زمین باشد. مقدار آبی که در سطح زمین موقتاً نگهداری می‌شود بنام نگهداشت سطحی یا ذخیره سطحی (surface storage) و یا چالاب معروف است. اگر ریزشهای جوئی بیش از ذخیره سطحی و سرعت نفوذ باشد مازاد آن بصورت جریان سطحی یا رواناب در سطح زمین جاری می‌گردد. رواناب، جریان سطحی (surface flow) و جریان روی زمینی (overland flow) واژه‌های مترادفی هستند که در توصیف این عنصر از سیکل هیدرولوژی بکار برده می‌شوند.

جریان زیر سطحی آبی که به داخل خاک نفوذ می‌کند ممکن است در مسیر خود به لایه‌های غیرقابل نفوذ با موانعی برخورد کند که امکان عبور از آن وجود نداشته باشد. در این صورت آب پس از جمع شدن روی این لایه‌ها حرکات جانبی بخود گرفته و در امتداد شیب به حرکت در می‌آید که سرانجام به رودخانه، دریاچه‌ها، کوبرها و یا دریاها منتهی می‌شود. به این فرایند جریان میانی (inter-flow) و یا جریان زیر سطحی (sub-surface flow) گفته می‌شود. گاهی اوقات آب نفوذ شده بخصوص در زمینهای شیبدار در امتداد شیب و در زیر سطح خاک به موازات رواناب سطحی به حرکت در می‌آید که به آن جریان زیر بستری یا رواناب دیررس هم گفته می‌شود. این پدیده نیز نوعی از جریان زیر سطحی به شمار می‌رود که تفاوت آنها فقط در عمق یا محل جریان نسبت به سطح زمین است. بطوریکه رواناب دیررس در عمق بسیار کمی از سطح



زمین جاری است. مثلاً در بعضی از رودخانه‌های خشک مشاهده می‌شود که در زیر بستر رودخانه جریانی از آب وجود دارد که اگر جلو حرکت آن را با احداث یک سد زیرزمینی بگیریم آب در پشت این سد تجمع پیدا کرده و سرانجام در سطح زمین ظاهر خواهد شد. امروزه احداث سدهای زیرزمینی و زهکشی بستر آبرفتی رودخانه‌های فصلی و خشک یکی از روش‌های استحصال آب به شمار می‌رود. البته جریانهای زیرسطحی (میانی یا رواناب دیررس) را نباید با جریانهای عمیق آب زیرزمینی یکی دانست.

آب‌های زیرزمینی آبهای زیرزمینی به آبهایی گفته می‌شود که در لایه‌های اشباع زیر زمین تجمع پیدا کرده است. این آبها فقط حدود ۴ درصد از مجموعه آبهایی را که فعالانه در سیکل هیدرولوژی دخالت دارند تشکیل می‌دهد با این وجود حدود ۵۰ درصد جمعیت دنیا از نظر آب شرب متکی به همین آبهای زیرزمینی می‌باشند. این رقم در ایران بمراتب بالاتر از ۵۰ درصد بوده و می‌توان گفت اکثر شهرها و روستاهای کشور آب مورد نیاز شرب و کشاورزی خود را از منابع زیرزمینی تأمین می‌کنند. جریان آبهای زیرزمینی (ground water flow) در مسیر سیکل هیدرولوژی سرانجام وارد دریاچه‌ها یا دریاها شده و یا در حوضه‌های بسته به کویرها منتهی می‌شوند.

بطور کلی از مجموع ۸۶۵ میلی متر بارندگی که بطور متوسط در هر سال روی خشکی‌های کره زمین ریزش می‌کند ۵۵۸ میلی متر آن (۶۵ درصد) بصورت تبخیر و تعرق مجدداً به اتمسفر برگشت می‌کند. از مقدار بقیه ۱۹۵ میلی متر (۲۲ درصد بارندگی‌ها) بصورت رواناب مستقیم وارد رودخانه‌ها می‌گردد و ۱۱۲ میلی متر (۱۳ درصد بارندگی‌ها) در خاک نفوذ می‌کند که آبهای زیرزمینی را تشکیل می‌دهد. آبهای زیرزمینی نیز سرانجام از طریق چشمه و جریان‌های زیرزمینی وارد رودخانه‌ها می‌شوند. بنابراین جریان رودخانه‌ها در کره زمین جمعاً معادل ۳۰۷ میلی متر است ( $112 + 195 = 307$ ). جریان‌های رودخانه‌ای سرانجام وارد دریاها، دریاچه‌ها و یا کویرها می‌گردند که با تبخیر و وارد شدن به اتمسفر سیکل هیدرولوژی تکمیل می‌گردد. بطوریکه مشاهده می‌شود جمع رواناب رودخانه‌ای (۳۰۷ میلی متر) و تبخیر - تعرق (۵۵۸ میلی متر) معادل همان مقدار بارندگی است ( $307 + 558 = 865$ ).

### ۳-۱ موجودیت آب در کره زمین

کسانی که از فضا به کره زمین نگاه کنند آن را یک سیاره آبی رنگ و پر از آب خواهند دید. برای آنها تصور این که سیاره‌ای با این همه آب باز هم کمبود داشته باشد بسیار مشکل است. اما گرچه حجم کل آبهای موجود در کره زمین رقمی نسبتاً زیاد و در حدود ۱,۴۰۰,۰۰۰,۰۰۰ کیلومتر مکعب تخمین زده شده است، که اگر بطور یکنواخت در سطح دنیا توزیع می‌شد ارتفاعی برابر ۲/۷۴۵ کیلومتر را تشکیل می‌داد، اما متجاوز از ۹۷ درصد این آبها در دریاها و اقیانوسها

متمرکز بوده و حدود ۲ درصد نیز بصورت یخ و یخچالها در مناطق قطبی تجمع یافته است. بنابراین تنها یک درصد از آب موجود در جهان ممکن است برای استفاده مستقیم در اختیار انسان قرار گیرد. بعلاوه از این یک درصد نیز همانطور که در جدول ۱-۱ نشان داده شده است، بخش زیادی در اعماق زمین بوده که استخراج آن مشکل و از دسترس انسان دور است.

جدول ۱-۱ مقادیر تخمینی آب موجود در جهان

منابع	درصد نسبت به کل حجم آنها	حجم آب	درصد نسبت به کل آبهای شیرین
دریاها	96.5640	$1351.9 \times 10^{15} \text{ m}^3$	0.00
بخش های قطبی	1.7300	$24.22 \times 10^{15} \text{ m}^3$	69.61
دریاچه ها	0.0130	$0.180 \times 10^{15} \text{ m}^3$	0.261
رودخانه ها	0.0002	$0.0028 \times 10^{15} \text{ m}^3$	0.006
اتمسفر	0.0010	$0.014 \times 10^{15} \text{ m}^3$	0.040
آبهای زیرزمینی	1.6899	$23.65 \times 10^{15} \text{ m}^3$	30.00
رطوبت خاک	0.0010	$0.014 \times 10^{15} \text{ m}^3$	0.050
تالابها	0.0008	$0.110 \times 10^{15} \text{ m}^3$	0.030
آبهای بیولوژیک (بدن موجودات زنده)	0.0001	$0.0014 \times 10^{15} \text{ m}^3$	0.003
جمع کل	100	$1400 \times 10^{15} \text{ m}^3$	100 %

آبهای موجود در دریاچه ها، رودخانه ها و اتمسفر (آب قابل بارش) فقط ۰/۰۱۴۲ درصد کل آبهای جهان را تشکیل می دهند که رقم بسیار اندکی است. هر چند رودخانه ها منبع اصلی آبهای شیرینی است که انسان به آن دسترسی دارد، اما در حال حاضر ۹۶ درصد آب رودخانه های جهان بدون استفاده و غیر قابل کنترل به دریاها می ریزد. بیشترین حجم آبهای شیرین موجود در جهان (حدود ۷۰ درصد) بصورت یخ در مناطق قطبی و یخچال های کوهستانی متمرکز است. بعد از یخ های قطبی بالاترین درصد حجم آبهای شیرین مربوط به آبهای زیرزمینی است (۳۰ درصد). البته تمام آبهای زیرزمینی شیرین نیستند و تقریباً تمام آبهایی که در عمق بیش از ۵۰۰ متری قرار دارند به نوعی شور و غیر قابل استفاده اند. بخش بسیار اندکی از آبهای شیرین جهان نیز در بدن موجودات زنده گیاهی و حیوانی متمرکز است که به نام آبهای بیولوژیک معروفند.

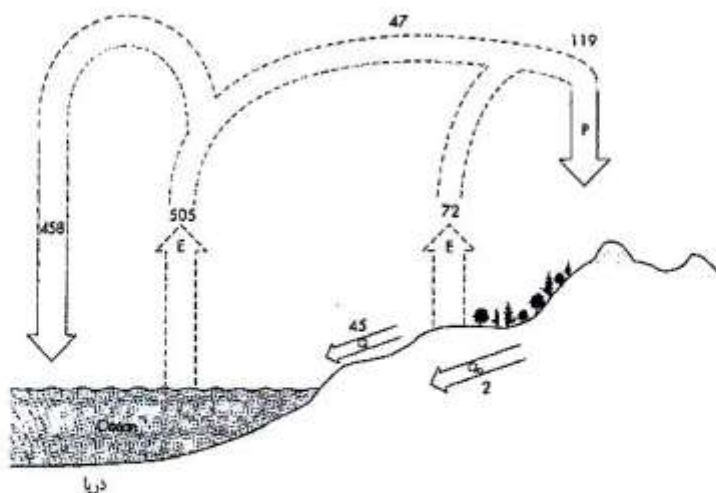
از کل آبهای موجود در کره زمین فقط بخش بسیار کوچکی از آن سالانه بطور فعال در چرخه هیدرولوژی مشارکت سریع داشته و منابع آب شیرین تجدید شونده دنیا را بوجود می آورند و شرکت بقیه آنها در چرخه هیدرولوژی بسیار کند است. مثلاً زمان مبادله آب اقیانوسها ۳۰۰۰ سال، آبهای زیرزمینی ۵۰۰۰ سال و لایه های یخ و یخچال ها ۸۰۰۰ سال است. عبارت دیگر ۳۰۰۰ سال طول می کشد تا حجمی معادل کل آب اقیانوسها از طریق سیکل هیدرولوژی بطور کامل مبادله شود. یعنی کلاً تبخیر شده و سپس، جایگزین گردند. حال آنکه زمان مبادله برای بخار آب موجود در اتمسفر فقط ۹ روز است. بنابراین می توان چنین تصور کرد که هر ۳۰۰۰

سال یکبار کل آبهای اقیانوسها تبخیر شده و آب جدید جایگزین آن می شود ولی زمان تعویض آبهای اتمسفر تنها ۹ روز می باشد.

هر سال حدود ۵۷۷,۰۰۰ کیلومتر مکعب آب بصورت بخار وارد اتمسفر می شود که ۸۷ درصد آن (۵۰۵,۰۰۰ کیلومتر مکعب) از سطح دریاها و ۱۳ درصد (۷۲,۰۰۰ کیلومتر مکعب) از سطح خشکیها تأمین می گردد (شکل ۲-۱). معادل همین مقدار آب نیز بصورت نزولات جوئی ریزش می کند. که ۴۵۸,۰۰۰ کیلومتر مکعب آن روی اقیانوسها و ۱۱۹,۰۰۰ کیلومتر مکعب روی خشکیها می باشد ( $۴۵۸,۰۰۰ + ۱۱۹,۰۰۰ = ۵۷۷,۰۰۰$ ). اما توزیع مکانی و زمانی نزولات جوئی در سطح کره زمین یکنواخت نمی باشد. بطور کلی همانطور که در جدول ۲-۱ نشان داده شده است از سطح خشکیهای کره زمین سالانه حدود ۷۲,۰۰۰ کیلومتر مکعب آب تبخیر و در عوض ۱۱۹,۰۰۰ کیلومتر مکعب بصورت های گوناگون ریزش می کند که زندگی بشر عمدتاً وابسته به تفاوت این دو مقدار، یعنی ۴۷,۰۰۰ کیلومتر مکعب آبی است که بعنوان منابع آب شیرین و قابل تجدید دنیا در نظر گرفته می شود.

