نقدی بر برآورد بیلان منابع آب زیرزمینی در کشور ایران:
راهکارها و پیشنهادها

کد موضوعی: ۲۵۰
شماره مسلسل: ۱۵۸۳۳
اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۷

معاونت پژوهش‌های زیربنایی و امور تولیدی
دفتر: مطالعات زیربنایی

به‌نام خدا

فهرست مطالب

چکیده ۱
مقدمه ۲
تعریف مسئله ۴
سؤالات مطالعه ۴
ضرورت و اهداف انجام مطالعه ۵
روش مطالعه ۵
بخش اول ـ مرور برآورد بیلان آب زیرزمینی در سطح ملی (وضعیت موجود) ۷
مقدمه ۷
الف) قوانین و دستورالعمل‌های مرتبط با منابع آب زیرزمینی ۷
ب) تاریخچه برآورد بیلان آب زیرزمینی ۹
ج) ساختار حقوقی و نحوه تعامل بین نهادهای مختلف، مسئولیت‌ها و فرآیند کنترل و تضمین کیفیت در برآورد بیلان آب زیرزمینی ۱۰
د) مطالعات بیلان و مؤلفه‌های آن ۱۱
هـ) جایگاه بیلان در کارهای مبتنی‌بر آب ۱۶
جمع‌بندی ۱۸
بخش دوم ـ مرور برآورد بیلان آب زیرزمینی در سطح بین‌المللی ۱۹
الف) بررسی الگوهای پیشنهادی بین‌المللی برای برآورد بیلان آب زیرزمینی ۱۹
ب) بررسی رویکردها و اهداف کلان از برآورد بیلان آب زیرزمینی در سطح بین‌المللی ۳۲
ج) مزایا و آسیب‌شناسی الگوها در سطح بین‌المللی در برآورد بیلان آب زیرزمینی ۳۲
د) مرور و جمع‌بندی اجمالی بر اهم آموزه‌ها در مطالعات بین‌المللی برآورد بیلان ۳۷
بخش سوم ـ نقدی بر روش‌های رایج برآورد بیلان آب زیرزمینی کشور ۳۸
الف) مسائل، چالش‌ها و مشکلات برآورد بیلان آب زیرزمینی ۳۸
ب) تحلیلی بر آموزه‌های مهم از بررسی روش‌های برآورد بیلان آب زیرزمینی در سطح بین‌المللی و پیشنهاد مسیر تدقیق و بهبود روش برآورد بیلان آب زیرزمینی در کشور ۴۱
جمع‌بندی ۴۳
نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۴۳
منابع و مآخذ ۴۵

نقدی بر برآورد بیلان منابع آب زیرزمینی در کشور ایران: راهکارها و پیشنهادها

چکیده

منابع آب زیرزمینی در کشور به‌عنوان یکی از منابع مهم و اصلی برای تأمین نیازها در بخش‌های مختلف ازجمله کشاورزی، شرب و صنعت شناخته می‌شود. به جهت حفظ و توسعه پایدار منابع آب زیرزمینی، مدیریت علمی و مناسب این منابع لازم و ضروری است. در این راستا، ارزیابی صحیح و درست از منابع آب زیرزمینی موجود و در دسترس یکی از گام‌های مهم در راستای حرکت به سمت توسعه پایدار این منابع است و این امر مستلزم برآورد دقیق[۱] بیلان آب زیرزمینی می‌باشد. با توجه به محدوده مورد مطالعه، اندازه‌گیری و یا برآورد مؤلفه‌های بیلان منابع آب زیرزمینی همواره با خطا و عدم‌قطعیت‌هایی حتی در حد چند برابر همراه است، به‌طوری‌که در برآوردهای انجام شده بیلان منابع آب زیرزمینی در کشور و تخمین آب تجدیدپذیر و قابل برنامه‌ریزی، تفاوت‌های چندبرابری نیز ملاحظه می‌شود. ازاین‌رو ضرورت تدقیق بیلان با هدف ارزیابی صحیح از وضعیت فعلی این منابع و برنامه‌ریزی به جهت توسعه پایدار را دوچندان می‌کند. عدم توجه به رویکردهایی که در راستای تدقیق بیلان است و بی‌توجهی نسبت به بروزرسانی روش‌ها، فناوری‌ها، تجهیزات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری، موجب کاهش دقت تخمین آب قابل برنامه‌ریزی شده و سبب اتلاف سرمایه‌گذاری‌ها و تخصیص منابع در این حوزه می‌شود. در این مطالعه، تاریخچه برآورد بیلان در کشور و همچنین بررسی فرآیندها، مسیرها، ساختار حقوقی و فرآیند کنترل و تضمین کیفیت در برآورد بیلان آب زیرزمینی ارائه شده است. همچنین مطالعات در سطح بین‌المللی از منظر روش‌ها و رویکردهای رایج در برآورد بیلان و تجربیات کاربردی آن در کشورهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. با جمع‌بندی دو بخش، اهم مسائل، چالش‌ها و مشکلات برآورد بیلان در کشور معرفی شده و در نهایت راهکار و پیشنهادهایی به جهت تدقیق بیلان آب زیرزمینی ارائه شده است. راهکارهای پیشنهادی در دو سطح ساختاری و علمی کاربردی مطرح شده است. در بخش ساختاری، نظارت و ارائه ساختاری به جهت کنترل کیفیت برآورد بیلان مهم و ضروری است. ازاین‌رو، پیشنهاد ایجاد یک سازوکار مشخص برای بررسی و کنترل کیفیت برآورد بیلان در گروه «برآورد بیلان» وزارت نیرو ارائه شده است. همچنین پیاده‌سازی و ثبت آنلاین اندازه‌گیری‌های لازم در برآورد بیلان منابع آب زیرزمینی کشور و تشکیل بانک اطلاعاتی آنلاین و قابل دسترس پیشنهاد شده که از اهم

۱. عبارت «برآورد دقیق یا تدقیق» درواقع اصلاح روش‌شناسی مرسوم برای محاسبه بیلان است که منجر به ارائه نتایج با دقت مناسب و حدالامکان با به حداقل رساندن خطاها در اندازه‌گیری‌ها و کاهش منابع عدم‌قطعیت‌هاست.

وظایف وزارت نیرو و سازمان‌های متولی جمع‌آوری، ثبت و اندازه‌گیری داده‌ها است و باید در ردیف‌های بودجه‌ای آنها مورد توجه قرار گیرد. در سطح علمی کاربردی براساس بررسی مطالعات انجام شده ملی و بین‌المللی، لزوم توجه به دو مقیاس مکانی و زمانی، یکپارچه دیدن منابع آب زیرزمینی با منابع آب سطحی، تحلیل عدم‌قطعیت‌های موجود در برآورد بیلان با توجه به گستره وسیع اثرگذاری آن، بررسی و امکان‌سنجی استفاده از روش‌ها/رویکردهای نوین ازجمله سنجش از دور در برآورد برخی از پارامترهای بیلان با امکان کنترل و واسنجی نتایج کسب شده با داده‌های مشاهداتی و به‌کارگیری چارچوب حسابداری آب، به‌عنوان راهکارهای مهم جهت به حداقل رساندن خطاها و تدقیق برآورد بیلان پیشنهاد شده است. این موارد باید با تخصیص اعتبارات لازم در شرح وظایف سالانه سازمان‌های متولی مانند وزارت نیرو گنجانده شده و روند پیشبرد آنها کنترل شود. اصلاح روش‌شناسی حاضر با توجه به رویکردهای مدیریتی و در نظرگیری ابعاد اجتماعی، اقتصادی و سیاسی منابع آب، موجب ارزیابی صحیح و شناخت درست منابع خواهد شد و امکان برآورد واقعی‌تر منابع آب زیرزمینی در دسترس جهت برنامه‌ریزی‌های آتی را برای مدیران و برنامه‌ریزان فراهم خواهد کرد. در نهایت می‌توان گفت که دقت برآورد بیلان، ارتباط مستقیم با دقت برآورد مؤلفه‌های بیلان دارد و هرچه در تدقیق تخمین این مؤلفه‌ها، تلاش و هزینه شود، منجر به نتایج واقعی‌تر خواهد شد و این مهم، به تخصیص عادلانه‌تر سرمایه‌ها و نیروهای انسانی در راستای پیشرفت کشور خواهد انجامید.

مقدمه

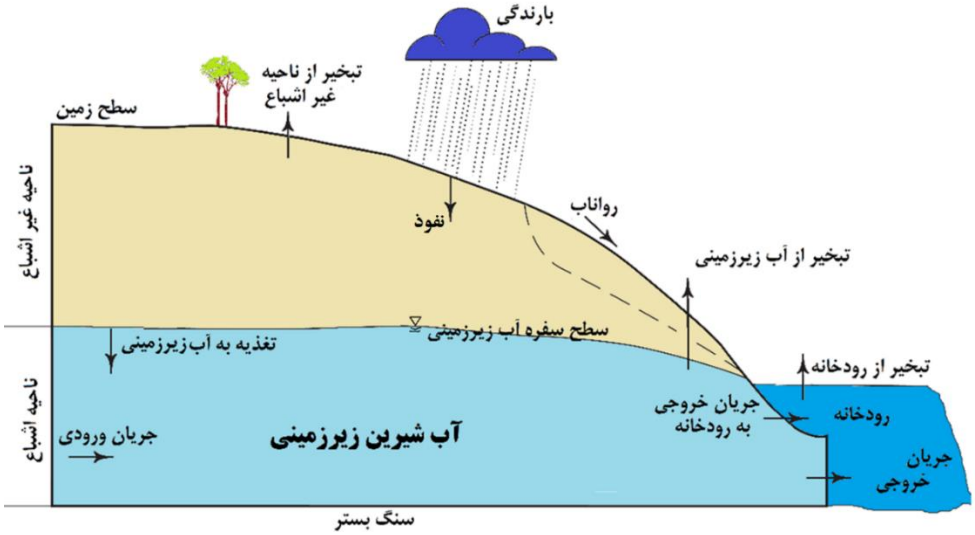
افزایش تقاضای آب برای مصرف‌کنندگان مختلف آب به دلایل گوناگونی ازجمله افزایش جمعیت، توسعه اقتصادی و توسعه اجتماعی موجب شده که بعضی از دشت‌های مهم کشور با افت شدید سطح آب زیرزمینی مواجه شوند. براساس آمار و اطلاعات ارائه شده تا انتهای سال ۱۳۹۵، تعداد ۴۸۷ هزار حلقه چاه مجاز دارای پروانه بهره‌برداری بوده که از این تعداد ۴۱۶ هزار حلقه چاه (۸۵ درصد) برای مصارف کشاورزی، ۴۹ هزار حلقه چاه (۱۰ درصد) برای مصارف صنعتی و ۲۲ هزار حلقه چاه (۵ درصد) برای مصارف شهری را شامل می‌شود. (فاضلی، ۱۳۹۶)