جدول ۲-۱: بیلان سالانه آب روی خشکیها و اقیانوسهای جهان

عناصر	خشکیها	اقیانوسها
مساحت ( $۱۰^6$ کیلومتر مربع)	۱۴۸/۸	۳۶۱/۳
بارندگی سالانه (۱۰۰۰ کیلومتر مکعب)	۱۱۹	۴۵۸
تبخیر سالانه (۱۰۰۰ کیلومتر مکعب)	۷۲	۵۰۵
رواناب سالانه (۱۰۰۰ کیلومتر مکعب)	۴۷	-



شکل ۲-۱: مقادیر کمی عناصر سیکل جهانی هیدرولوژی (ارقام برحسب هزار کیلومتر مکعب در سال و  $Q, P, E$  به ترتیب علائم تبخیر، بارندگی، رواناب سطحی و جریان آب زیرزمینی می باشند)



با توجه به جمعیت ۶/۵ میلیاردی کره زمین، مقدار متوسط سرانه آب قابل تجدید حدود ۷۰۰۰ متر مکعب در سال می‌باشد. متأسفانه آب قابل تجدید نیز بطور یکنواخت در سطح دنیا پخش نشده است، بطوریکه مقدار آن در بعضی جاها مانند کویت تقریباً صفر بوده حال آنکه در برخی مناطق دیگر مثل کانادا این مقدار بالغ بر چندین هزار متر مکعب در سال برای هر نفر می‌باشد. مقدار سرانه آب قابل تجدید در ایران کمتر از ۱۷۰۰ متر مکعب در سال می‌باشد.

### ● مثال ۱-۱

زمان توقف بخار آب در اتمسفر را در مقیاس جهانی سیکل هیدرولوژی محاسبه کنید.

حل

بر اساس ارقام جدول ۱-۱ حجم آب موجود در اتمسفر در هر لحظه برابر  $10^{15} \times 10^4 / 0$  متر مکعب و یا ۱۴۰۰۰ کیلومتر مکعب است و بر اساس ارقام جدول ۱-۲ نیز مقدار بارندگی سالانه از سطح خشکی‌ها و اقیانوس‌ها جمعاً برابر است با:

$$= (458 + 119) \times 1000 = 577000 \text{ km}^3/\text{year}$$

که در هر روز معادل خواهد بود با:

$$= 577000/365 = 1580.82 \text{ km}^3/\text{day}$$

بنابراین زمان توقف بخار آب در اتمسفر عبارت است از:

$$= 14000/1580.82 = 8.86 \approx 9 \text{ days}$$

### ● مثال ۲-۱

مقدار تبخیر سالانه از سطح دریاچه‌ای به وسعت ۱۵۰۰ هکتار ۲۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد. حساب کنید در طول سال هر روز چند هکتار - متر آب تبخیر می‌شود.

حل

$$\text{مقدار تبخیر سالانه} = 2400 \text{ mm} = 2.4 \text{ m}$$

$$\text{حجم تبخیر سالانه} = (2.4 \text{ m}) (1500 \text{ ha}) = 3600 \text{ ha-m}$$

$$\text{مقدار متوسط حجم تبخیر در هر روز} = 3600/365 = 9.863 \text{ ha-m}$$

در حال حاضر نقش بشر در تغییر سیکل هیدرولوژی ناچیز است. هرچند نقل و انتقال‌هایی در مقیاس کوچک توسط انسان صورت گرفته است ولی این که تصور کنیم در روند کلی این سیکل تغییری حاصل شده باشد، اشتباه است. مثلاً در چندین سال قبل پژوهشهای زیادی در سطح دنیا در زمینه بارورکردن ابرها و ایجاد بارندگی در مناطق کم باران انجام می‌شد اما از این فعالیتها نتیجه زیادی حاصل نگردید و تقریباً در بسیاری از جاها این نوع تحقیقات کنار گذاشته



شده است. البته امروزه ادعا می‌شود که در اثر فعالیت‌های انسانی و افزایش گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر و در نتیجه گرم شدن هوای کره زمین ناهنجاری‌های زیادی در عناصر سیکل هیدرولوژی بوجود آمده و یا در آینده نزدیک بوجود خواهد آمد. مثلاً شدت بارندگی‌ها، زمان ریزش‌های جوی و نوع آنها در بعضی از مناطق دنیا دچار تحول شده است که به دخالت‌های زیست محیطی انسان ارتباط داده می‌شود. نتایج حاصله از برخی مدل‌های پیش‌بینی وضعیت آب و هوایی مانند مدل مرکز مطالعات هادلی (Hadly) در انگلستان نشان می‌دهد که به دلیل گرمایش جهانی طی ۴۰ سال آینده مقدار بارندگی سالانه در پهنه ایران حدود ۵۰ میلی‌متر کاهش خواهد یافت و برعکس متوسط دمای هوا تا ۲ درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا می‌کند که این امر می‌تواند هشدار جدی برای مدیریت منابع آب و کشاورزی در کشور باشد. با این وجود در هر زمان و مکان باید تنها براساس موجودیت آب در همان شرایط طبیعی برنامه‌ریزی کرد و این کار تنها با شناخت قوانین حاکم بر گردش آب در طبیعت می‌تواند صورت گیرد. عبارت دیگر فقط براساس قوانین هیدرولوژی و علوم وابسته به آن است که می‌توان انتظار داشت از منابع آبهای هر منطقه بهترین بهره‌برداری به عمل آید. به عنوان مثال فرض کنید بخواهیم برای یک شهر آب شرب تأمین کنیم، ابتدا باید مهندسان، منابع مختلف آب را شناسایی کنند و اگر در آن منطقه حوضه آبریزی در کوهستان وجود داشته باشد پتانسیل آن را از نظر تولید آب ارزیابی کرده و در این رابطه به سؤالاتی مانند این که چقدر بارندگی در سطح حوضه می‌بارد، طول دوره‌های خشکی چقدر است، شدت و فراوانی وقوع بارندگی‌ها به چه صورت است، از بارندگی چه مقدار در سطح زمین جاری می‌شود، چه میزان تبخیر و چقدر در زمین نفوذ می‌کند و آیا در صورت ذخیره آبهای سطحی به منابع آب زیرزمینی پایین دست لطمه‌ای وارد خواهد شد یا خیر، پاسخ دهند. البته سؤالات به همین جا ختم نخواهد شد بلکه پرسشهای فنی دیگری نیز مطرح می‌شود مانند اینکه حجم مخزن ذخیره آب چقدر باشد، ظرفیت طغیانگیر چه اندازه انتخاب شود، آیا نیاز به عملیات آبخیزداری در بالادست مخزن خواهد بود یا نه و یا این که عمر مخزن از نظر پر شدن با رسوبات چند سال خواهد بود. به این سؤالات و دهها سؤال مشابه تنها براساس قوانین هیدرولوژیکی می‌توان پاسخ داد و این از وظیفه هیدرولوژیست‌ها یا مهندسانی است که انجام مطالعات هیدرولوژی را بر عهده دارند. اهمیت وظیفه و کار هیدرولوژیست‌ها زمانی آشکار می‌شود که ما مستقیماً با خطرات ناشی از آب، چه کم آبی در هنگام وقوع خشکسالی‌ها و یا پر آبی در زمان وقوع سیل‌ها مواجه می‌شویم، که کشور هر دو را طی سال‌های اخیر تجربه کرده است.

باید بدانیم که آب در طبیعت تنها یک وظیفه بر عهده ندارد و نمی‌توان چنین تصور کرد که اگر جریانی از آب از یک نقطه عبور می‌کند می‌توان تمام آن را مهار نموده و بمصرف رساند. زیرا این آب ممکن است در پایین‌دست وظایف دیگری را به لحاظ اکولوژیکی بر عهده داشته باشد که ما از آن غافل بوده و جریان آن را قطع کرده‌ایم. بسیاری از مسائل زیست محیطی که در اثر

اجرای طرح‌های هیدرولوژیکی بوجود آمده‌اند ناشی از همین یکسونگری‌ها و عدم توجه به قوانین سیکل هیدرولوژی است که ما در جریان خرابی‌های ناشی از بارندگی و سیل‌های اخیر ایران بعضاً شاهد آن بوده‌ایم. بنابراین یک نفر هیدرولوژیست باید علاوه بر مسائل فنی به جنبه‌های زیست محیطی و پیامدهای ناشی از اجرای طرح‌های هیدرولوژیکی نیز توجه داشته باشد. چه بسا ساخت یک سد و قطع جریان آب رودخانه ممکن است باعث خشک‌شدن چاه‌ها و قنات‌های پایین دست گردد، که باز هم کشور موارد زیادی از آن‌ها را تجربه کرده است.

## ۴-۱ توازن هیدرولوژیکی

چون مقدار آب موجود در کره زمین محدود و ثابت است لذا سیستم هیدرولوژیک کره زمین را می‌توان یک سامانه بسته در نظر گرفت. اما در کارهای معمولی هیدرولوژی، سیکل جهانی آب مورد نظر نبوده و سروکار ما بیشتر با سامانه‌های کوچکی مانند حوضه‌های آبریز است که فقط در قسمتی از چرخه سیکل هیدرولوژی قرار دارند. چنین سامانه‌هایی را نمی‌توان سیستم بسته به شمار آورد، بلکه به صورت سیستم‌های باز عمل می‌کنند که بین مقدار آب ورودی به آنها (I) و آب خروجی از آنها (Q) و تغییراتی که از نظر آب در داخل آنها به وقوع می‌پیوندد ( $\Delta S$ ) رابطه ساده‌ای بصورت زیر برقرار است.

$$I - Q = \Delta S \quad (1-1)$$

یعنی تغییراتی که از نظر آب در یک سیستم اتفاق می‌افتد برابر است با تفاضل آب ورودی به سیستم و آب خروجی از سیستم. اگر در این معادله بُعد زمان را نیز دخالت دهیم یعنی بخواهیم بدانیم که این تغییرات در چه بازه زمانی اتفاق می‌افتند رابطه به شکل زیر درخواهد آمد.