بهره‌برداری مناسب از منابع آب زیرزمینی نیازمند مدیریتی است که با توجه به ویژگی‌های کمّی‌وکیفی این منابع، بتواند قابلیت آنها را از نظر توسعه یا اعمال محدودیت بهره‌برداری قبل از ایجاد وضعیت نامطلوب یا بحرانی تعیین و از بروز خسارات جبران‌ناپذیر جلوگیری کند. لذا مقوله مهم توسعه پایدار منابع آب زیرزمینی مطرح می‌شود. مسئله کلیدی در توسعه پایدار منابع آب زیرزمینی، مدیریت علمی و مناسب این منابع است. این مهم، نیازمند ارزیابی صحیح و درست از منابع آب زیرزمینی موجود و در دسترس است. در جهت توسعه پایدار این منابع، بهره‌برداری پایدار ضروری بوده و این امر مستلزم

مطالعات برآورد صحیح بیلان آب زیرزمینی است که اهمیت آن را در این حوزه نشان می‌دهد. این مسئله، به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند کشور ایران از اهمیت فراوانی برخوردار است. در شکل ۱ اجزای اصلی بیلان منابع آب زیرزمینی نشان داده شده است.

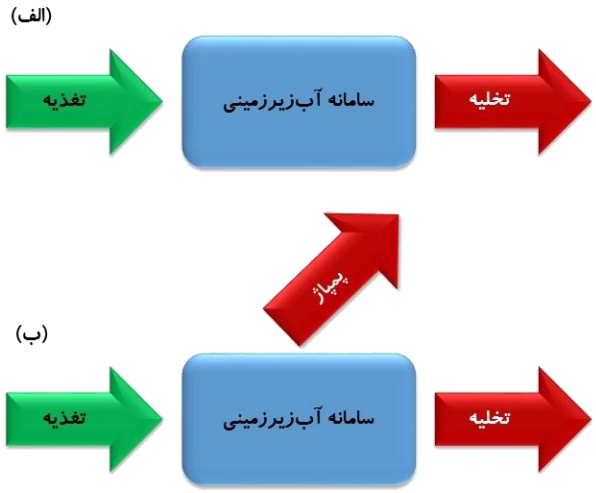
مفهوم بیلان آب توسط چارلز وارن تورنتوایت در سال ۱۹۴۴ برای نمایش ارتباط بین ورودی‌ها (بارش و تبادلات بین حوضه‌ای، بین سطحی و زیرسطحی) و خروجی‌های هیدرولوژیکی (تبخیر، نفوذ به عمق و جریانات سطحی خروجی از سامانه) وارد ادبیات دانش هیدرولوژی شد. از زمان پیدایش و به‌کارگیری مفاهیم بیلان در مطالعات منابع آب، محاسبات بیلان منابع آب زیرزمینی نیز در مطالعات مختلفی مورد بررسی قرار گرفت. اما در این میان، مطالعات افرادی ازجمله تایس (۱۹۴۰)، براون (۱۹۶۳) و بردهافت و یانگ (۱۹۷۳)، پایه‌ریز مفاهیم اصلی بیلان در منابع آب زیرزمینی بودند.

شکل ۱. شمایی از اجزای بیلان منابع آب زیرزمینی



سازمان زمین‌شناسی آمریکا (۱۹۹۹) با بیان این‌که در شرایط عدم توسعه و بهره‌برداری (شرایط طبیعی) (شکل ۲ - الف)، یک سیستم آب زیرزمینی در بلندمدت در شرایط پایدار قرار دارد و حجم آب ورودی به آن (تغذیه) با حجم آب خروجی از آن (تخلیه)، به‌طور میانگین در یک بازه زمانی، تقریباً برابر است، به دسته‌بندی پارامترهای اصلی بیلان شامل ورودی‌ها و خروجی‌ها پرداخته است. در حالت بهره‌برداری، این وضعیت متفاوت خواهد شد و در بلندمدت به تعادل خواهد رسید (شکل ۲ - ب).

شکل ۲. پارامترهای اصلی بیلان در یک سامانه منابع آب زیرزمینی: الف) شرایط عدم توسعه (شرایط طبیعی) و ب) شرایط توسعه و بهره‌برداری



تعریف مسئله

مطالعات برآورد بیلان، نیازمند شناخت و نحوه برآورد مؤلفه‌های آن است. به جهت برآورد صحیح بیلان منابع آب زیرزمینی، با توجه به ورودی‌ها و خروجی‌ها و عدم‌قطعیت‌هایی که در تخمین برخی از مؤلفه‌ها وجود دارد، لزوم بررسی دقت روش یا روش‌های رایج در کشور و نیز مقایسه آنها با الگوهای بین‌المللی نوین با نگاهی نقادانه و پیشنهادمحور برای بهبود برآوردها ضروری است. لذا در این مطالعه ضمن تبیین اهمیت برآوردهای صورت گرفته برای بیلان آب زیرزمینی دشت‌های کشور، تأثیر دقت این برآوردها در برنامه‌ریزی‌ها مورد تأکید قرار می‌گیرد و برپایه بررسی مقایسه‌ای تجربیات بین‌المللی در این زمینه، راهکارهایی در جهت تدقیق و بهبود این برآوردها ارائه شده و به ابعاد مختلف آن نیز پرداخته می‌شود. گنجانده شدن لزوم پیاده‌سازی این راهکارها در سازمان‌های موظف مانند وزارت نیرو و تخصیص اعتبارات مالی لازم در ردیف‌های بودجه‌ای آنها در مجلس شورای اسلامی از مسائل مورد بحث در نوشتار حاضر است.

سؤالات مطالعه

سؤالات مورد نظر که در راستای این مطالعه ارائه شده است را می‌توان به‌شرح زیر خلاصه کرد:

- اهمیت برآورد بیلان آب زیرزمینی در کشور چیست؟
- آیا روش‌های رایج برآورد بیلان آب زیرزمینی در کشور، بهترین و مناسب‌ترین روش‌ها هستند؟
- آیا تجربیات در سطح بین‌المللی در برآورد بیلان آب زیرزمینی می‌تواند بومی شده و موجب

تدقیق روش‌های رایج در کشور شود؟ چطور و با چه ابعاد علمی، اجرایی و اقتصادی؟

- در راستای تدقیق محاسبات بیلان آب زیرزمینی، مجلس شورای اسلامی چه نقشی می‌تواند در تخصیص ردیف‌های بودجه‌ای سازمان‌های متولی داشته باشد؟

ضرورت و اهداف انجام مطالعه

یک گام اصلی برای توسعه پایدار، در نظر گرفتن جایگاه و اهمیت بیلان آب در کشور به جهت برنامه‌ریزی است. در این راستا، برآورد بیلان منابع آب زیرزمینی با هدف ارزیابی وضعیت فعلی این منابع و برنامه‌ریزی برای توسعه به جهت توسعه پایدار این منابع از اهمیت بسیاری برخوردار است. این مسئله در آبخوان‌هایی که با بهره‌برداری بیش از حد مواجهند، به جهت داشتن یک تخمین جامع، دقیق و قابل اطمینان از بیلان آنها مهمتر است.

یکی از چالش‌های مهم پیش روی برآورد بیلان آب زیرزمینی، وجود عدم‌قطعیت‌ها در پارامترهای ورودی و خروجی به سبب تنوع خصوصیات خاک و ماهیت پیچیده حرکت آب در خاک است. ازجمله این عدم‌قطعیت‌ها می‌توان به عدم‌قطعیت موجود در اندازه‌گیری‌ها، برآورد میزان تغذیه، ضریب آب برگشتی از مصارف بخش‌های مختلف، ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان، قابلیت انتقال و ضریب ذخیره اشاره کرد.

این مطالعه می‌تواند نشانگر رئوس گام‌های مهمی به جهت توسعه پایدار این منابع ارزشمند از طریق ارائه راهکارها و پیشنهادهایی به جهت شناسایی و کاهش عدم‌قطعیت‌ها در مسیر ارزیابی درست این منابع ارزشمند باشد. در این راستا اهداف زیر مدنظر است:

- مرور برآورد بیلان آب زیرزمینی در سطح ملی،
- مرور برآورد بیلان آب زیرزمینی در سطح بین‌المللی،
- نقدی بر روش‌های رایج برآورد بیلان آب زیرزمینی کشور و ارائه راهکارها و پیشنهادها.

روش مطالعه

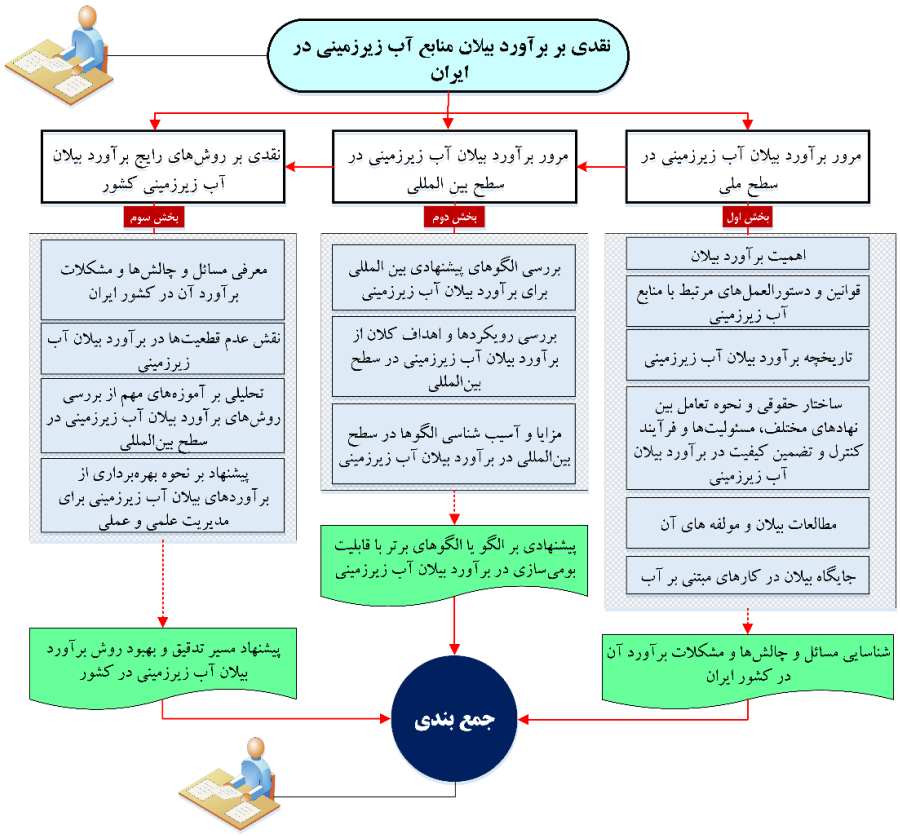
روش مطالعه، برمبنای مطالعات کتابخانه‌ای، تجزیه و تفسیر گزارش‌ها و مستندات موجود و در دسترس، مطابق با فرآیند ارائه شده در شکل ۳ است.

در بخش اول، اهمیت برآورد بیلان، مؤلفه‌های بیلان آب سطحی و زیرزمینی و جایگاه آن در کارهای مبتنی‌بر آب در کشور ایران بررسی می‌شود. همچنین در این بخش، اسناد بالادستی، قوانین و مقررات، ضوابط، آیین‌نامه‌ها، دستورالعمل‌ها، استانداردهای ملی مرتبط با بیلان مورد بررسی قرار گرفته

است. تاریخچه برآورد بیلان منابع آب زیرزمینی و همچنین بررسی فرآیندها، مسیرها، ساختار حقوقی، نحوه تعامل بین نهادهای مختلف، مسئولیت‌ها و فرآیند کنترل و تضمین کیفیت در برآورد بیلان آب زیرزمینی در کشور ایران، در این بخش بررسی شده است. خروجی این بخش بررسی مسائل، چالش‌ها و مشکلات برآورد بیلان در کشور ایران است.

در بخش دوم مطالعه، روش‌های برآورد بیلان آب زیرزمینی در سطح بین‌المللی مورد بررسی قرار گرفته است. در این بخش، ابتدا الگوهای پیشنهادی بین‌المللی برای برآورد بیلان آب زیرزمینی بررسی و سپس رویکردها و اهداف کلان از برآورد بیلان آب زیرزمینی مورد تحلیل قرار گرفته است. مزایا و آسیب‌شناسی الگوها در سطح بین‌المللی در برآورد بیلان آب زیرزمینی معرفی و در نهایت خروجی این بخش، الگوهای برتر با قابلیت بومی‌سازی در برآورد بیلان آب زیرزمینی را پیشنهاد می‌دهد.

شکل ۳. فرآیند انجام مطالعات



در بخش سوم این گزارش نقدی بر روش‌های رایج برآورد بیلان آب زیرزمینی کشور انجام شده است. براساس یافته‌های بخش اول و دوم، تحلیلی بر آموزه‌های مهم از بررسی روش‌های برآورد بیلان آب زیرزمینی در سطح بین‌المللی صورت گرفته است. شناسایی معضلات و کاستی‌های موجود در روش‌های رایج برآورد بیلان آب زیرزمینی در کشور براساس تجربیات بین‌المللی، به‌عنوان خروجی اصلی گزارش حاضر، مسیرها و پیشنهادهایی را در جهت تدقیق این برآوردها و کاهش دادن عدم‌قطعیت‌ها ارائه داده که می‌تواند در اسناد بالادستی کشور و تدوین سیاست‌های کلان حوزه آب زیرزمینی کشور ملحوظ شود و قوانین و اعتبارات مالی لازم برای پیشبرد آنها تخصیص یابد.

بخش اول ـ مرور برآورد بیلان آب زیرزمینی در سطح ملی (وضعیت موجود)

مقدمه

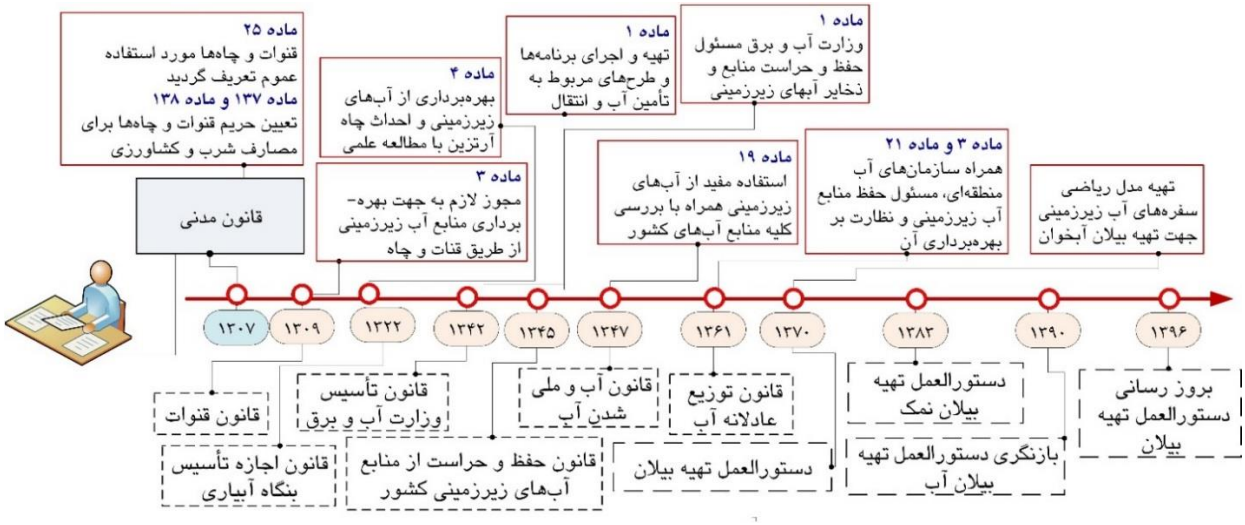
براساس بررسی‌های انجام شده و مستندات ارائه شده توسط دفتر نظام‌های بهره‌برداری و حفاظت آب و آبفا (۱۳۹۳)، سهم آب‌های زیرزمینی در تأمین آب بخش‌های مختلف کشاورزی، صنعت و شرب، به‌طور متوسط ۵۹ درصد نسبت به کل منابع آب است که این سهم در بعضی مناطق کشور بسیار بیشتر است. لذا مطالعات علمی و اصولی منابع آب زیرزمینی در تهیه بیلان این منابع به جهت برنامه‌ریزی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

الف) قوانین و دستورالعمل‌های مرتبط با منابع آب زیرزمینی

تاریخچه قوانین و دستورالعمل‌های مرتبط با منابع آب‌های زیرزمینی در شکل ۴ ارائه شده است. براساس بررسی مستندات موجود از قوانین و دستورالعمل‌ها، موضوع منابع آب‌های زیرزمینی در کشور، برای اولین بار ذیل قانون مدنی مصوب سال ۱۳۰۷ مطرح شد.

با بررسی قوانین و مقررات کشور (شکل ۴) از منظر آب‌های زیرزمینی و شناخت این منابع ملاحظه می‌شود که در این قوانین (۱۳۰۷ تا ۱۳۴۲)، تمرکز اصلی بر نحوه استفاده از منابع آب‌های زیرزمینی از طریق قنات و حفر چاه بوده و به شناخت سفره‌های آب زیرزمینی اشاره‌ای نشده است.

شکل ۴. تاریخچه قوانین و دستورالعمل‌های مرتبط با منابع آب زیرزمینی



قوانین و مقررات حفاظت از منابع آب زیرزمینی در ایران، در سال ۱۳۴۵ با عنوان قانون حفظ و حراست از منابع آب‌های زیرزمینی کشور وضع شد. پس از آن، قانون ۱۵ ماده‌ای حفظ و حراست از منابع آب‌های زیرزمینی کشور، برای مطالعه، شناسایی و حفاظت از منابع آب زیرزمینی، برنامه‌ای کلی ارائه کرد که وزارت آب و برق وقت، مسئول اجرای مواد این قانون شد.

قانون مدنی ایران به تبعیت از فقه اسلامی، آب‌ها را اموال مباحه و قابل تملک اشخاص تلقی کرده است و با تصویب قانون آب و نحوه ملی شدن آب در سال ۱۳۴۷، مقررات و اصول مدوّن برای بهره‌برداری از آب‌ها را تنظیم کرد. در ماده (۱۹) این قانون، به استخراج و استفاده مفید از آب‌های زیرزمینی همراه با بررسی تمامی منابع آب‌های کشوری تأکید شده است. حفر چاه و قنات، به جهت استفاده از منابع آب زیرزمینی، ذیل ماده (۲۳) این قانون منوط به صدور پروانه حفر از وزارت آب و برق وقت شده است تا وزارت مذکور با شناخت خصوصیات هیدروژئولوژی منطقه، نسبت به صدور پروانه حفاری اقدام کند.

اولین دستورالعمل تهیه بیلان آب در بهمن‌ماه براساس اصل چهل‌وپنجم قانون اساسی جمهوری اسلامی ایران، منابع آب زیرزمینی نیز مانند سایر منابع آبی به‌عنوان منبع آبی مشترک تعریف شد، که در اختیار حکومت اسلامی است تا طبق مصالح عامه از آنها بهره‌برداری شود. مسئولیت حفظ، اجازه و نظارت بر بهره‌برداری این منابع نیز به دولت (وزارت نیرو) محول شد. همچنین مطابق مواد (۳) و (۲۹) قانون توزیع عادلانه آب، مصوب سال ۱۳۶۱، وزارت نیرو به‌همراه سازمان‌های آب منطقه‌ای زیر نظر خود، مسئول حفظ منابع آب زیرزمینی و نظارت بر بهره‌برداری آن شد. به‌منظور اجرای این قانون، وزارت نیرو و وزارت جهاد کشاورزی با هم همکاری می‌کنند.