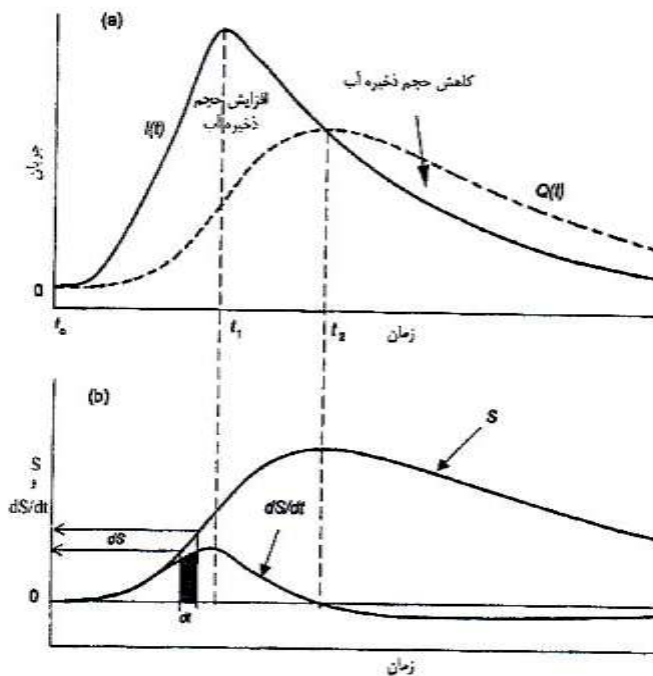
$$I(t) - Q(t) = \Delta S(t) \quad (2-1)$$

در این فرمول  $I(t)$  سرعت جریان ورودی،  $Q(t)$  سرعت جریان خروجی از سیستم و  $\Delta S(t)$  میزان تغییراتی است که از نظر مقدار آب در سیستم بوقوع می‌پیوندد. شکل ریاضی و یا اصطلاحاً فرم دیفرانسیلی معادله فوق که برای مهندسان مفهوم بیشتری دارد بصورت زیر می‌باشد.

$$\frac{dI}{dt} - \frac{dQ}{dt} = \frac{dS}{dt} \quad (3-1)$$

که در آن  $dI/dt$  تغییرات زمانی دبی ورودی،  $dQ/dt$  تغییرات زمانی دبی خروجی و  $dS/dt$  تغییرات زمانی ذخیره آب در سیستم است. مقدار  $dS/dt$  بسته به این که دبی ورودی از دبی خروجی بیشتر یا کمتر باشد ممکن است مثبت یا منفی باشد و چنانچه در یک بازه زمانی هیچگونه تغییراتی از نظر ذخیره مقدار آب در سیستم صورت نگیرد  $dS/dt=0$  خواهد بود. توصیف مفهومی معادله ۳-۱ در شکل ۳-۱ بخوبی نشان داده شده است. در این شکل فرض

شده است که در زمان  $t_0$  مقدار جریان ورودی و خروجی از یک مخزن با هم برابر باشند. یعنی در این زمان هیچ گونه تغییری در حجم آب مخزن اتفاق نمی افتد ( $dS/dt=0$ ). از این زمان به بعد دبی ورودی  $I(t)$  با سرعت زیادی افزایش پیدا کرده و در زمان  $t_1$  به حداکثر خود رسیده و سپس به تدریج کاهش پیدا می کند. متعاقب با آن از همین زمان به بعد دبی خروجی  $Q(t)$  نیز با سرعتی کمتر افزایش یافته و در زمان  $t_2$  مقدار آن به حداکثر رسیده و سپس مقدار آن کاهش پیدا می کند. محل تلاقی دو منحنی جریان های ورودی و خروجی که در زمان  $t_2$  می باشد نشان دهنده آن است که در این زمان مقدار آبی که از مخزن خارج می شود برابر مقدار آبی است که وارد مخزن می شود. در شکل ۳-۱ در قسمت (a) مشاهده می شود که تا قبل از رسیدن به زمان  $t_2$  بطور مرتب بر حجم آب مخزن افزوده می شود، زیرا تا این زمان دبی ورودی همواره بیشتر از دبی خروجی است اما از زمان  $t_2$  به بعد به دلیل آن که دبی خروجی بیشتر از دبی ورودی می باشد از حجم آب مخزن کاسته می شود تا این که سرانجام این دو منحنی در پایان بازه زمانی بار دیگر همدیگر را در انتها تلاقی کرده و مانند زمان  $t_0$  دوباره دبی ورودی و خروجی برابر شده و تغییری در حجم آب مخزن صورت نمی گیرد.



شکل ۳-۱ توصیف گرافیکی معادلات ۲-۱ و ۳-۱: (a) منحنی های جریان ورودی و خروجی آب از مخزن و افزایش و کاهش حجم ذخیره آب و (b) حجم کلی ذخیره آب مخزن ( $S$ ) و سرعت تغییرات حجم ذخیره آب ( $dS/dt$ )



در قسمت (b) شکل ۳-۱ فرم ریاضی معادله ۳-۱ توصیف شده است. در این شکل تغییرات حجم آب مخزن (S) نسبت به زمان و نیز سرعت این تغییرات ( $ds/dt$ ) نشان داده شده است. بطوریکه ملاحظه می شود  $ds/dt$  از صفر شروع شده، در  $t_1$  به حداکثر خود می رسد. در  $t_2$  مقدار آن صفر شده اما از ابتدا تا زمان  $t_2$  مقدار آن همواره مثبت است. در زمان  $t_2$  مقدار  $ds/dt=0$  شده و از این زمان به بعد  $ds/dt$  همواره منفی خواهد بود، تا این که سرانجام در انتهای بازه زمانی مقدار آن دوباره صفر می شود. توصیف اتفاقاتی که در قسمت های a و b در شکل ۳-۱ رخ داده است در جدول ۳-۱ نیز خلاصه شده است.

جدول ۳-۱ روابط بین جریان ورودی (I)، جریان خروجی (Q) حجم آب ذخیره شده در مخزن (S) و تغییرات زمانی حجم آب ذخیره شده در مخزن ( $ds/dt$ ) مربوط به مثال شکل ۳-۱ می باشد.

تغییرات حجم ذخیره آب ( $ds/dt$ )	ذخیره آب (S)	جریان خروجی (Q)	جریان ورودی (I)	زمان (t)
0	0	$I=Q$	$I=Q$	$t_0$
مثبت	افزایش	$Q<I$	$I>Q$	$t_0 < t < t_1$
حداکثر	افزایش	$Q<I$	حداکثر	$t_1$
0	حداکثر	حداکثر	$I=Q$	$t_2$
منفی	کاهش	$Q>I$	$I<Q$	$t > t_2$

معادله ۳-۱ بنام معادله اساسی هیدرولوژیک معروف است که ساده ترین و در عین حال مهم ترین معادله در هیدرولوژی بوده و در محاسبات مربوط به بیلان آب، زیاد مورد استفاده قرار می گیرد. با توجه به نوع سیستم حوضه آبریز، هر یک از اجزای معادله فوق ممکن است خود از چندین بخش تشکیل شده باشند. مثلاً اگر به شکل ۱-۱ توجه شود و بخواهیم معادله ۱-۱ را در مورد یک حوضه آبریز بکار ببریم. رابطه ای بصورت زیر بدست خواهد آمد.

$$P - R - G - E - T = \Delta S \quad (4-1)$$

به این ترتیب مقدار ذخیره ای که از نظر آب در حوضه بوجود می آید ( $\Delta S$ ) تفاوت بین بارندگی (P) و تلفاتی است که بصورت رواناب سطحی (R)، جریان زیرزمینی (G)، تبخیر (E) و تعرق (T) در حوضه اتفاق می افتد. مقادیر تبخیر (E) و تعرق (T) معمولاً بصورت توأم تخمین زده می شوند که با علامت ET نشان داده می شود. بنابراین شکل دیگر معادله توازن هیدرولوژیک بصورت زیر می باشد.

$$P - R - G - ET = \Delta S \quad (5-1)$$



## ● مثال ۳-۱

در یک حوضه آبریز که مساحت آن ۲۵۰۰ کیلومتر مربع است میانگین سالانه بارندگی ۱۳۰۰ میلی‌متر (۱۳۰ سانتی‌متر) و متوسط جریان خروجی از حوضه در طول سال ۳۰ متر مکعب در ثانیه برآورد شده است. حساب کنید مقدار تلفات آبی را که مجموعاً بصورت تبخیر- تعرق و نفوذ (جریان زیرزمینی) از حوضه خارج می‌شود. مقدار رواناب سطحی که به رودخانه این حوضه وارد می‌شود چند سانتی‌متر است؟ ضریب رواناب (درصدی از بارندگی که به رواناب سطحی تبدیل می‌گردد) چقدر است؟

## حل

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

$$P - R - G - ET = 0 \quad \Rightarrow \quad ET + G = P - R$$

$$ET + G = (130\text{ cm}) - \frac{(30 \text{ m}^3/\text{sec})(86,400 \text{ sec/day})(365 \text{ day/yr})(100 \text{ cm/m})}{(2500 \text{ km}^2)(1000 \text{ m/km})^2}$$

$$ET + G = 130 \text{ cm} - 37.9 \text{ cm}$$

$$ET + G = 92.1 \text{ cm}$$

بدین ترتیب مقدار تلفات آب در حوضه در اثر تبخیر- تعرق و نفوذ ۹۲/۱ سانتی‌متر و ارتفاع رواناب که مقدار باقی مانده بارندگی است ۳۷/۹ سانتی‌متر ( $37/9 = 130 - 92/1$ ) می‌باشد. لذا ضریب رواناب که حاصل بخش رواناب به بارندگی می‌باشد عبارت است از:

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

$$R/P = 0.29 = 29\%$$

ضریب رواناب ۲۹ درصد در اینجا به این معنی است که بطور متوسط ۲۹ درصد بارندگی‌ها به رواناب تبدیل شده و در سطح زمین جاری می‌شود.

## ● مثال ۴-۱

مقدار بارندگی قابل انتظار طی دو ماه از سال در یک حوضه آبریز به مساحت ۶۵ کیلومتر مربع که در بالا دست یک سد مخزنی واقع شده است ۲۵۴ میلی‌متر پیش بینی گردیده است. تصور می‌شود ۸۵ میلی‌متر آن صرف تبخیر- تعرق و ۲۰ میلی‌متر به داخل خاک نفوذ کرده و بقیه جاری و وارد مخزن گردد. 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 رواناب نیاز آبی چند نفر بمدت ۲ ماه تامین خواهد شد.

با فرض این که ذخیره آب در حوضه صفر باشد ( $\Delta S = 0$ ) خواهیم داشت:

$$R = P - ET - G$$

$$R = 254 - 85 - 20 = 149 \text{ mm}$$

$$R = [(149 \text{ mm}) / (1000 \text{ mm/m})] (65 \text{ km}^2) (10^6 \text{ m}^2/\text{km}^2) = 9.685 (10^6) \text{ m}^3$$

$$R = 9.685 (10^9) \text{ lit}$$

مصرف آب توسط هر نفر در ۲ ماه برابر است با  $160 \times 30 \times 2$  لذا تعداد افرادی که نیاز آنها طی این مدت تأمین خواهد شد برابر است با:

$$N = \frac{9.685 (10^9)}{160 \times 30 \times 2} = 1,000,000$$

## ۵-۱ بیان آب در ایران

همانطور که اشاره شد ایران از نظر عرض جغرافیائی در کمربندی از کره زمین واقع شده است که اغلب مناطق خشک و نیمه خشک جهان در آن قرار دارند. عامل این خشکی نیز از گردش عمومی هوا در کره زمین نشأت می‌گیرد. زیرا هوای گرم و مرطوبی که از استوا به سمت قطب حرکت می‌کنند بتدریج در اثر بارندگی رطوبت خود را از دست داده و در عرضهای جغرافیائی ۳۰ تا ۴۰ درجه بمقدار زیادی خشک و سرد و سنگین شده و پائین سقوط می‌کند لذا امکان بارندگی تا حد زیادی از آن سلب می‌شود. با توجه به اینکه ایران نیز در همین کمربند اقلیمی واقع شده است لذا کمبود بارندگی در آن یک واقعیت ذاتی هیدرولوژیکی است. عمده‌ترین معیار برای تعیین درجه خشکی در یک منطقه رابطه بین مقدار بارندگی (سالانه) و تبخیر (توان تبخیری محیط) است. هر اندازه مقدار باران نسبت به توان تبخیر کمتر باشد درجه خشکی آن منطقه بیشتر است. در جدول ۴-۱ مقادیر تقریبی باران و توان تبخیر (از تشت) برای چند منطقه از کشور داده شده است. بطوریکه مشاهده می‌شود بجز نواحی محدودی از ایران (حاشیه دریای خزر) در سایر مناطق توان تبخیر بمراتب بالاتر از مقدار واقعی بارندگی است. مثلاً در یزد میانگین سالانه بارندگی ۶۰ میلی‌متر است حال آنکه در این منطقه توان تبخیری محیط ۳۹۰۰ میلی‌متر می‌باشد. یعنی اگر یک سطح آزاد آب در یزد وجود داشته باشد سالانه ارتفاعی معادل ۴ متر از آن تبخیر می‌شود. گرچه ارقام جدول ۴-۱ ممکن است از دقت زیادی برخوردار نباشند اما نشان دهنده واقعیت خشکی و بحرانی بودن وضعیت منابع آبی در کشور می‌باشد.