۱۳۷۰، توسط دفتر بررسی‌های منابع آب وزارت نیرو ارائه شد. تمرکز این دستورالعمل، به‌کارگیری

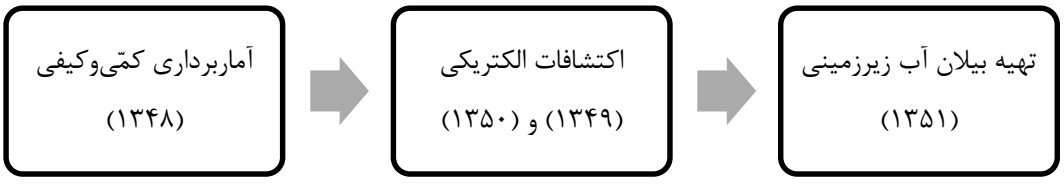
روش‌های ساده و بدون استفاده از روش‌هایی با اطلاعات وسیع یا روابط پیچیده بوده است. در این دستورالعمل، نحوه محاسبه بیلان آب حوضه آبریز و بیلان آب زیرزمینی آبخوان تشریح شده است. دفتر برنامه‌ریزی و مطالعات منابع آب وزارت نیرو، جهت شناخت و آگاهی از رفتار و عکس‌العمل آبخوان‌ها از طریق مدل ریاضی، دستورالعمل تهیه مدل ریاضی سفره‌های آب زیرزمینی را در سال ۱۳۷۰ ارائه داد تا بتوان بیلان آبخوان را از طریق مدل‌های ریاضی نیز تهیه کرد.

نسخه به‌روز شده این دستورالعمل در سال ۱۳۹۶ ارائه شده و تأکید بیشتری بر تحلیل‌های عدم‌قطعیت در مدل‌های آب زیرزمینی داشته است. امور آب وزارت نیرو با همکاری سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور در سال ۱۳۸۳، به ارائه دستورالعمل تهیه بیلان نمک اقدام کرد. در این دستورالعمل مواردی از بیلان کمّی که در برآورد بیلان کیفی تأثیرگذار بوده، مورد بحث قرار گرفته است. دستورالعمل تهیه بیلان آب در بهمن‌ماه ۱۳۷۰، توسط گروه تلفیق و بیلان دفتر مطالعات پایه منابع آب شرکت مدیریت منابع آب در سال ۱۳۹۰، مورد بازنگری قرار گرفت و دستورالعمل نحوه تهیه گزارش بیلان آب، محدوده‌های مطالعاتی در سطح حوضه‌های آبریز درجه ۲ (شکل ۳) ارائه شد که درحال حاضر مبنای تهیه گزارش‌های بیلان آبی است.

ب) تاریخچه برآورد بیلان آب زیرزمینی

براساس مستندات موجود و در دسترس، بررسی اسناد بالادستی، قوانین ارائه شده شامل قانون مدنی، قنوات، اجازه تأسیس بنگاه آبیاری، آب و نحوه ملی شدن آب و قانون حفظ و حراست از منابع آب‌های زیرزمینی کشور، پس از ابلاغ قانون ۱۵ ماده‌ای حفظ و حراست از منابع آب‌های زیرزمینی کشور در دهه ۴۰، مطالعات شناسایی آب‌های زیرزمینی توسط اداره کل آب‌های زیرزمینی وقت، با آماربرداری کمّی‌وکیفی آغاز شده است (۱۳۴۸). در ادامه، مطالعات هیدروژئولوژی از طریق اکتشافات الکتریکی طی دو مرحله (۱۳۴۹ و ۱۳۵۰) انجام شد و در نهایت، اولین بیلان آب زیرزمینی کشور توسط اداره کل آب‌های زیرزمینی وقت، در قالب گزارش نیمه‌تفصیلی آب‌های زیرزمینی در سال ۱۳۵۱ تولید شد. در شکل ۵ تاریخچه برآورد اولین بیلان منابع آب زیرزمینی کشور ارائه شده است.

شکل ۵. تاریخچه برآورد اولین بیلان منابع آب زیرزمینی کشور



اطلس منابع آب از مراجع اصلی ارائه اطلاعات منابع آب سطحی، زیرزمینی و هواشناسی بوده و دارای گزارش کامل و مجزای بیلان منابع آب است. براساس بررسی مستندات موجود، در دهه ۵۰، اطلس هیدروژئولوژی جنوب البرز به‌عنوان اطلس نمونه توسط اداره کل آب‌های زیرزمینی تهیه شد و از اوایل دهه ۶۰، تهیه اطلس منابع آب در مقیاس یک میلیونیم، در دستور کار دفتر بررسی‌های منابع آب وزارت نیرو قرار گرفت. این اطلس با این مقیاس قادر به ارائه بسیاری از اطلاعات در زمینه تغییرات کمّی‌وکیفی، مکانی و زمانی منابع آب نبود. ازاین‌رو، تهیه اطلس‌هایی با مقیاس بزرگ‌تر (۱:۲۵۰۰۰۰) در دستور کار قرار گرفت. در حال حاضر تهیه اطلس منابع آب توسط سازمان تحقیقات منابع آب دنبال می‌شود. آخرین گزارش اطلس منابع آب، همزمان در ۳۰ حوضه آبریز درجه ۲ کشور و براساس آمار و اطلاعات یک دوره ۴۰ ساله، (منتهی به سال آبی ۱۳۸۴-۱۳۸۵) تهیه شده و برای دوره منتهی به سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۰ در حال آماده‌سازی است.

ج) ساختار حقوقی و نحوه تعامل بین نهادهای مختلف، مسئولیت‌ها و فرآیند کنترل و تضمین کیفیت در برآورد بیلان آب زیرزمینی

برآورد بیلان آب زیرزمینی مستلزم وجود ساختار نظام‌مند در مسیر حقوقی و اداری سازمان مربوطه است تا در برنامه‌ریزی نهاد مربوطه قرار گرفته و در تعامل با سایر سازمان‌های مرتبط، فرآیند کنترل و تضمین کیفیت همواره اجرا شود. در شکل ۶ ساختار سازمانی مطالعات بیلان آب کشور ارائه شده است. در این ساختار، معاونت آب و آبفای وزارت نیرو به‌عنوان ستاد، شرکت مادرتخصصی مدیریت منابع آب ایران به‌عنوان متصدی فعالیت‌های وزارت نیرو، شرکت‌های آب منطقه‌ای و سازمان آب و برق خوزستان و همچنین ادارات امور آب شهرستان‌ها، در تهیه بیلان آب کشور نقش مهمی دارند. براساس ساختار ارائه شده، معاونت آب و آبفای وزارت نیرو مسئول سیاستگذاری، برنامه‌ریزی و نظارت بر بخش آب و فعالیت‌های شرکت مادرتخصصی است. همچنین براساس ماده (۷) اساسنامه شرکت مادرتخصصی، این شرکت وظایف تصدیگری وزارت نیرو یا به‌عبارتی معاونت آب و آبفا را در زمینه سازماندهی، راهبری و نظارت بر عملیات شرکت‌های آب منطقه‌ای برعهده دارد و تنها در فرآیند تصمیم‌سازی با معاونت آب و آبفا برای سیاستگذاری‌ها، برنامه‌ریزی‌ها و وضع مقررات و دستورالعمل‌ها همکاری می‌کند. (میرنظامی و باقری، ۱۳۹۶)

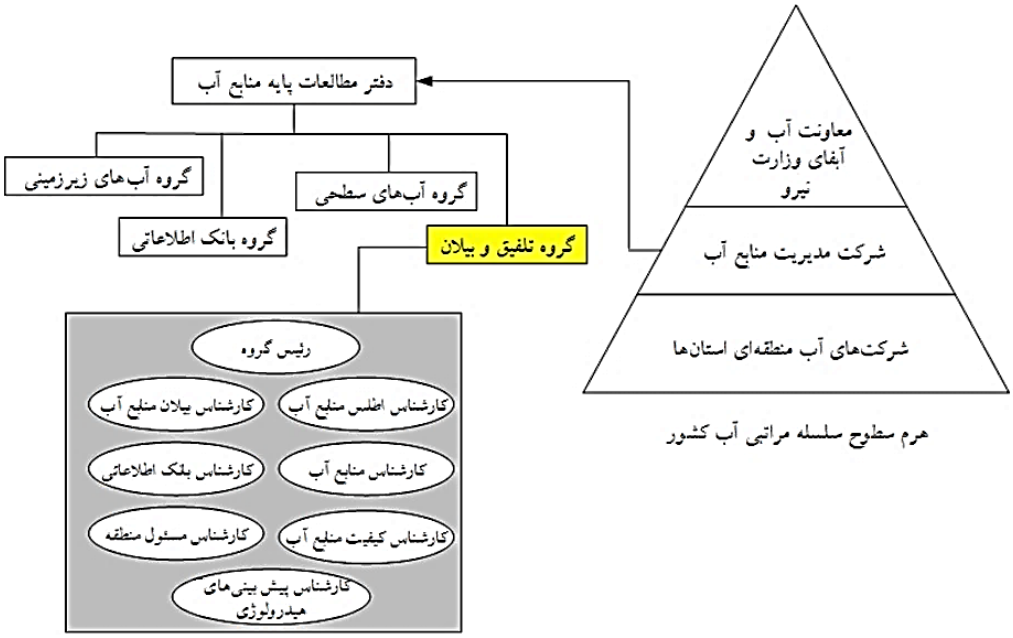
مطابق با ساختار ارائه شده در شکل ۶، مطالعات و برآورد بیلان آب، برعهده گروه تلفیق و بیلان در دفتر مطالعات پایه منابع آب شرکت مدیریت منابع آب کشور است که در این زمینه دستورالعمل‌های نحوه برآورد بیلان ارائه شده است. نظارت و کنترل کیفیت برآورد بیلان به شکل مشخصی در این ساختار گنجانده نشده است و در نظر گرفتن این مهم در اصلاح روش برآورد بیلان می‌تواند نقش مهمی داشته باشد.