با توجه به مقدار متوسط ۲۵۰ میلی‌متر بارندگی سالانه در سطح کشور هر سال حدود ۴۱۳ میلیارد متر مکعب آب در اثر نزولات جوی در ایران وجود دارد که ۳۲۰ میلیارد متر مکعب آن

(۷۸ درصد) مربوط به بارشها در مناطق کوهستانی بوده و بارش روی دشتهای تنها ۹۳ میلیارد مترمکعب را شامل می‌گردد. در مجموع حدود ۷۲ درصد از بارندگیها بلافاصله از طریق تبخیر یا تبخیر-تعرق مجدداً وارد جو می‌شود و لذا حجم آب قابل استحصال، که عمده آن نیز در مناطق کوهستانی است بسیار اندک می‌باشد (۲۸ درصد نزولات جوی). از مجموع نزولات جوی سالانه ۹۲ میلیارد متر مکعب بصورت آبهای سطحی جاری شده و ۲۵ میلیارد متر مکعب نیز بطور مستقیم به داخل زمین نفوذ می‌کند. بنابراین در مجموع مقدار آب قابل تجدید کشور که از بارندگی‌ها حاصل می‌شود حدود ۱۱۷ میلیارد متر مکعب در سال تخمین زده می‌شود. علاوه بر این سالانه ۱۳ میلیارد متر مکعب آب نیز توسط رودخانه‌های مرزی وارد کشور می‌شود که با پیوستن آن به جریانهای سطحی حجم کل آبهای تجدیدپذیر کشور سالانه به ۱۳۰ میلیارد متر مکعب می‌رسد. البته به همین میزان یعنی حدود ۱۲ میلیارد متر مکعب آب از طریق رودخانه‌های مرزی از کشور نیز خارج می‌شود و لذا عملاً حجم آب قابل تجدید در کشور همان ۱۱۷ میلیارد متر مکعب می‌باشد. از مجموع ۱۰۵ میلیارد متر مکعب آبهای سطحی (با احتساب آب ورودی از مرزهای کشور) حدود ۱۳ میلیارد متر مکعب آن در مسیر جریان به داخل خاک نفوذ کرده و وارد آبهای زیرزمینی می‌گردد، حدود ۴۱ میلیارد متر مکعب مصرف می‌شود و بقیه وارد دریا و دریاچه‌ها و کویرها شده و یا توسط رودخانه‌های مرزی از کشور خارج می‌گردد. اگر در نظر بگیریم که از ۴۱ میلیارد متر مکعب آب سطحی مصرف شده نیز ۱۸ میلیارد متر مکعب آن به سفره‌های زیرزمینی نفوذ کند (که البته بعید بنظر می‌رسد) جمع تغذیه آبهای زیرزمینی ۵۶ میلیارد متر مکعب است ( $25 + 13 + 18 = 56$ ) در حالی که برداشت از این منابع سالانه حدود ۶۳ میلیارد متر مکعب و یا بیشتر می‌باشد. بعبارت دیگر لایه‌های آبدار زیرزمینی کشور هر سال با بیش از ۷ میلیارد متر مکعب کسری مخازن مواجه می‌باشند، یعنی کشور هر سال حدود ۷ میلیارد متر مکعب بیش از میزان تغذیه از منابع آبهای زیرزمینی استفاده می‌کند. این امر از یک سو حساسیت بیشتر آبهای زیرزمینی را نسبت به استفاده‌های بی‌رویه روشن می‌سازد و از سوی دیگر برنامه‌ریزی دقیق‌تری را براساس اصول هیدرولوژی برای آبهای سطحی کشور که منابع عمده آب هستند طلب می‌نماید.

در برنامه چهارم توسعه کشور پیش‌بینی شده است که وزارت خانه‌های جهاد کشاورزی و نیرو باید طوری برنامه‌ریزی کنند که طی این برنامه هر سال ۲۵ درصد از بیلان منفی آبخانه‌های زیرزمینی کاسته شود (هر سال حدود ۲ میلیارد متر مکعب) تا سرانجام در انتهای برنامه توسعه چهارم لایه‌های آبدار زیرزمینی بیلان منفی نداشته باشند.



جدول ۱-۴ مقادیر تقریبی باران و تبخیر سالانه (از تشت)  
در چند منطقه از کشور (اعداد برحسب میلی متر می باشند)

منطقه	باران	تبخیر	منطقه	باران	تبخیر
آبادان	۱۲۰	۲۲۰۰	دزفول	۳۲۰	۳۲۰۰
آبادیه	۱۲۰	۲۸۰۰	رشت	۱۲۲۰	۱۱۵۰
اصفهان	۱۲۰	۲۶۰۰	ساری	۶۳۰	۱۰۰۰
اهواز	۱۷۰	۳۴۰۰	شیراز	۳۵۰	۲۸۰۰
انزلی	۱۹۴۰	۷۰۰	کاشان	۱۴۰	۳۱۰۰
ارومیه	۳۷۰	۱۵۰۰	کرمان	۱۷۰	۳۶۰۰
پندر عیاسی	۱۵۰	۳۵۰۰	مشهد	۲۲۰	۱۷۵۰
تهران	۲۲۰	۲۴۰۰	یزد	۶۰	۳۹۰۰
			زابل	۶۲	۲۵۰۰

در جهان برای اینکه درجه کم آبی یا پرآبی یک کشور را تعیین کنند از معیار سرانه آب یعنی حجم آب قابل تجدید به ازاء هر نفر در سال استفاده می شود. بنابراین علاوه بر مقدار آب قابل تجدید در هر کشور که تقریباً رقم ثابتی است جمعیت آن کشور نیز مطرح می باشد. مثلاً سرانه آب قابل تجدید در ایران با توجه به افزایش جمعیت در سال های اخیر به ترتیب از ۵۵۰۰ متر مکعب به ازاء هر نفر در سال ۱۳۴۰ به کمتر از ۲۱۰۰ متر مکعب در سال ۱۳۵۵ و سپس ۱۷۵۰ متر مکعب در سال ۱۳۸۰ تقلیل یافته است در حال حاضر (۱۳۸۷) با جمعیتی حدود ۷۰ میلیون نفر سرانه آب قابل تجدید در کشور حدود ۱۶۷۰ متر مکعب در سال می باشد. پیش بینی می شود سرانه آب قابل تجدید کشور در سال ۱۴۰۰ به کمتر از ۱۲۵۰ متر مکعب به ازاء هر نفر برسد.

چنین تصور می شود که کشورهایی که سرانه آب قابل تجدید در آنها کمتر از ۱۷۵۰ متر مکعب باشد با تنش های دوره ای و کشورهایی که سرانه آب در آنها از ۱۰۰۰ متر مکعب کمتر باشد با تنش و بحران دائمی آب مواجه خواهند بود. بر اساس این معیار کشور ایران در حال حاضر از نظر منابع آب با تنش دوره ای مواجه است ولی با افزایش جمعیت به سمت تنش دائمی پیش می رود. مقدار سرانه آب در برخی کشورها یا به دلیل جمعیت کم و یا به دلیل بارندگی زیاد بسیار بالا بوده و برعکس در برخی کشورها مانند بحرین و کویت و قطر به دلیل عدم بارندگی مقدار آن تقریباً صفر می باشد. در جدول ۱-۵ مشاهده می شود که کشوری مانند انگلستان به دلیل کوچک بودن سطح کشور و جمعیت زیاد جزء کشورهای کم آب و یا کشوری مانند استرالیا به دلیل جمعیت کم و وسعت زیاد جزء کشورهای پر آب جهان محسوب می گردند. برنامه ریزی کشورها در استفاده از آب باید بر اساس حجم آب قابل تجدید سالانه باشد در غیر اینصورت استفاده از منابع آبهای غیر قابل تجدید مانند برداشت سالانه بیش از ۸ الی ۹ میلیارد متر مکعب آب غیر قابل تجدید از منابع آبهای زیرزمینی در کشور و یا برداشت آب از منابع فسیلی و غیر قابل تجدید در کشورهایی مانند لیبی و عربستان پایدار نبوده و ممکن است پس از پایان پذیرفتن این آبخانه ها صدمات غیر قابل جبرانی به منابع آب وارد آید. منابع



آب‌های زیرزمینی را نباید بعنوان هدیه‌ای در نظر گرفت که از نسل‌های گذشته برای ما به ارث گذاشته شده است، بلکه باید آن را ودیعه‌ای دانست که نسل‌های آینده آن را نزد ما به امانت گذاشته‌اند و باید به آنها داده شود.

جدول ۱-۵ مقادیر سرانه آب قابل تجدید در برخی کشورهای جهان

کشورهای پرآب	سرانه آب قابل تجدید (مترمکعب در سال برای هر نفر)	کشورهای کم آب	سرانه آب قابل تجدید (مترمکعب در سال برای هر نفر)
ایسلند	۶۷۱۹۰۰	بحرین	۰
سورینام	۴۹۶۳۰۰	کویت	۰
گینه نو	۱۹۹۷۰۰	قطر	۶۰
نیوزلند	۱۱۷۵۰۰	عربستان	۱۶۰
کانادا	۱۰۹۴۰۰	امارات متحده عربی	۱۹۰
استرالیا	۲۰۵۰۰	اسرائیل	۳۷۰
آمریکا	۹۹۰۰	انگلستان	۲۱۱۰

منابع آبیهای سطحی یکی از سرمایه‌های قابل تجدید کشور است که باید از آن حداکثر استفاده را بعمل آورد. در حال حاضر برای تصمیم‌گیری در مورد اجرای طرحهای هیدرولوژی در کشور سنجه نسبت سود به هزینه معیار قرار گرفته و در صورتی که این سنجه بیشتر از یک بوده و طرح اقتصادی باشد نسبت به اجرای آن اقدام می‌شود. اما واقعیت این است که نسبت سود به هزینه باید فقط در اولویت بخشیدن به طرحها بکار برده شود نه اینکه اجرای طرح بهره‌برداری از منابع آب را الزامی یا مردود سازد. زیرا آب برای ما یک منبع حیاتی است و باید از هر مترمکعب آن به بهترین وجه استفاده بعمل آید. مسلم است که در بهره‌برداری از آب حفظ اصول بوم‌شناختی (ecology) و پایداری (sustainability) منابع آب بمنظور تداوم بهره‌برداری برای نسل حاضر و نسلهای آینده امری ضروری است. باید از آب بعنوان یک کالای فرااقتصادی بهره‌برداری کرده و به این بهره‌گیری تداوم بخشیده شود. حتی اگر لازم باشد که برای حفاظت از محیط‌زیست آب بدون مهارشدن در رودخانه جاری باشد این کار باید با مطالعه و سنجیده انجام پذیرد.

باید توجه داشت که اعداد و ارقامی که در مورد بیلان آب در ایران ارائه گردید بر اساس اطلاعات رسمی و غیررسمی است که توسط سازمان‌های دولتی و یا مراکز مطالعاتی انتشار یافته است. اما لازم است تذکر داده شود که شبکه‌های هیدرومتری و اندازه‌گیری‌های آب در کشوری به وسعت ایران مانند بسیاری از نقاط چه به لحاظ کیفی و چه به لحاظ کمی بقدری ضعیف است که نمی‌توان با اطمینان این ارقام را قبول کرد که مثلاً گفته شود که بارندگی در پهنه فلات ایران دقیقاً ۲۵۲ میلی است و یا با اندازه‌گیری‌های بسیار محدود پیرومتری بتوان اظهار داشت که حجم کل آب قابل تجدید در ایران ۱۱۷ میلیارد و یا حجم منابع آب‌های زیرزمینی ۵۶

میلیارد متر مکعب بوده و ما در حال حاضر ۶۳ میلیارد متر مکعب آب را استخراج می‌کنیم. لذا به متخصصان هیدرولوژی توصیه می‌شود که در استفاده از ارقام موجودیت آب در ایران و یا هر جای دیگر پارامترهای هیدرولوژی مربوط به منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی بسیار با احتیاط عمل کرده و در طراحی سازه‌های آبی به این نکته اساسی توجه کافی داشته باشند.