د) مطالعات بیلان و مؤلفه‌های آن

بیلان آب از نظر مکانی در مقیاس حوضه‌های آبریز/محدوده‌های مطالعاتی و از نظر زمانی به‌صورت سالانه، ماهانه و در مقیاس‌های زمانی کوچک‌تر، محاسبه می‌شود. بیلان آب در یک پیکره آبی به عوامل مختلفی بستگی دارد و تاکنون پارامترهای مختلفی از رابطه بیلان در مراجع مختلف ارائه شده است. به‌طور کلی در یک سیستم، اصلی‌ترین پارامترهای بیلان، پارامترهای بارش (P)، جریانات ورودی سطحی و زیرسطحی به سیستم (Q_{in})، تبخیر و تعرق (ET)، جریانات خروجی سطحی و زیرسطحی از سیستم (Q_{out}) و میزان ذخیره در آبخوان (ΔS) هستند که این پارامترها قابلیت تفکیک به موارد جزئی‌تر را نیز دارند.

$$P + Q_{in} = ET + Q_{out} + \Delta S$$

شکل ۶. ساختار سازمانی مطالعات بیلان آب کشور



مطالعات بیلان، سه نوع بیلان آب: ۱. بیلان آب سطحی، ۲. بیلان آب زیرزمینی و ۳. بیلان عمومی، برای محدوده‌های مطالعاتی برآورد می‌کند. هر کدام از انواع بیلان، دارای مؤلفه‌های متناسب با شرایط هیدرولوژیکی خود هستند و ارتباط تنگاتنگی میان مؤلفه‌های انواع بیلان وجود دارد. بیلان آب محدوده‌های مطالعاتی کشور در مقیاس حوضه‌های آبریز درجه ۲ و در قالب پروژه‌های تهیه و یا بهنگام‌سازی اطلس‌های منابع آب تهیه و ارائه می‌شود که برای تهیه بیلان محدوده مطالعاتی، مطالعات پایه منابع آب شامل مطالعات هواشناسی، آب سطحی و آب زیرزمینی ضروری است. (دفتر مطالعات پایه منابع آب، ۱۳۹۰)

بیلان آب یک محدوده مطالعاتی بر اساس اصل بقای جرم و پیوستگی برآورد می شود که در آن لحاظ کردن تمامی ورودی‌ها و خروجی‌ها و مصارف منطبق با واقعیت‌های موجود، یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است. بر این اساس، تمامی آب‌هایی که در یک بازه زمانی معین وارد یک ناحیه خاص می‌شود، مصرف یا ذخیره شده و یا به طرق مختلف از آن ناحیه خارج می‌شود. به‌جهت اینکه، در مدیریت منابع آب، اغلب تصمیم‌گیری بر اساس نتایج مطالعات بیلان انجام می‌گیرد، لازم است تمامی اجزا و مؤلفه‌های بیلان با دقت بالایی مورد محاسبه قرار گیرند. یکی از عوامل بسیار مهم در دقت بیلان، آمار و اطلاعات و روش‌های استفاده شده در محاسبه و برآورد مؤلفه‌های بیلان است. این مؤلفه‌ها برای انواع بیلان در ادامه تشریح می‌شود.

۱. مؤلفه‌های بیلان آب سطحی

بیلان آب سطحی براساس داده‌های بلندمدت پارامترهای هواشناسی برای محدوده مطالعاتی تهیه می‌شود. مؤلفه‌های ورودی بیلان آب سطحی، بارش و آب زیرزمینی است. آب زیرزمینی از طریق چشمه‌ها و قنات وارد آب سطحی شده و میزان ورودی آن براساس دبی چشمه‌ها و قنات‌ها برآورد می‌شود. میزان بارش هم براساس نقشه هم‌باران سالانه محدوده مطالعاتی محاسبه می‌شود. این نقشه‌ها نیز براساس آمار باران سالانه ایستگاه‌های هواشناسی و تغییرات بارندگی به تفکیک ارتفاعات و دشت در دوره آماری شاخص ترسیم می‌شوند.

مؤلفه‌های خروجی بیلان آب سطحی، تبخیر و تعرق واقعی، رواناب و نفوذ است. میزان تبخیر و تعرق واقعی در کشور به تفکیک در سطح دشت و ارتفاعات براساس روش بیلان آبی ماهانه یا دوره‌ای تورنت وایت[1] و یا روش‌های دیگری از قبیل استفاده از آمار ایستگاه‌های تبخیر سنجی و سینوپتیک و منحنی‌های هم‌تبخیر محاسبه می‌شود. نفوذ و رواناب معمولاً به‌صورت بارندگی مؤثر یا مازاد بارندگی از تبخیر و تعرق واقعی، به تفکیک در سطح دشت و ارتفاعات برآورد می‌شود.

میزان رواناب ناشی از بارندگی با استفاده از اندازه‌گیری روزانه و لحظه رواناب در ایستگاه‌های آب‌سنجی و یا از طریق روابط منطقه‌ای یا تجربی تعیین می‌شود. همچنین میزان نفوذ ناشی از بارش با توجه به تمام شرایط ازجمله جنس، گسترش و درز و شکاف سازندهای سخت و یا نفوذپذیری آبرفت تعیین می‌شود. در اغلب موارد به جهت عدم استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و صحرایی و نبود اطلاعات قبلی، میزان نفوذ ناشی از بارش از توازن مؤلفه‌های ورودی و خروجی بیلان برآورد می‌شود. (دفتر مطالعات پایه منابع آب، ۱۳۹۰)

1. Thornth Waite

۲. مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی

بیلان آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی نیز مشابه بیلان آب سطحی، براساس داده‌های بلندمدت برای یک سال متوسط و براساس تخلیه و برداشت و مصارف تهیه می شود. مطابق قانون دارسی، میزان جریان عبوری از هر مقطع زیرزمینی به عرض مقطع، ضریب قابلیت انتقال و گرادیان هیدرولیکی بستگی دارد. ازاین‌رو، با برآورد ضریب قابلیت انتقال به روش آزمون پمپاژ و یا بسط ضرایب هیدرودینامیکی و برآورد مقادیر گرادیان هیدرولیکی براساس نقشه‌های تراز آب زیرزمینی، میزان جریان عبوری از مقطع زیرزمینی محاسبه می‌شود. در جدول ۱، مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی بیان شده است.

مناسب‌ترین روش برای محاسبه میزان نفوذ ناشی از بارندگی به سفره‌های آب زیرزمینی، نصب دستگاه نفوذسنج[1] است. ولی به جهت اینکه نصب آن در تمام دشت‌های کشور مقدور نیست، محاسبه میزان نفوذ با استفاده از معادله بیلان آب سطحی، میزان تبخیر و تعرق واقعی، رواناب و سهم نفوذ از بارندگی، انجام می‌شود و یا از روش‌های تجربی استفاده می‌شود. همچنین این دستگاه‌ها داده نقطه‌ای ارائه می‌دهند. مقدار تغذیه آبخوان نیز از طریق جریان‌های سطحی، با استفاده از روابط تجربی و یا اندازه‌گیری‌های مستقیم برآورد می شود. به‌منظور تعیین حجم تغذیه و یا حجم زهکشی آبخوان توسط رودخانه، مناسب‌ترین روش، اندازه‌گیری جریان رودخانه در مقاطع مختلف از طول مسیر آن است. به این ترتیب از طریق میزان کاهش آبدهی رودخانه، حجم تغذیه و از طریق میزان افزایش آبدهی رودخانه، حجم زهکشی محاسبه می‌شود. این روش به‌دلیل صرف وقت و هزینه زیاد عملاً در کشور انجام نمی‌گیرد.

جدول ۱. مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی

مؤلفه‌های ورودی	مؤلفه‌های خروجی
نفوذ از بارندگی بر سطح آبخوان	برداشت از آبخوان
نفوذ از جریان‌های سطحی و سیلابی	زهکشی آبخوان
آب برگشتی کشاورزی	تبخیر از آب زیرزمینی آبخوان
پساب ناشی از مصارف شهری و صنعت	جریان‌های زیرزمینی خروجی از آبخوان
جریان‌های زیرزمینی ورودی به آبخوان	-

با توجه به میزان مصرف آب در بخش‌های صنعت، خدمات و کشاورزی، میزان تغذیه آبخوان از طریق پساب‌های مختلف برآورد می شود. نحوه محاسبه نفوذ از آب مصرفی کشاورزی و نفوذ از پساب صنعت و خدمات با توجه به نحوه دفع فاضلاب حاصل می شود که درصدی از میزان آب مصرفی است. میزان تخلیه و برداشت از آبخوان نیز از طریق آمار تعداد چاه‌های بهره‌برداری، چشمه‌ها و قنات‌ها و میزان

1. Lysimeter

تخلیه سالانه آنها حاصل می‌شود و براساس منحنی‌های هم‌پتانسیل وضعیت زهکش بودن رودخانه معین و با استفاده از روابط تجربی مقدار آن برآورد می‌شود. همچنین براساس نقشه‌های هم‌عمق آب زیرزمینی، مناطقی از آبخوان که به‌دلیل بالا بودن سطح آب زیرزمینی تبخیر انجام می‌گیرد، شناسایی شده و میزان تبخیر از آب زیرزمینی براســاس روش‌های مختلف برآورد تبخیر، محاســبه می‌شــود. در نهایت، تغییرات ذخیره آبخوان با استفاده از تغییرات طولانی‌مدت هیدروگراف معرف آبخوان (منتج از تغییرات هیدروگراف چاه‌های مشاهده‌ای) محاسبه می‌شود. همچنین نتیجه موازنه مجموع تغذیه و تخلیه آبخوان که با استفاده از معادله بیلان حا صل شده با تغییرات حجم به‌د ست آمده از طریق هیدروگراف معرف آبخوان مقای سه می‌شود. (دفتر مطالعات پایه منابع آب، ۱۳۹۰)

۳. مؤلفه‌های بیلان عمومی

بیلان عمومی آب در هر محدوده مطالعاتی با استفاده از نتایج بیلان آب سطحی و بیلان آب زیرزمینی محاسبه می‌شود که این مؤلفه‌ها به‌شرح زیر است:

عوامل ورودی

- **بارندگی:** با توجه به بیلان آب سطحی برآورد می‌شود.
- **جریان سطحی ورودی:** چنانچه جریان‌های سطحی به‌طور طبیعی از محدوده یا محدوده‌های بالادست وارد محدوده مطالعاتی شوند، حجم جریان سطحی ورودی با روش‌های رایج محاسبه می‌شود (طبق دستورالعمل‌های برآورد بیلان، روش خاصی معین نشده است).
- **جریان زیرزمینی ورودی:** چنانچه آبخوان آبرفتی محدوده مطالعاتی با آبخوان آبرفتی سایر محدوده‌ها ارتباط داشته باشد، حجم آب زیرزمینی احتمالی ورودی محاسبه می‌شود. درخصوص نواحی کوهستانی میزان جریان زیرزمینی ورودی از محدوده‌های مجاور به ارتفاعات محدوده مطالعاتی محاسبه می‌شود.
- **آب‌های انتقالی:** حجم آب زیرزمینی و یا آب سطحی انتقالی از دیگر محدوده‌های مطالعاتی به محدوده مورد نظر برآورد می‌شود. آب انتقالی به‌طور مصنوعی و با احداث سازه منتقل می‌شود.