## ۶-۱ تاریخچه علم هیدرولوژی

گرچه هیدرولوژی به معنای خاص کلمه علم بسیار جدیدی است و شاید بتوان گفت که قدمتی بیش از ۸۰ سال ندارد ولی بشر از همان ابتدای زندگی اجتماعی بطور مستقیم با آب سروکار داشته و همواره برای حل مشکلات خود با آن درگیر بوده و سعی کرده است پیچیدگی‌های این ماده حیاتی را بشناسد. بهمین دلیل دانش بومی اقوام و ملل مختلف در رابطه با آب بسیار غنی می‌باشد. از این نظر شاید بتوان گفت قدمت علم هیدرولوژی به اندازه قدمت تاریخ تمدن انسان است. اطلاعات ما درباره تاریخ علم هیدرولوژی محدود به نوشته‌هایی است که دانشمندان دنیای غرب به رشته تحریر در آورده‌اند. بدون شک در این منابع به پیشرفتهای علمی دیگر جاها کمتر توجه شده است. جا دارد موزه‌خان علوم در کشور نیز به این مهم توجه نموده و تاریخچه استفاده از آب در ایران را با تفصیل بیشتر به علاقه‌مندان ارائه نمایند.

کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی تاریخ آب و آبیاری را برای تعدادی از کشورهای جهان تدوین کرده و قرار است کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران نیز تاریخ آبیاری و استفاده از آب در ایران را تهیه نماید. این کار برای استان فارس انجام و جلد یکم آن تحت عنوان چاره آب در تاریخ فارس به چاپ رسیده است و برای استان خراسان نیز در دست اقدام است که اگر برای سایر مناطق کشور نیز انجام شود اقدامی شایسته خواهد بود.

تا جایی که تاریخ نشان می‌دهد یکی از اولین امپراتوری‌های جهان در نواحی جنوبی بین‌النهرین توسط آکاد (Akkad) بنیان‌گذاری شد. دیری نیاید که امپراتوری آکادیان (Akkadian) که با بهره‌گیری از آب آغاز شده بود در اثر یک خشکسالی دراز مدت رو به زوال گرایید. بعد از آن نیز تمدن‌های دیگری که می‌توان از آنها بعنوان تمدن‌های آبی (hydraulic civilizations) یاد کرد یکی پس از دیگری شکوفا و بار دیگر به دلیل عدم رعایت قوانین زیست محیطی نابود شدند. بررسی‌های تاریخی نشان می‌دهد که در اکثر این تمدن‌ها آب موجب شکوفایی و عدم توجه به قوانین آب باعث زوال آنها بوده است.

اولین تجارب هیدرولوژیکی به مفهوم کلاسیک آن مربوط به سومریها و مصریها در منطقه خاورمیانه است. بطوری که قدمت سدسازی روی رودخانه نیل به ۴۰۰۰ سال قبل از میلاد مسیح می‌رسد. البته در همین زمان فعالیت‌های مشابهی در سایر نقاط جهان مانند چین نیز

وجود داشته است. از بدو تاریخ تا حدود ۱۴۰۰ سال بعد از میلاد مسیح، دانشمندان در مورد سیکل هیدرولوژی اندیشه‌های گوناگونی را ارائه کرده‌اند که اکثر این اندیشه‌ها جنبه فلسفی داشتند. از این میان می‌توان به نظریات هومر، طالس، افلاطون و ارسطو اشاره کرد. البته در بین آنها کسانی نیز بوده‌اند که نظرات و تفکرات علمی‌شان هنوز هم مورد قبول است. مثلاً مارکوس ویتروویوس (Marcus Vitruvius) که تقریباً در زمان حضرت مسیح می‌زیست، عقیده داشت "قسمت اعظم آبهای زیرزمینی از آب باران و برف که در زمین نفوذ می‌کند تأمین می‌گردد" که نظریه‌ای کاملاً علمی است. در طول این دوره، انسانها با اجرای سازه‌های مختلف هیدرولیکی نظیر چاه، قنات، سد و تونل‌های انتقال آب بسیاری از مطالب هیدرولوژی را عملاً یاد گرفتند. در دوره رنسانس و بعد از آن به تدریج مفاهیم فلسفی هیدرولوژی جای خود را به مشاهدات علمی دادند. مثلاً در این دوره لئونارد داوینچی سیکل هیدرولوژی را بطور صحیحی تشریح کرده و مفاهیم نسبتاً دقیقی از نحوه نفوذ و حرکت آب در زیر زمین ارائه نمود. همچنین موضوع نفوذ آب باران در زمین و ظهور مجدد آن به صورت چشمه توسط برنارد پالیسی (Palissy) تشریح گردید. شاید بتوان گفت هیدرولوژی جدید از قرن ۱۷ با اندازه‌گیری‌های آب آغاز گردید. بعنوان مثال در این دوره پرالت (Perault) توانست مقدار بارندگی، تبخیر و صعود موئینه‌ای را در حوضه آبریز رودخانه سن (Seine) اندازه‌گیری کند و یا ماریوت (Mariotte) با اندازه‌گیری سرعت و سطح مقطع جریان، دبی رودخانه سن را در پاریس اندازه‌گیری کرد. با این اندازه‌گیری‌ها دانشمندان توانستند از مشاهده پدیده‌های هیدرولوژی نتایج صحیحی را استنتاج کرده و براساس این نتایج به برخی از روابط هیدرولیکی پی ببرند.

در قرن ۱۸ میلادی مطالعات تجربی در زمینه هیدرولوژی شکوفایی خاصی پیدا کرد. بر اساس این مطالعات بود که بسیاری از اصول هیدرولیکی که در هیدرولوژی کاربرد داشتند پایه‌گذاری گردید. از آن جمله می‌توان به ابداع وسایلی مانند پیزومتر برنولی (Bernoulli)، لوله پیتو (Pitot)، جریان سنج ولت من (Voltman)، لوله بوردا (Burda) و نظریه‌هایی مانند نظریه برنولی، معادله شزی (Chezy) و قوانین دالامبرت (D'alambert) اشاره کرد. از این زمان به بعد هیدرولوژی از جنبه‌های کیفی به کمی سوق داده شد و اندازه‌گیری بسیاری از پدیده‌های هیدرولوژی امکان‌پذیر گردید.

قرن نوزدهم را می‌توان دوران طلایی هیدرولوژی دانست. در این قرن نظریه‌های هیدرولوژی و هیدرولیک که بر تجارب دوره‌های قبل پایه‌گذاری شده بود استحکام بیشتری یافتند و بخصوص پیشرفت در زمینه هیدرولوژی آبهای زیرزمینی و اندازه‌گیری آبهای سطحی بسیار چشمگیر بوده است. در این زمان زمین‌شناسی نیز به عنوان یک دانش تکمیل‌کننده به علم آبهای زیرزمینی پیوند داده شد. قانون دارسی (Darcy) و فرمول‌های دوپوی-تیم (Dupuit-Thiem) نمونه‌ای از پیشرفت‌های هیدرولوژی آبهای زیرزمینی در این دوره است. در



این دوره به هیدرولوژی آبهای سطحی نیز، بهخصوص هیدرومتری، توجه زیادی مبذول گردید. فرمول‌های فسرانسیس در مورد سرریزها، گانگیه (Ganguillet)، کوته (Kutter) و مانینگ (Manning) دربارهٔ جریان آب در آبراهه‌های روباز از جملهٔ این مواردند. فعالیت‌های دالتون (Dalton) در زمینهٔ تبخیر نیز بسیار حائز اهمیت بود. چاپ و انتشار کتب و اشاعه دانش هیدرولوژی در این دوره از کارهای مهمی است که صورت پذیرفت. اما با این وجود باز هم تا اواخر قرن هیجدهم میلادی جنبه‌های توصیفی هیدرولوژی بر جنبه‌های کمی آن پیشی داشت. گرچه قسمت اعظم هیدرولوژی جدید در قرن ۱۹ پایه‌گذاری شد ولی تا این زمان هنوز هیدرولوژی علمی از تکامل زیادی برخوردار نبود. بدین‌صورت که هیدرولوژی بیشتر توصیفی-تجربی بود. زیرا برای تعیین پارامترهای کمی، مبنای فیزیکی به‌حد کفایت شناخته نشده بود. در اواخر قرن ۱۹ و بهخصوص در ۳۰ سال اول قرن بیستم فرض‌گرایی در هیدرولوژی رونق گرفت. در این دوره صدها فرمول تجربی پیشنهاد گردید که می‌بایست ضرایب و پارامترهای آنها براساس قضاوت و تجربه به دست می‌آمد. اما چون فرمول‌های تجربی نمی‌توانستند عملاً در حل مسائل هیدرولوژی آن‌طور که باید و شاید مفید واقع شوند، در بسیاری از کشورها مؤسسات و انستیتوهای تحقیقی در زمینهٔ هیدرولوژی تأسیس گردید. این مؤسسات زمینه پیدایش سازمانها و تشکیلات کنونی بین‌المللی را که در گستره هیدرولوژی و منابع آب فعالیت دارند فراهم ساختند. از بین این سازمانها می‌توان "جامعهٔ بین‌المللی هیدرولوژی کاربردی" را نام برد. بسیاری از پیشرفتهای علم هیدرولوژی مرهون وجود همین انجمن‌ها و سازمان‌هاست. در این دوره دانشمندان زیادی ظهور کردند که به جای روشهای تجربی، استدلال‌های منطقی را جایگزین نمودند. در سال ۱۹۳۲ میلادی شرمن (Sherman) نظریه روش "هیدروگراف واحد" را برای تخمین مقدار رواناب پیشنهاد کرد. نظریه تیس (Thies) در حل مسائل مربوط به هیدرولیک چاهها دگرگونی زیادی در این زمینه فراهم نمود. روش پیشنهادی گامبل (Gumble) در سال ۱۹۴۱ برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌های هیدرولوژی کمک شایانی به حل مسائل عملی نمود. همچنین می‌توان از فعالیتها و روشهای ارائه شده توسط اینشتاین (برادر آلبرت اینشتاین) (Einstein) در مطالعات رسوب رودخانه‌ها نام برد. در این دوره آزمایشگاههای هیدرولیک و هیدرولوژی زیادی در سراسر دنیا تأسیس شدند. وجود این آزمایشگاهها در مشخص کردن ضرایب و پارامترهای فرمول‌های تجربی بسیار مفید واقع گردید. این آزمایشگاهها هنوز هم برای حل مسائل هیدرولوژی فعالیت چشمگیر دارند.

از سال ۱۹۵۰ به بعد روشهای نظری در هیدرولوژی بسیار معمول گردید بطوریکه اکثر فرمول‌ها و روشهای تجربی در قالب ریاضی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گرفتند. وجود ماشین‌های حسابگر سریع (کامپیوتر) باعث شد تا بتوان نقش پارامترهای مختلف را در پدیده‌های هیدرولوژی بهتر بررسی کرد. مثلاً به دلیل وجود این نظریه‌ها و در اختیار بودن

کامپیوتر، دانشمندان قادر شدند نظریه‌های انتقال مواد را در پدیده تبخیر به کار برده و یا آن که از اصول تحقیق در عملیات سود جسته و سیستم‌های منابع آب را دقیق‌تر بررسی نمایند.

بطور خلاصه تاریخچه علم هیدرولوژی را می‌توان به دوره‌های زیر تقسیم بندی کرد:

- (۱) - دوره تفکر (period of speculation) از آغاز تا سال ۱۴۰۰ میلادی.
- (۲) - دوره مشاهده (period of observation) از ۱۴۰۰ تا ۱۶۰۰ میلادی.
- (۳) - دوره اندازه‌گیری (period of measurment) از ۱۶۰۰ تا ۱۷۰۰ میلادی.
- (۴) - دوره آزمایش (period of experimentation) از ۱۷۰۰ تا ۱۸۰۰ میلادی.
- (۵) - دوره نوآندیشی (period of modernization) از ۱۸۰۰ تا ۱۹۰۰ میلادی.
- (۶) - دوره فرض‌گرایی (period of empiricism) از ۱۹۰۰ تا ۱۹۳۰ میلادی.
- (۷) - دوره استدلال‌گرایی (period of rationalization) از ۱۹۳۰ تا ۱۹۵۰ میلادی.
- (۸) - دوره تحقیقات نظری (period of theorization) از ۱۹۵۰ میلادی به بعد.

همانطور که اشاره شد در بسیاری از کتابها و نشریات علمی به نقش دانشمندان شرقی و بخصوص ایرانی در روند تکامل دانش هیدرولوژی اشاره‌ای نشده است. حال آنکه آثار بجا مانده از سازه‌های آبی باستانی نشانگر وقوف و آگاهی زیاد ایرانیان به علم هیدرولوژی و هیدرولیک می‌باشد. از میان دانشمندان علوم آب در ایران باید از کرجی (ابوبکر محمدبن الحسن الحاسب الکرچی) که با ابوریحان بیرونی و زکریای رازی و ابن‌سینا معاصر بوده است نام برد. کرجی از بزرگترین علمای ریاضی ایران است که نوشته‌های مهمی از او به زبان عربی به جای مانده است و در علم آب‌شناسی و هیدرولوژی آبهای زیرزمینی نیز مهارت زیاد داشته است. در زمانی که بسیاری از دانشمندان اروپایی هنوز سیکل هیدرولوژی را نشناخته بودند وی در کتاب "استخراج آبهای پنهانی" که به فارسی نیز ترجمه شده است به روشنی حرکت آب در طبیعت، منشاء آبهای زیرزمینی و شور شدن آبها و مسایل مرتبط دیگر را تشریح کرده و برای استخراج آب‌های زیرزمینی توسط قنات راه‌حلهای فنی و عملی ارائه داده است. شواهد دیگر ابنیه‌های آبی بجا مانده از قدیم در نقاط مختلف کشور است. مثلاً اولین سد قوسی جهان در حدود ۷۵۰ سال پیش در نزدیک روستای کریت تلبس بنا شده است که ارتفاع آن بالغ بر ۸۰ متر است. طومارهای بجا مانده از نحوه تقسیم آب زاینده‌رود در دوره حکومت صفوی نشان از درک عمیق دانشمندانی همچون شیخ بهاء‌الدین عاملی (شیخ بهائی) از هیدرولوژی آبهای سطحی دارد. جاذبه دارد دانشجویان و متخصصان علوم آب در ایران جایگاه متفکران بزرگ و دیگر کسانی را که در این راه قدم برداشته‌اند ارج نهند و در معرفی آنها به جهانیان بکوشند.

## ۷-۱ هیدرولوژی در کارهای مهندسی

کاربرد هیدرولوژی در مهندسی عمده در ارتباط با طرح و بهره‌برداری از تأسیسات هیدرولیکی است. بنابراین هر مهندس عمران یا آبیاری یا جغرافی‌دانان که در طرح و برنامه‌ریزی و احداث تأسیسات آبی، پلها، جاده‌ها و نظایر آن و یا برنامه‌ریزی‌های توسعه منطقه‌ای فعالیت دارد، باید از علم هیدرولوژی و بویژه هیدرولوژی کاربردی آگاهی داشته باشد. یک مهندس باید قادر باشد تا در هنگام طراحی تأسیسات آبی به سؤالاتی مانند آنچه در بخشهای قبل گفته شد پاسخ دهد و پاسخهای وی مستدل و بر تجزیه و تحلیل علمی استوار باشد. به همین دلیل تحلیل علمی خطرهای (ریسک) در هیدرولوژی نیز بخش مهمی از فعالیتهای هیدرولوژیست را به‌خود اختصاص می‌دهد.

مسلّم است که به لحاظ اقتصادی بکارگیری یا استخدام یک هیدرولوژیست برای هر طرح کوچک عمرانی یا آبیاری مقرون به صرفه نیست لذا انتظار می‌رود مهندسان طراح بتوانند شخصاً به سؤالات طرح شده در زمینه هیدرولوژی پاسخ دهند و این کار ممکن نخواهد بود مگر با داشتن اطلاعات کافی در زمینه هیدرولوژی.

باید توجه داشت که هر کار هیدرولوژیکی مخصوص به خود بوده و با کارهای دیگر متفاوت است، ولی تعدادی قوانین وجود دارد که در تمام موارد صادقند. این قوانین راهگشای حل مسائل کاربردی است که تا حد امکان در این کتاب از آنها بحث خواهد شد. هیچکس نمی‌تواند ادعا کند که ابتدا به‌ساکن بتواند از قوانین فیزیکی شروع نموده و یک مشکل هیدرولوژیکی را حل کند. بلکه بدو لازم است برخی اصول علمی را بیاموزد و آنها را مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار داده تا براساس آنها الگوی مناسبی برای حل مسائل مورد نظر تهیه نماید. در این کتاب نیز همین شیوه برگزیده شده و لذا سعی شده است حتی‌المقدور ساده‌ترین و در عین حال عملی‌ترین روش که منطبق با شرایط آب و هوایی ایران باشد برگزیده شود.

برای آن که بتوانیم فرمول‌های تجربی و قوانین هیدرولوژی را در شرایط خاص ایران به کار ببریم بهتر بود این فرمول‌ها قبلاً در حوضه‌های آبریز آزمایشی مورد واسنجی و مطالعه و بررسی قرار می‌گرفتند. اما به دلیل نبود چنین حوضه‌هایی در ایران، این که بصراحت اعلام شود کدام فرمول یا معادله متناسب با نوع حوضه‌های ایران است امکان‌پذیر نیست و لذا ناگزیر معادلاتی ارائه شده است که صحت یا دقت آنها در دیگر جاهای دنیا مورد آزمایش و تایید قرار گرفته‌اند. شایسته است دانشگاهها و دیگر مؤسسات تحقیقاتی کشور به آزمایشگاههای هیدرولوژی و حوضه‌های آزمایشی معرّف مجهز شده و یافته‌های هیدرولوژیکی را منطبق بر شرایط آب و هوایی ایران مورد بررسی قرار دهند. انتخاب تعدادی حوضه آبریز معرف (مانند حوضه کسپیلان، امامه و کارده) که اخیراً در سطح کشور توسط برخی سازمانها صورت گرفته است می‌تواند گام مهم و مثبتی در این راستا باشد.



## ۸-۱ پیشرفت‌های رایانه‌ای

وارد شدن رایانه‌های دیجیتال در سالهای دهه ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ میلادی به دنیای علم هیدرولوژی باعث شد که بسیاری از مسائل پیچیده را بتوان بصورت مدل در آورده و جواب مورد نظر را بدست آورد. امروزه این روش در هیدرولوژی بسیار معمول و مدل‌های هیدرولوژیکی زیادی توسط افراد و مؤسسات مختلف ارائه شده است که مورد استفاده متخصصان قرار می‌گیرد. اولین مدل هیدرولوژیکی که در آن اکثر فرایندهای بارندگی، تبخیر، نفوذ، جریان‌های سطحی و زیرزمینی و تبخیر-تعرق لحاظ شده بود توسط گروهی از متخصصان در دانشگاه استنفورد آمریکا ارائه شد (Stanford Watershed Model). این مدل که بنام SWM معروف می‌باشد هنوز هم مورد استفاده قرار می‌گیرد. مرکز مهندسی هیدرولوژی وابسته به گروه مهندسان مشاور ارتش آمریکا (Hydrologic Engineering Center, HEC) مدل‌هایی را از جمله با نامهای HEC-1 تا HEC-6 ارائه داده است. این مدل‌ها هر کدام برای منظور خاصی تهیه شده‌اند. مثلاً HEC-1 جهت تخمین سیلاب از روی داده‌های بارندگی با استفاده از هیدروگراف واحد، HEC-2 برای محاسبه نیمرخ سطح آب در رودخانه‌ها و آبراهه‌ها و یا HEC-5 مدل مربوط به کنترل سیلاب می‌باشد. مؤسسه حفاظت محیط‌زیست آمریکا (Environmental Protection Agency) اخیراً مدلی بنام SWMM را تهیه نموده است (Storm Water Management Model) که در حال حاضر معتبرترین مدل در محاسبات مربوط به جمع‌آوری آبهای سطحی در داخل شهرهاست. مدل هیدرولوژیکی معروف دیگر مدل ILLUDAS است که توسط مرکز تحقیقات وزارت راه در انگلستان تهیه شده است و عمدهً برای محاسبات مربوط به رواناب از آن استفاده می‌شود. علاوه بر مدل‌های مذکور تعداد زیادی مدل‌های دیگر نیز بوسیله افراد و مؤسسات مختلف در سرتاسر دنیا تهیه شده است که هریک به نوبه خود در آسان کردن محاسبات پیچیده هیدرولوژی مؤثرند که در اینجا به ذکر پاره‌ای از آنها اکتفا می‌شود. خوانندگانی که علاقمند به دریافت این مدل‌ها و سایر برنامه‌های کامپیوتری کتاب می‌باشند می‌توانند برای راهنمایی یا دریافت دیسک مربوطه با ناشر و یا مولف کتاب مکاتبه نمایند.

- مدل SMADA

برنامه SMADA که مخفف Stormwater Management and Design Aid می‌باشد در محیط windows تهیه شده و برای محاسبات هیدروگراف سیل از روی داده‌های فیزیکی حوضه آبریز ساخته شده است. این برنامه توسط Wanielista and Eaglin در دانشگاه فلوریدای مرکزی در آمریکا تهیه گردیده است.

- مدل DISTRIB

برنامه DISTRIB که مخفف کلمه Distributions می باشد برای محاسبات مربوط به توزیع های فراوانی وقوع در هیدرولوژی به روش های نرمال، لوگ-نرمال، پیرسون، لوگ-پیرسون، و گامبل تهیه شده است. این مدل نیز توسط Wanielista and Eaglin در دانشگاه فلوریدای مرکزی تهیه گردیده است.

- مدل REGRESS

مدل رگرسیون (Regression) با نام REGRESS برنامه ایست که در محیط ویندوز قابل اجراست و با آن می توان محاسبات همبستگی بین پارامترهای هیدرولوژی را به لحاظ آماری انجام داد.

- مدل PLOAD

برنامه PLOAD که مخفف Pollutant Load می باشد برای محاسبه انتقال رسوب و مواد آلاینده در حوضه های آبریز نوشته شده است.

- مدل OPSEW

مدل OPSEW برای محاسبات دبی طرح در مطالعات جمع آوری آبهای سطحی در داخل شهرها تهیه گردیده است.

- مدل TCCALC

برنامه فوق در محاسبه زمان تمرکز به روش های مختلف مورد استفاده دارد. این برنامه نیز در محیط ویندوز اجرا می شود.

- مدل HMS

مدل HMS که یکی از تولیدات موسسه HEC می باشد (HEC-HMS) برای مدل سازی سیستم های هیدرولوژی بوده و این توانائی را دارد که در محیط اطلاعات جغرافیایی (GIS) اطلاعات را تجزیه و تحلیل نماید. نسخه پیشرفته این مدل تحت عنوان GIS-HMS در طراحی سیستم های هیدرولوژی بسیار کارایی دارد.

- مدل HEC-RAS

این مدل نیز توسط مرکز مهندسی هیدرولوژی وابسته به گروه مهندسان مشاور ارتش آمریکا تهیه شده و برای تحلیل سیستم های رودخانه (River Analysis system) می باشد.

- مدل MODFIOW

این مدل برای تحلیل جریان آب زیرزمینی مورد استفاده قرار می گیرد.

- مدل HEC-FDA

مدل فوق برای تحلیل خسارات ناشی از سیل (Flood Damage Analysis) ساخته شده است.

– مدل HEC-RESSIM

مدل مذکور برای شبیه‌سازی عملکرد مخازن آب می‌باشد.