عوامل خروجی

- **تبخیر و تعرق:** تبخیر و تعرق حقیقی ناشی از بارندگی در ارتفاعات و دشت (با برقراری بیلان آب سطحی حاصل می‌شود)، تبخیر از سطح آب دریاچه‌ها (با اعمال ضریبی از تبخیر تشتک به‌دست آمده و یا با روش‌های دیگر محاسبه می‌شود)، تبخیر از آب زیرزمینی (در بیلان آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی محاسبه می‌شود) و مصرف خالص آب (مقدار آن از کسر جمع مقادیر نفوذ و پساب‌های ورودی به جریان‌های سطحی از کل مصارف به دست می‌آید و تبخیر و تعرق از آب مصرفی تلقی می‌شود)، اشکال مختلف تبخیر و تعرق محدوده مطالعاتی محسوب می‌شوند.

- **جریان سطحی خروجی:** مقادیر جریان سطحی خروجی از محدوده مطالعاتی با استفاده از روش‌های رایج محاسبه می‌شود. بنابراین، به‌کارگیری روش‌های مختلف موجب دستیابی به نتایج متفاوتی می‌شود.
- **جریان زیرزمینی خروجی:** جریان‌های زیرزمینی که از آبخوان آبرفتی محدوده مطالعاتی خارج می‌شود و همچنین جریان زیرزمینی که احتمالاً از نواحی ارتفاعات به‌صورت طبیعی خارج می‌شود.
- **آب‌های انتقالی:** حجم آب سطحی و یا آب زیرزمینی که به هر طریقی به خارج از محدوده مطالعاتی منتقل می‌شود.

درنهایت، تغییرات در ذخایر مخازن آب سطحی و زیرزمینی به‌صورت سالانه برای دوره طولانی‌مدت برآورد شده، نتایج حاصل با نتایج موازنه بین عوامل ورودی و خروجی در سطح محدوده مطالعاتی مقایسه می‌شود. (دفتر مطالعات پایه منابع آب، ۱۳۹۰)

۴. اهمیت مؤلفه‌های بیلان

هرکدام از مؤلفه‌های بیلان جهت برآورد دقیق بیلان از اهمیت خاصی برخوردار است. آمار و اطلاعات منابع آب، پایه و اساس محاسبات بیلان است و به جهت ماهیت احتمالی بودن این داده‌ها همواره با عدم‌قطعیت‌هایی همراه است که این خود به‌شدت به خصوصیات محدوده مورد مطالعه نیز وابستگی دارد. به جهت کاهش عدم‌قطعیت آمار و اطلاعات منابع آب، لازم است ورودی‌های طبیعی به‌صورت احتمالی (مانند بارش از نظر ایستایی)، بررسی شود. دقت برخی مؤلفه‌های ورودی بیلان آب زیرزمینی ازجمله نفوذ از بارندگی و جریان سطحی، تغذیه از آب برگشتی مصارف، به دقت تخمین نفوذپذیری، ضریب ذخیره سفره، قابلیت انتقال و ضرایب آب برگشتی آبخوان بستگی دارد. برای مثال، میزان نفوذ از بارش به داخل محیط خاک و تغذیه آبخوان، کاملاً به الگوی بارش و شدت آن در طول زمان بستگی دارد. حال آنکه در بسیاری از رویکردهای برآورد بیلان آب زیرزمینی ازجمله رویکرد مرسوم در کشور ما، عدد بارش سالانه معیار قرار می‌گیرد. همچنین، خطا در برآورد ضریب ذخیره نیز باعث وارد شدن خطا در برآورد میزان کسری مخزن به‌ازای افت سطح آب خواهد شد. در رویکرد مرسوم در کشور ما، معمولاً یک عدد متوسط برای این پارامتر در کل آبخوان استفاده می‌شود. حال آنکه این عدد می‌تواند بسیار متغیر باشد. به‌عنوان مثال در برآورد بیلان آبخوان نمدان در استان فارس، مقدار ضریب ذخیره ۴ درصد برای کل آبخوان با وسعتی حدود ۲۰۰۰ کیلومتر مربع استفاده شده است، در حالی که نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد این کمیت از بازه ۱ درصد تا ۲۰ درصد در محدوده متغیر است (کتابچی و همکاران، ۱۳۹۶). پارامترهایی ازجمله همین ضریب ذخیره و قابلیت انتقال، پارامترهایی به‌شدت متغیر در محیط خاک هستند و تعیین آنها نیز مستلزم انجام اندازه‌گیری‌های میدانی و آزمایشگاهی و در بسیاری موارد واسنجی در فرآیند مدلسازی است. همچنین، حدود تغییرات آنها به‌شدت زیاد بوده و ازاین‌رو تأثیر زیادی در محاسبات دارند. بنابراین، حساسیت بیلان آب زیرزمینی به این مؤلفه‌ها زیاد بوده و باید با دقت فراوان اندازه‌گیری و برآوردها انجام شود.

هـ) جایگاه بیلان در کارهای مبتنی‌بر آب

براساس نتایج انواع بیلان آب، میزان متوسط جریان‌های خروجی از ارتفاعات و جریان‌های سطحی خروجی از کل محدوده مطالعاتی و همچنین حجم تجدیدشونده و ثابت آب زیرزمینی مشخص می‌شود. حجم کلی ذخیره آبخوان‌های آبرفتی با توجه به وسعت و ضخامت آبخوان و ضریب ذخیره متوسط آبخوان به‌دست می‌آید. حجم ذخیره تجدیدشونده آبخوان‌های آبرفتی معادل تغذیه سالانه آبخوان‌ها در نظر گرفته می‌شود و تفاضل حجم کل و حجم تجدیدشونده نیز، حجم ذخیره ثابت آبخوان را حاصل می‌شود. در سازندهای سخت، جهت محاسبه حجم کل ذخیره به اطلاعاتی از قبیل ضخامت و وسعت واحدهای لیتولوژیک آبدار و میزان ضریب ذخیره آنها نیاز است. باتوجه به عدم وجود این اطلاعات در کشور، امکان محاسبه این پارامتر وجود ندارد. بنابراین، حجم تجدیدشونده مخازن سازندهای سخت براساس اطلاعات بیلان هیدروکلیماتولوژی ارتفاعات (نفوذ در ارتفاعات) برآورد می‌شود. بدیهی است جهت کنترل این عامل باید به میزان تخلیه و برداشت از مخازن سازندهای سخت و جریان‌های زیرزمینی ورودی و یا خروجی از آن در محدوده مطالعاتی توجه شود.

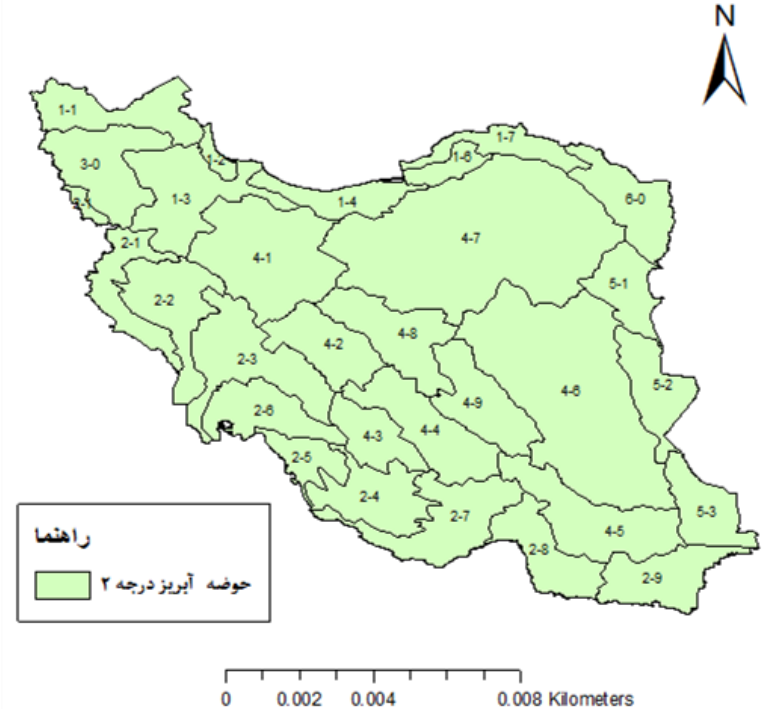
براساس مجموعه اطلاعات فوق، امکانات و محدودیت‌های بهره‌برداری از منابع آب در سطح محدوده مطالعاتی برآورده می‌شود. به‌منظور تحلیل و بررسی نسبت بین توسعه و بهره‌برداری از منابع آب محدوده مطالعاتی و یا حوضه آبریز از شاخص فنی که به‌صورت نسبت برداشت یا بهره‌برداری از منابع آب به کل پتانسیل منابع آب تجدیدپذیر یک محدوده است، استفاده می‌شود که نتایج بیلان در برآورد این شاخص نقش اساسی دارد. کل پتانسیل منابع آب تجدیدپذیر برابر حجم بارش پس از کسر تبخیر رخ داده است. نسبت برداشت یا بهره‌برداری مورد اشاره از منابع آب تا حد کل آب زیرزمینی قابل برنامه‌ریزی آن محدوده می‌تواند باشد. کل آب زیرزمینی قابل برنامه‌ریزی برابر مجموع تغذیه از آب سطحی، تغذیه از نفوذ حاصل از بارش، جریان‌های ورودی آب زیرزمینی و آب برگشتی از پساب زراعی، شرب و صنعت است که درصد معینی از مجموع حجم زهکشی از آب زیرزمینی، جریان‌های خروجی از آب زیرزمینی، تبخیر از آن، تخلیه چشمه و قنات از آن کسر می‌شود. براساس مستندات بررسی شده وزارت نیرو، به‌منظور حفظ شرایط طبیعی و پایدار حوضه آبریز، نسبت شاخص فنی همواره کمتر از ۷۰ درصد در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که این شاخص از ۷۵ درصد فراتر رود، توسعه نامتعادل و موجب ایجاد اختلال در شرایط طبیعی و زیست‌محیطی حوضه آبریز می‌شود. در بسیاری از دشت‌های کشور، این شاخص از حد یاد شده فراتر رفته و منجر به تبعاتی منفی ازجمله افت سطح آب زیرزمینی، کسری مخزن و فرونشست زمین شده است.