مدل‌های پیشرفته دیگری نیز توسط موسسات هیدرولوژی دنیا نیز نوشته‌اند که از جمله می‌توان به مدل‌های موسوم به MIKE اشاره کرد که توسط موسسه هیدرولوژی دانمارک تهیه و ارائه شده است. اما باید به این نکته نیز اشاره شود که یکی از محدودیت‌ها و شاید بتوان گفت عیب مدل‌های رایانه‌ای در هیدرولوژی این است که این تصور را بوجود آورده‌اند که نتیجه‌ای که از یک مدل کامپیوتری حاصل می‌شود حتماً صحیح و دقیق می‌باشد. حال آنکه ممکن است در پاره‌ای موارد این نتیجه‌گیری صحیح نباشد. البته باید قبول کرد که مدل و کامپیوتر در هیدرولوژی عصر جدیدی را بوجود آورده‌اند و اگر داده‌های مورد نیاز مدل‌ها به نحو صحیحی تهیه و به آن داده شود به همان نسبت نتایج حاصله دقیق‌تر خواهد بود. اما در غیر این صورت نتایج حاصله از مدل نیز مطلوب نخواهد بود و به اصطلاح از کوزه برون همان تراود که در اوست (garbage in, garbage out). با این حال امروزه کمتر طرح مهم هیدرولوژیکی را می‌توان در دنیا سراغ گرفت که در آن به نحوی از کامپیوتر و یا مدل‌های کامپیوتری استفاده نشده باشد بطوری که به جرأت می‌توان گفت امروز هیدرولوژی در چهار واژه "انسان، مدل، روش و کامپیوتر" خلاصه می‌شود. ولی همیشه باید به این نکته توجه داشت که مدل نیز ساخته دست بشر است و می‌تواند اشتباه باشد. لذا به دانشجویان و مهندسان توصیه می‌شود که سعی کنند مسائل هیدرولوژی را حتی یکبار هم که شده است بجای مدل با دست محاسبه کنند تا اولاً به محاسبات خود اطمینان پیدا کنند و ثانیاً با زوایای کار آشنا شوند.

## ۹-۱ پایگاههای داده‌های و اطلاعات

گرچه امروزه دسترسی به پایگاههای اینترنتی برای کسب اطلاعات و داده‌های هیدرولوژی بسیار آسان می‌باشد ولی لازم به ذکر است که تقریباً هیچ گونه اطمینانی بر صحت این اطلاعات وجود ندارد. کانال‌های اطلاعات سنتی مانند کتابها یا مجلات علمی قبل از چاپ توسط داوران مورد ارزیابی و بررسی قرار می‌گیرد ولی این کار برای بسیاری از پایگاههای اینترنتی انجام نمی‌پذیرد. بنابراین هر اطلاعاتی را که از اینترنت دریافت می‌کنید با احتیاط با آن برخورد کرده و قبل از استفاده آن را بررسی و مورد ارزیابی قرار دهید. با این وجود نمی‌توان اهمیت و مفید بودن بسیاری از پایگاههای اطلاعات هیدرولوژیکی را انکار کرد و لذا به دانشجویان و افرادی که دسترسی به اینترنت دارند توصیه می‌شود به این پایگاهها مراجعه و از اطلاعات مفیدی که در



آنهاست حداکثر استفاده را بنمایند. در زیر آدرس برخی از این پایگاهها جهت اطلاع ارائه می شود.

<http://www.cig.ensmp.fr/~iahs>

انجمن بین المللی علوم هیدرولوژی (IAHS): یکی از پایگاههای مفید است که هدف آن توسعه علم هیدرولوژی در بین علاقمندان رشته های هیدرولوژی، ژئودزی و ژئوفیزیک می باشد.

<http://www.cig.ensmp.fr/~hubert/glu/aglo.htm>

این پایگاه نیز بخشی از سایت IAHS بوده و محتوی فرهنگ اصطلاحات هیدرولوژی به زبان های مختلف است.

<http://www.worldwater.org>

در این سایت که بنام پایگاه جهانی آب معروف بوده و توسط موسسه مطالعات توسعه و محیط زیست در منطقه اقیانوس آرام راه اندازی شده است اطلاعات جامع و مفیدی در زمینه آب ارائه می گردد.

<http://www.uwin.siu.edu>

این پایگاه مربوط به شبکه اطلاعات آب است که توسط دانشگاههای آمریکا برای اطلاع رسانی در زمینه منابع آب راه اندازی شده است.

<http://www.catchment.crc.org.au>

پایگاه مذکور بنام مرکز همکاری های تحقیقاتی در زمینه حوضه های آبریز معروف بوده و توسط موسسات تحقیقاتی استرالیا راه اندازی شده است. اطلاعات موجود در این سایت بیشتر در زمینه مدیریت حوضه های آبریز متمرکز است

<http://www.watsys.sr.unh.edu>

این سایت متعلق به گروه تحلیل سیستم های آبی وابسته به دانشگاه نیوهمشایر آمریکا بوده و در آن اطلاعات مربوط به طرح های هیدرولوژی در مقیاس های مختلف ارائه می شود. علاوه بر آن با وارد شدن به این پایگاه می توان از امکانات ارتباط (link) با سایر پایگاهها استفاده کرد.

<http://www.hydrology.org.uk>

پایگاه انجمن هیدرولوژی انگلیس بوده و در آن امکان برقراری ارتباط با سایر پایگاهها که عمدتاً مربوط به انگلیس می باشند فراهم می باشد.

<http://www.cof.orst.edu/cof/fe/watershed>

پایگاه فوق مربوط به تیم هیدرولوژی حوضه های آبریز در دانشگاه ایالتی اورگان امریکاست و اطلاعات بسیار مفیدی را در زمینه آخرین پژوهشهای هیدرولوژیکی ارائه می کند.

<http://www.nwl.ac.uk/ih>

این پایگاه وابسته به مرکز هیدرولوژی و اکولوژی انگلیس است که قبلاً با نام انستیتوی هیدرولوژی معروف بود. با وارد شدن به این سایت امکان برقراری ارتباط با سایر پایگاههای هیدرولوژی در سطح جهان فراهم است.

<http://water.usgs.gov>

بخش منابع آب سازمان زمین شناسی آمریکا (USGS) بوده و اطلاعات ارزشمندی در زمینه آبهای زیرزمینی، آبهای سطحی و کیفیت آب در اختیار قرار می دهد.

<http://ghrc.msfc.nasa.gov>

سازمان ناسا (NASA) در آمریکا پایگاه موسوم به مرکز منابع هیدرولوژی جهانی را طراحی و در آن اطلاعاتی را که عمدتاً در زمینه داده های سنجش از دور و استفاده از آنها در هیدرولوژی جهانی است ارائه می کند.

[http://daac.gsfc.nasa.gov/campaign\\_docs/hydrology](http://daac.gsfc.nasa.gov/campaign_docs/hydrology)

یکی دیگر از سایت های وابسته به سازمان ناسا که در آن برخی از اطلاعات آرشیو فنی مرکز پردازش های فضائی گودارد (Goddard) در رابطه با هیدرولوژی جهانی در دسترس قرار داده شده است. علاوه بر سایت های بین المللی که در بالا به برخی از آنها اشاره شد اخیراً در ایران نیز پایگاههای اطلاعات آب و هیدرولوژی توسط موسسات و مراکز عمدتاً دولتی راه اندازی شده اند که بعضاً اطلاعات مفید و قابل استفاده برای هیدرولوژیست ها در آن موجود است از جمله این سایت ها عبارتند از:

[www.irimet.net](http://www.irimet.net)

این سایت مربوط به سازمان هواشناسی کشور می باشد و در آن دسترسی به برخی اطلاعات و برخی داده های هواشناسی مانند آمار روزانه، نقشه های هواشناسی، تصاویر ماهواره ای، پیش بینی های هواشناسی و مقدار بارندگی فراهم می باشد.

[www.moe.or.ir](http://www.moe.or.ir)

این سایت مربوط به وزارت نیرو می باشد که علاوه بر اطلاعات کلی امکان برقراری ارتباط با سایر پایگاهها از قبیل شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، کتابخانه، سیستم اطلاعات جغرافیائی، و شرکت های تابعه وزارت نیرو در آن فراهم می باشد.

[www.wrm.or.ir](http://www.wrm.or.ir)

شرکت سهامی مدیریت منابع آب اقدام به راه اندازی پایگاه اطلاعات فوق نموده که از این سایت می توان اطلاعات لازم در زمینه آمار پایه، قوانین و مقررات، اسنادهای آب را دریافت کرد.

[www.irandoc.ac.ir](http://www.irandoc.ac.ir)

از سایت مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران با آدرس فوق می توان به مقالات، پایان

نامه‌ها و طراحی‌های پژوهشی که در زمینه هیدرولوژی نوشته و اجرا شده‌اند دسترسی پیدا کرد.

www.irncid.org

سایت فوق مربوط به کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران بوده و در آن اطلاعات کلی مربوط به این سازمان و برخی کتب و نشریات فراهم می‌باشد.

پایگاه‌های اطلاعات هیدرولوژیکی دیگری نیز موجود می‌باشند که ذکر نام آن‌ها به درازا می‌کشد.

## ۱۰-۱ واحدهای اندازه‌گیری در هیدرولوژی

در هیدرولوژی سروکار ما با مقادیر کمی آب و مواد معلق و محلول در آن است. واحدهایی که برای این منظور بکار می‌رود یا در سیستم متریک و یا در سیستم انگلیسی است که در جدول ۱-۶ ارائه شده است. مقادیر حجم تبخیر، بارندگی، نفوذ و رواناب یک حوضه معمولاً بر حسب معادل حجم استوانه‌ای که سطح قاعده آن برابر مساحت حوضه باشد سنجیده می‌شود. در این صورت چون مساحت حوضه همیشه ثابت است، تنها به ذکر ارتفاع یا عمق این استوانه اکتفا می‌شود. مثلاً اگر مساحت یک حوضه آبریز ۵۰۰ متر مربع و حجم بارندگی روی این حوضه ۲۰ متر مکعب باشد در این صورت این حجم معادل حجم استوانه‌ای به مقطع ۵۰۰ متر مربع و ارتفاع ۰/۰۴ متر (۴۰ میلی‌متر) خواهد بود و چون سطح حوضه ثابت است گفته می‌شود که ارتفاع بارندگی روی این حوضه ۴۰ میلی‌متر است. حجم رواناب و تبخیر و نفوذ نیز به همین صورت سنجیده می‌شوند. با توجه به این که هیدرولوژی در سال‌های اخیر در کشورهای انگلیسی زبان رشد بیشتری داشته است هنوز اکثر واحدهای اندازه‌گیری در هیدرولوژی واحدهای انگلیسی است.

### ● مثال ۵-۱

حجم کل بارندگی روی پهنه ایران با مساحت ۱۶۴۸۰۰۰ کیلومتر مربع سالانه معادل ۴۱۳ میلیارد متر مکعب تخمین زده می‌شود. متوسط بارندگی روی کشور چند میلی‌متر می‌باشد.

حل

$$1648000 \text{ km}^2 = 1.648 \times 10^{12} \text{ m}^2 = \text{مساحت کشور}$$

$$413 \times 10^9 = \text{حجم بارندگی}$$

$$\text{مساحت} / \text{حجم} = \text{عمق بارندگی}$$

$$0.251 \text{ m} = (413 \times 10^9) / (1.648 \times 10^{12}) = \text{عمق بارندگی}$$

$$251 \text{ mm} = 0.251 \times 1000 = \text{عمق بارندگی}$$



برای حجم آب بخصوص در دریاچه‌ها واحدهایی مانند متر مکعب و یا هکتار-متر بکار برده می‌شود. هکتار-متر معادل حجم آب استوانه‌ای است که سطح قاعده آن یک هکتار و عمق آن یک متر باشد. در سیستم انگلیسی برای حجم آب در هیدرولوژی از واحدهایی مانند گالن (۳/۷۵ لیتر) و فوت - مکعب - روز (sfd یا حجم معادل جریان یک فوت مکعب در ثانیه در طول یک روز) و ایکر-فوت (acer-foot) استفاده می‌شود. هر ایکر ۴۳۵۶۰ فوت مربع و هر فوت ۳۰/۴۸ سانتی متر است. لذا ایکر - فوت معادل حجم آب استوانه‌ای است که مساحت آن یک ایکر و عمق آن یک فوت باشد.

در سیستم انگلیسی برای عمق بارندگی و تبخیر از واحد اینچ استفاده می‌شود. هر اینچ معادل ۲/۵۴ سانتی متر (۲۵/۴ میلی متر) و یا ۰/۰۸۳ فوت می‌باشد (هر فوت ۱۲ اینچ است). برای مساحت حوضه‌ها در سیستم انگلیسی از واحد میل مربع استفاده می‌شود. با توجه به این که هر میل معادل ۱/۶۰۹ کیلومتر می‌باشد هر میل مربع برابر ۲/۵۹ کیلومتر مربع خواهد بود.

جدول ۶-۱ برخی واحدهای رایج اندازه‌گیری در هیدرولوژی

مقدار	واحد متریک	واحد انگلیسی
مساحت حوضه	هکتار (ha)، کیلومتر مربع ( $km^2$ )	ایکر (ac)، میل مربع ( $mi^2$ )
سطح دریاچه	هکتار (ha)، کیلومتر مربع ( $km^2$ )	ایکر (ac)، میل مربع ( $mi^2$ )
ارتفاع بارندگی	میلی متر (mm)، سانتی متر (cm)	اینچ (in)
شدت بارندگی	میلی متر بر ساعت (mm/hour)	اینچ بر ساعت (in/hour)
	میلی متر در ماه (mm/month)	اینچ در ماه (in/month)
	میلی متر در روز (mm/day)	اینچ در روز (in/day)
شدت تبخیر	میلی متر در ماه (mm/month)	اینچ در ماه (in/month)
	میلی متر در سال (mm/year)	اینچ در سال (in/year)
	میلی متر در ساعت (mm/hour)	اینچ در ساعت (in/hour)
سرعت نفوذ	میلی متر در ساعت (mm/hour)	اینچ در ساعت (in/hour)
	میلی متر در ماه (mm/month)	اینچ در ماه (in/month)
	میلی متر در سال (mm/year)	اینچ در سال (in/year)
حجم آب	متر مکعب ( $m^3$ )	فوت مکعب ( $ft^3$ )
	هکتار-متر (ha-m)	ایکر - فوت (ac-ft)
دبی جریان*	متر مکعب بر ثانیه ( $m^3/s$ , cms)	فوت مکعب بر ثانیه ( $ft^3/s$ , cfs)
سرعت جریان	متر بر ثانیه (m/s)	فوت بر ثانیه (ft/s)
مصرف سرانه آب	لیتر در روز (l/day)	گالن در روز (gal/day)

\* برای واحدهای متر مکعب بر ثانیه (cms) و فوت مکعب بر ثانیه (cfs) به ترتیب از واژه‌های اختصاری کیومک (cumec) و کیوسک (cusec) نیز استفاده می‌شود.

## ● مثال ۱-۶

طی یک دوره ۳۰ روزه جریانی معادل ۵ متر مکعب در ثانیه وارد یک مخزن آب شده و در همین مدت ۱۳۶ میلیون گالن در روز آب از آن خارج شده است. مقدار تبخیر از سطح مخزن طی این مدت ۹/۴ سانتی متر بوده است. سطح مخزن بطور متوسط ۳/۷۵ کیلومتر مربع و مقدار آب موجود در ابتدای این دوره ۳۰ روزه ۱۲۵۶۰ ایکر-فوت بوده است. در انتهای دوره ۳۰ روزه حجم آب موجود در مخزن چند متر مکعب و چند ایکر-فوت می باشد.

## حل

اگر حجم اولیه آب در مخزن  $S_1$ ، مقدار جریان ورودی  $I$ ، جریان خروجی  $W$ ، و مقدار تبخیر  $E$  باشد حجم آب در مخزن در انتهای دوره ( $S_2$ ) برابر خواهد بود با:

$$S_2 = S_1 + I - W - E$$

$$S_1 = (12560 \text{ ac} \cdot \text{ft}) (43560 \text{ ft}^3/\text{ac} \cdot \text{ft}) (0.02832 \text{ m}^3/\text{ft}^3)$$

$$S_1 = 15494300 \text{ m}^3$$

$$I = (5.0 \text{ m}^3/\text{s} (30 \text{ days}) (86400 \text{ s/day}) = 12960000$$

$$W = (136000000 \text{ gal/day}) (0.003785 \text{ m}^3/\text{gal}) (30 \text{ day})$$

$$W = 15442800 \text{ m}^3$$

$$E = (3.75 \text{ km}^2) (9.4 \text{ cm}) (1000000 \text{ m}^2/\text{km}^2) (0.01 \text{ m/cm})$$

$$E = 352500 \text{ m}^3$$

$$S_2 = 15494300 + 12960000 - 15442800 - 352500$$

$$S_2 = 12659000 \text{ m}^3$$

$$S_2 = (12659000 \text{ m}^3) [(ac \cdot ft)/1234 \text{ m}^3] = 10260 \text{ ac} \cdot \text{ft}$$

در توصیف عناصر سیکل هیدرولوژی از واحدهای دیگر نیز استفاده می شود. مثلاً برای دما از واحد سلسیوس (سانتی گراد)، برای سرعت باد از واحد کیلومتر در روز، میل در روز و یا نات (گره) و یا برای تابش واحدهایی مانند کالری بر سانتی متر مربع در دقیقه، یا معادل میلی آب قابل تبخیر در روز استفاده می شود که در جای خود در مورد آنها بحث خواهد شد.

## مسائل

۱-۱ یک مخزن آب در اول ماه دارای وسعتی معادل ۱۶۴۰ هکتار بوده است. در پایان ماه سطح مخزن به اندازه ۱/۱ متر افت پیدا می کند در حالی که در همین ماه میزان بارندگی ۲۸ سانتی متر و تبخیر از سطح آب ۲۲ سانتی متر بوده است. علاوه بر آن

- جریانی معادل ۰/۶۴ متر مکعب در ثانیه بطور دائم وارد این مخزن شده و جریانی برابر  $Q$  متر مکعب در ثانیه از مخزن خارج شده است. دبی خروجی ( $Q$ ) از مخزن را حساب کنید.
- ۲-۱ مقادیر جریان ورودی و خروجی در یک مخزن آب به ترتیب ۱۸ و ۷ متر مکعب در ثانیه است. حجم آب موجود در مخزن در ساعت ۸ صبح یک روز معادل ۲۳۰ هکتار - متر بوده است. حجم آب موجود در مخزن را در ساعت ۲ بعد از ظهر روز بعد حساب کنید.
- ۳-۱ بارانی به شدت ۱۲ میلی متر در ساعت بمدت ۲ روز روی حوضه‌ای به مساحت ۲/۵ کیلومتر مربع ریزش کرده است. حجم بارندگی را بر حسب هکتار - متر و میلیون متر مکعب محاسبه کنید.
- ۴-۱ جریانی با شدت ۳/۵ متر مکعب در ثانیه وارد مخزن یک سد با مساحتی معادل ۸ کیلومتر مربع می‌شود. برای آنکه سطح مخزن به اندازه ۱۰ سانتی متر افزایش پیدا کند چه مدت زمان وقت لازم خواهد بود.
- ۵-۱ با توجه به ارقام جدول ۲-۱ و شکل ۲-۱ زمان مبادله آب اقیانوس‌ها را در سیکل هیدرولوژی محاسبه کنید.
- ۶-۱ مساحت یک حوضه آبریز ۷۷۷۰۰ هکتار و متوسط بارندگی سالانه روی آن ۸۱۲ میلی‌متر است. حدود ۲۵ درصد از بارندگی از طریق رودخانه به انتهای حوضه می‌رسد. متوسط جریان آب رودخانه را بر حسب واحدهای زیر محاسبه کنید.
- الف - متر مکعب در سال ( جواب  $1.58 \times 10^8$  )  
 ب - متر مکعب در ثانیه ( جواب 5.0 )  
 ج - فوت مکعب در ثانیه ( جواب 176.6 )  
 د - ایگر - فوت در سال ( جواب 127900 )
- ۷-۱ متوسط جریان آب خروجی از یک منطقه طی ۷ روز هفته به ترتیب ۴۶۳۰، ۷۶۲۰، ۷۲۹۰، ۵۶۴۰، ۴۱۱۰، ۲۵۸۰ و ۴۰۸۰ فوت مکعب در ثانیه بوده است. حساب کنید حجم آب خارج شده از منطقه را بر حسب واحدهای:
- الف - sfd یا فوت مکعب - روز ( جواب ۳۵۹۵۰ )  
 ب - ایگر - فوت ( جواب ۷۱۳۰۶ )  
 متوسط دبی آب خارج شده از منطقه در طول هفته بر حسب واحدهای زیر چقدر است.
- الف - فوت مکعب در ثانیه ( جواب ۵۱۳۶ )  
 ب - متر مکعب در ثانیه ( جواب ۱۴۵ )
- ۸-۱ با در نظر گرفتن ارقام جدول ۲-۱ و شکل ۲-۱ متوسط بارندگی سالانه روی خشکی‌های جهان و متوسط بارندگی سالانه روی کره زمین را بر حسب میلی‌متر محاسبه کنید.



۹-۱ سطح دریاچه ارومیه حدود ۵۵۰۰ کیلومتر مربع است. عمق متوسط این دریاچه نیز ۶ متر می باشد. چنانچه تبخیر سالانه از سطح دریاچه معادل ۱۲۰۰ میلی متر باشد، چند سال طول می کشد تا آبی معادل حجم دریاچه تبخیر شده و وارد اتمسفر گردد.  
(جواب ۵ سال)

۱۰-۱ در یک حوضه آبریز که وسعت آن ۲۵۰۰ کیلومتر مربع است مقدار بارش سالانه ۳۴۰ میلی متر در سال می باشد. از این حوضه جریانی معادل ۴/۷۶ متر مکعب در سال خارج می شود. ضریب تبدیل بارندگی به رواناب در این حوضه چقدر است؟  
(جواب ۰/۱۷۶)

### منابع برای مطالعه بیشتر

- 1- Chow, V.T., *Handbook of applied hydrology*, McGraw-Hill book Co. Ltd. New York, 1964.
- 2- Das, G., *Hydrology and Soil conservation engineering*, Prentice Hall of India, New Delhi, 2002.
- 3- Davie, T., *Fundamentals of hydrology*, Routedage pub. London, 2002.
- 4- Gray, D., *Handbook on the principles of hydrology*, National Research Council of Canada, Ottawa, 1970.
- 5- Menizer, O., *Hydrology*, Dover Inc, New York, 1970.
- 6- Mutreja, K.N., *Applied hydrology*, Tata McGraw-Hill pub. Co., New Delhi, 1990.
- 7- Patra, K.C., *Hydrology and Water resources engineering*, Alpha science Int. Ltd, Pangbourne, UK, 2001.
- 8- Show, E., *Hydrology in practice*, Van Nostrand Reinhold, London, UK, 1988.
- 9- Todd, D., *Ground water hydrology*, Wiely and Sons Inc, New York, 1980.
- 10- Viessman, W. et al, *Introduction to hydrology*, IEP, New York, 1972.
- 11- Wanielista, M., Kersten, R. and R. Eaglin, *Hydrology: Water quality and quality control*, John Wiley and Sons, New York, 1997.
- 12- Ward, A. D., and W. Elliot, *Environmental hydrology*, Lewis Pub. CRC, New York, 1995.
- 13- Wilson, E., *Engineering hydrology*, Mac Millan pub. Co. London, 1984.
- 14- Wurbs, R. and W. P. James, *Water resaercas engineering*, Prentice Hall of India, New Delhi, 2002.