در برخی موارد نیز بیلان محدوده‌های مطالعاتی مستقل از پروژه‌های اطلس منابع آب تهیه می‌شود. شایان ذکر است، تقسیم‌بندی و کدگذاری حوضه‌های آبریز کشور و محدوده‌های مطالعاتی با هدف

تسهیل در دستیابی به آمار و اطلاعات و هماهنگی بین مطالعات آب‌های سطحی و زیرزمینی توسط کمیته تقسیم‌بندی و کدگذاری حوضه‌های آبریز در مدیریت تلفیق مطالعات سازمان تحقیقات منابع آب انجام گرفته است. بدین منظور ضوابط تقسیم‌بندی و کدگذاری حوضه‌های آبریز براساس سیستم اعشاری (دهدهی) بوده و در ارتباط با هماهنگی بین حوضه‌های آبریز و محدوده‌های مطالعاتی آب زیرزمینی سعی شده تا هر محدوده با یک یا چند حوضه آبریز انطباق داشته باشد. در شکل ۷، شمای کلی حوضه‌های آبریز درجه دو کشور همراه با نمایش کدهای آنها نشان داده شده است.

در این تقسیم‌بندی تعداد تقسیمات حوضه‌های آبریز درجه یک و درجه دو به‌ترتیب، ۶ حوضه آبریز و ۳۰ حوضه آبریز و تعداد محدوده‌های مطالعاتی در سطح کشور، ۶۰۹ محدوده تعریف شده است. کدگذاری حوضه‌های آبریز برمبنای آب‌های سطحی بوده که برای حوضه‌های درجات کوچک‌تر جزئیات بیشتری در نظر گرفته شده است. محدوده مطالعاتی از یک یا چند حوضه آبریز از هر درجه تشکیل شده و معمولاً شامل حداقل یک آبخوان است. حدود محدوده‌های مطالعاتی با مرز تقسیمات حوضه‌های آبریز درجه سه و یا تقسیمات بعدی انطباق دارد. جهت تهیه بیلان کلی کشور، ابتدا بیلان عمومی برای هر محدوده مطالعاتی تهیه شده و از جمع‌بندی آنها بیلان حوضه‌های آبریز درجه دو تهیه می‌شود و درنهایت از جمع‌بندی این بیلان، بیلان حوضه اصلی و بیلان کلی کشور به‌دست می‌آید. (شرکت مدیریت منابع آب، ۱۳۹۰)

شکل ۷. شمای کلی حوضه‌های آبریز درجه دو کشور (مقیاس مکانی برآورد بیلان آب زیرزمینی)



مطالعات آب‌های زیرزمینی، توسط وزارت نیرو و کارشناسان همین سازمان در قالب «دفتر مطالعات آب زیرزمینی» نیز انجام می‌شود و ارائه گزارش‌های بیلان به‌صورت سالانه است. دفتر مطالعات آب زیرزمینی دستورالعمل‌های متعددی را تهیه کرده که با رویه‌ای واحد بتوان به مطالعات ابعاد هیدرولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی پرداخت. دومین مورد از مطالعات گسترده آب‌های زیرزمینی، «طرح جامع آب کشور» است که پس از انقلاب با نظارت و کارفرمایی وزارت نیرو و توسط شرکت‌های مشاور صورت گرفته است. دوره اول با در نظر گرفتن آمارهای سال ۱۳۶۲ سعی کرد تا برای یک افق ۲۵ ساله (افق سال ۱۳۸۶)، برنامه‌های توسعه‌ای مرتبط با آب کشور را بررسی و اولویت‌بندی کند. دوره دوم این مطالعات با در نظر گرفتن آمارهای سال ۱۳۷۲ برای افق ۱۴۰۰ انجام گرفت. دوره سوم این مطالعات با در نظر گرفتن آمارهای سال ۱۳۸۵ برای افق ۱۴۲۰ انجام گرفت. (میرنظامی و باقری، ۱۳۹۶)

جمع‌بندی

بررسی اسناد بالادستی، قوانین و دستورالعمل‌های مرتبط با آب زیرزمینی حاکی از تهیه اولین گزارش بیلان آب زیرزمینی در دهه ۵۰ است. برآورد بیلان آب زیرزمینی مستلزم وجود ساختار نظام‌مند در مسیر حقوقی و اداری سازمان مربوطه است تا در برنامه‌ریزی نهاد مربوطه قرار گرفته و در تعامل با سایر ارگان‌های مرتبط، فرآیند کنترل و تضمین کیفیت همواره اجرا شود. ازاین‌رو متولی اصلی تهیه بیلان منابع آب زیرزمینی کشور وزارت نیرو است که در این راستا گروه تلفیق و بیلان دفتر مطالعات پایه شرکت مدیریت منابع آب با ارائه دستورالعمل‌های نحوه برآورد بیلان، مطالعات و برآورد بیلان آب کشور را برعهده دارد. به‌رغم وجود یک ساختار نظام‌مند، نظارت و کنترل کیفیت برآورد بیلان به شکل مشخصی در این ساختار گنجانده نشده است و در نظر گرفتن این مهم در اصلاح روش برآورد بیلان می‌تواند نقش مهمی داشته باشد.

در نظر گرفتن جایگاه و اهمیت بیلان آب در کشور به جهت برنامه‌ریزی و توسعه پایدار مهم و ضروری است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در سطح ملی درک درستی از اهمیت و جایگاه برآورد دقیق بیلان که پایه و اساس برنامه‌ریزی‌ها در جهت توسعه کشور است، وجود ندارد که لازم است این مهم، مورد توجه بوده و تخصیص‌های فنی و مالی لازم برای مجهز کردن نرم‌افزاری و سخت‌افزاری امکانات برآورد مؤلفه‌های بیلان انجام پذیرد. براساس بررسی مطالعات و ساختار سازمانی گروه تهیه بیلان، در روش‌شناسی انجام مطالعات بیلان با توجه به ماهیت داده‌های منابع آبی (که همواره با عدم‌قطعیت همراه هستند)، ویژگی‌های محدوده مورد مطالعه و همچنین دقت تخمین برخی پارامترها (نفوذ، ضریب ذخیره سفره، قابلیت انتقال و ضرایب آب برگشتی آبخوان)، خطاها و عدم‌قطعیت‌های زیادی وارد محاسبات می‌شود. برخی از این پارامترها ازجمله ضریب ذخیره سفره و قابلیت انتقال آبخوان به‌دلیل محدوده تغییرات زیاد، می‌توانند تا حد چند برابر، برآوردهای بیلان را تحت تأثیر قرار دهند. ازاین‌رو، باید براساس

روش‌های توصیه شده در سطح ملی و بین‌المللی، به برآورد دقیق‌تر این پارامترها/مؤلفه‌های بیلان پرداخت تا حدالامکان خطاها و عدم‌قطعیت‌ها را در حد مطلوبی کاهش داد که این امر مستلزم اعمال فناوری‌های نوین، نصب تجهیزات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری میدانی و برخی آزمون‌ها و پایش‌ها در سطح دشت‌های کشور است و وزارت نیرو باید در برنامه‌های سالانه خود به این موارد توجه داشته و اعتبارات لازم را در پیشنهاد بودجه‌ای خود ملحوظ کند. همچنین به نظر می‌رسد بازه‌های زمانی مبادرت به محاسبات بیلان آب زیرزمینی در کشور که عمدتاً در حدود ۵ سال است، نیازمند بازنگری بوده و باید در بازه‌های کوتاه‌تری این برآوردها، به‌روزرسانی شود.

در اصلاح برنامه‌های وزارت نیرو بهره‌گیری از تجربیات موفق و ناموفق کشورهای دیگر می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

بخش دوم ـ مرور برآورد بیلان آب زیرزمینی در سطح بین‌المللی

الف) بررسی الگوهای پیشنهادی بین‌المللی برای برآورد بیلان آب زیرزمینی

در دهه‌های اخیر در سطح بین‌المللی، تلاش‌های فراوانی جهت بررسی منابع آب زیرزمینی موجود و قابلیت برداشت از آنها انجام گرفته است و بسیاری از کشورها، سیاست‌ها و رویکردهای مختلفی ازجمله برآورد بیلان را جهت بررسی و برآورد دقیق این منابع ارزشمند تعریف کرده و به کار برده‌اند. در ادامه، این روش‌ها و رویکردها مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱. روش‌ها و رویکردها

روش‌ها و رویکردهای برآورد بیلان در مقیاس‌های قاره‌ای، کشوری، منطقه‌ای و حوضه/محدوده آب زیرزمینی (آبخوان) ارائه شده‌اند. بدین معنا که در محدوده یک قاره، کشور، منطقه و یا آبخوان، یک روش یا دستورالعمل مشخص و جامع برای تهیه بیلان آب زیرزمینی ارائه شده است. اما مقیاس ارزیابی بیلان منابع آب زیرزمینی با توجه به هدف مورد بررسی، می‌تواند متفاوت باشد. با این رویکرد می‌توان دستورالعمل‌ها و روش‌شناسی‌های ارائه شده جهت تهیه بیلان منابع آب زیرزمینی را از دو منظر مقیاس ارائه و مقیاس ارزیابی (بستن بیلان) بررسی کرد. در جدول ۲ به برخی از شاخص‌ترین دستورالعمل‌های بین‌المللی تهیه بیلان در دو دهه اخیر اشاره شده است.

برآورد بیلان آب زیرزمینی در حقیقت بخشی از برآورد بیلان عمومی آب یک حوضه، منطقه یا کشور بوده و به‌طور پیوسته با سایر مؤلفه‌های بیلان عمومی (نظیر مؤلفه‌های مربوط به آب‌های سطحی) محاسبه می‌شود. به‌رغم ارائه روش‌های مختلف برآورد برای هریک از مؤلفه‌های بیلان مانند بارش، تبخیر، رواناب، نفوذ، تخلیه و تغذیه آب زیرزمینی در دستورالعمل‌های کشورهای مختلف، یکپارچگی مقیاس زمانی و مکانی در برآورد منابع آب زیرزمینی مختلف آن کشور، امری بسیار مهم و ضروری در ارائه بیلان کلی آن کشور بوده و

از بروز خطاهای مختلف در برآورد آن، به‌خصوص در رویکرد/چارچوب حسابداری آب یک حوضه آبریز یا کشور جلوگیری می‌کند که در اکثر مراجع به آن تأکید شده است. در ادامه، برآورد بیلان از دو منظر مقیاس مکانی و مقیاس زمانی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۲. برخی از شاخص‌ترین راهنماها و دستورالعمل‌های بین‌المللی تهیه بیلان

راهنما/ دستورالعمل	قاره/ کشور/ منطقه	سازمان/ شرکت ارائه‌دهنده	سال ارائه	مقیاس ارائه	مقیاس تهیه بیلان
دستورالعمل چارچوب آب اتحادیه اروپا (مدیریت یکپارچه منابع حوضه آبریز)	اروپا	اتحادیه اروپا	۲۰۱۵ و ۲۰۰۰	قاره‌ای	کشوری/ منطقه‌ای/ حوضه‌ای
ارزیابی منابع آب بیلان کامل حوضه‌های آبریز	کشورهای آمریکای لاتین و حوضه دریای کارائیب	سازمان منطقه‌ای مطالعات علمی آمریکای لاتین و حوضه دریای کارائیب یونسکو	۲۰۰۸	قاره‌ای	حوضه‌ای
دستورالعمل ارزیابی، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب زیرزمینی آفریقای جنوبی	آفریقای جنوبی	سازمان امور آب و جنگلداری	۲۰۰۸	کشوری	منطقه‌ای/ حوضه‌ای
روش‌شناسی برآورد منابع آب زیرزمینی	هند	وزارت منابع آب	۲۰۰۹	کشوری	حوضه‌ای
مرور روش‌های بیلان منطقه‌ای آب در استرالیا	استرالیا	سازمان ملی آب، هوا و اقلیم استرالیا (اداره هواشناسی)	۲۰۰۹	کشوری	منطقه‌ای/ حوضه‌ای
روش‌های برگزیده برآورد پارامترهای بیلان دشت‌های مرتفع	ایالات متحده آمریکا	سازمان زمین‌شناسی آمریکا	۲۰۰۹	منطقه‌ای	حوضه‌ای
رویکردها و روش‌های برآورد بیلان آب	ایالات متحده آمریکا	اداره کنترل سیل و حفاظت آب منطقه سن‌لوئیس	۲۰۱۳	منطقه‌ای	حوضه‌ای
گزارش حسابداری آب (NSW)[1] روش‌شناسی آب زیرزمینی	استرالیا	دفتر مطالعات آب سازمان صنایع بنیادین فرمانداری ایالت نیوساتولز	۲۰۱۳	کشوری	منطقه‌ای/ حوضه‌ای

1. New South Walse (NSW)

۱-۱. مقیاس مکانی برآورد بیلان

فرآیندها و جریانات هیدرولوژیکی، در مقیاس‌های مکانی مختلفی رخ می‌دهند. از یکسو برآورد بیلان در مقیاس‌های مکانی بزرگ (حوضه‌های وسیع، کشور و ...) به‌رغم پوشش انواع منابع آبی و نیازها و مصارف مختلف، ممکن است بسیاری از چالش‌های حیاتی مدیریتی را نادیده بگیرد. ازسوی دیگر، برآورد بیلان برای واحدهای کوچک آبی همچون گروهی از مزارع یا محیط‌های مسکونی، کمکی به شناسایی چالش‌های مدیریتی آب نمی‌کند.

بنابراین، اهداف مطالعاتی و مقیاس اعمال تصمیمات مدیریتی، معیارهای مناسبی جهت انتخاب مقیاس مکانی برآورد بیلان هستند. اگرچه در مواردی که مقیاس اهداف، ارزیابی منابع آب در سطح کلان بوده و بیلان با توجه به این مقیاس گزارش می‌شود، عموماً بیلان آب زیرزمینی در مقیاس حوضه‌های آبریز، حوضه‌ها/محدوده‌های مطالعاتی آب زیرزمینی و کوچک‌تر (آبخوان) برآورد می‌شود و جهت ارائه بیلان در مقیاس‌های کلان، از تجمیع بیلان‌های واحدهای کوچک‌تر (آبخوان) استفاده می‌شود. این رویکرد باعث کاهش خطا در برآورد بیلان و تدقیق در آن می‌شود که رویکرد بسیار مناسبی، به‌خصوص برای کشورهایی با تنوع اقلیمی و زمین‌شناسی، نظیر ایران است. برای مثال، در گزارش‌های سالانه حسابداری آب استرالیا، بیلان منابع آب زیرزمینی، به‌صورت حوضه‌ای و کشوری معرفی و گزارش می‌شوند، اما محاسبات بیلان در سطح حوضه‌ها/محدوده‌های مطالعاتی آب زیرزمینی و آبخوان انجام می‌شود. در ایالات متحده آمریکا، به‌رغم تولید گزارش‌های سالانه حسابداری آب، مقیاس مکانی بیلان منابع آب زیرزمینی با توجه به ارتباط سیستم‌های آب زیرزمینی و آبخوان‌ها تعیین شده و در همان سطح محاسبه می‌شود. در دستورالعمل محاسبه بیلان منابع آب یونسکو که برای کشورهای آمریکای لاتین و حوضه دریای کارائیب ارائه شده است، محاسبه بیلان آب زیرزمینی همانند آمار و داده‌برداری برای آن، در مقیاس آبخوان پیشنهاد شده است (جدول ۲). بنابراین، برای یک کشور، برآورد بیلان در مقیاس آبخوان‌ها، با دستورالعمل و روشی جامع و مشترک، بهترین رویکرد ممکن در تهیه بیلان است و انتخاب گزینه‌های مدیریتی (تهیه بیلان در مقیاس‌های بالاتر) را برای تصمیم‌گیران و سیاستگذاران، تسهیل می‌کند. مطمئناً اتخاذ رویکردهایی شبیه رویکرد حسابداری آب می‌تواند تعداد مؤلفه‌های دخیل در برآوردها را افزایش داده و همین‌طور در مؤلفه‌های یکسان با رویکردهای مرسوم نیز وجود اندازه‌گیری‌ها در مقیاس مکانی و زمانی کوچک‌تر و نیز با ابزارها و فناوری‌های دقیق‌تر با توجه به اینکه دقت داده را می‌افزاید، به نتایج دقیق‌تر می‌انجامد.

۲-۱. مقیاس زمانی برآورد بیلان

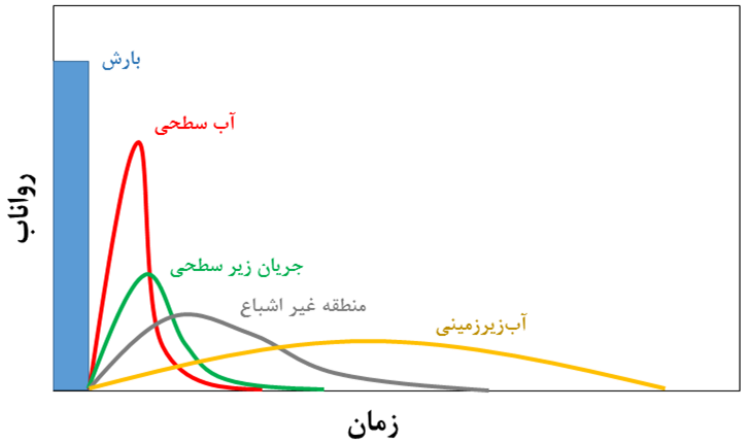
به‌دلیل حضور آب زیرزمینی در محیط خاک، سرعت واکنش آن نسبت به تغییرات در ورودی‌ها به آن و خروجی‌ها از آن، بسیار کمتر از وضعیت مشابهی در منابع آب سطحی است. ازاین‌رو در انتخاب مقیاس

زمانی سیستم‌های آب زیرزمینی، همواره دو فرآیند اصلی دخیل هستند. یکی مدت زمانی است که سطح آب زیرزمینی نسبت به تنش‌های وارده به آن (نظیر پمپاژ) واکنش نشان می‌دهد؛ دیگری مدت زمانی است که آب از یک سیستم آب زیرزمینی (آبخوان) عبور می‌کند. ازاین‌رو در تهیه بیلان این منابع، از مقیاس‌های زمانی بلندمدت‌تری نسبت به منابع آب سطحی استفاده می‌شود.

در اکثر دستورالعمل‌های بین‌المللی، از نظر مقیاس زمانی، برآورد بیلان برای دوره‌های بلندمدتی همچون سالانه توصیه شده است (سال آبی، سال تقویمی، دوره‌های خشکسالی یا ترسالی، چندساله). با در نظر گرفتن تغییرات مؤلفه‌های کلیدی بیلان همچون تغییرات برداشت در یک سال و یا تغییرات الگوی بارش در فصول مختلف، از دوره‌های زمانی کوتاه‌تری همچون ماهانه و هفتگی نیز استفاده می‌شود. اما در صورتی که منابع آب زیرزمینی در محدوده برآورد بیلان، سهم عمده‌ای را از بیلان داشته باشند، با توجه به تأخیر مذکور در پاسخ سیستم آب زیرزمینی نسبت به تغذیه از سطح و همچنین سرعت کم جریان در آبخوان، پیشنهاد شده است تا برای برآورد بیلان با در نظرگیری بیلان آب زیرزمینی و ذخیره آبخوان، از مقیاس زمانی سالانه و بیشتر (۱۰ تا ۲۰ سال) استفاده شود (شکل ۸). به‌طور کلی، دوره زمانی بیلان، براساس مسئله مدیریتی اصلی محدوده و دوره تغییرات، اصلی‌ترین مؤلفه بیلان با توجه به مسئله مدنظر تعیین می‌شود.

برای جمع‌بندی دو بخش مقیاس مکانی و زمانی برآورد بیلان منابع آب زیرزمینی، برآورد بیلان در سطح آبخوان و برای دوره‌های بلندمدت سالانه و بیشتر (۱۰ تا ۲۰ سال) مناسب‌ترین رویکردی است که در اکثر مطالعات بین‌المللی به آن اشاره و تأکید شده است. البته برآورد بیلان در این مقیاس‌ها با چالش‌هایی نیز روبرو است. تعیین هندسه و مرز آبخوان، پایش اندرکنش آبخوان با آب‌های سطحی، ایجاد نظام آماربرداری جامع و مشترک با دقت مکانی و زمانی یکسان برای تمامی آبخوان‌های یک کشور یا قاره و به تبع آن تهیه و احداث تجهیزات لازم برای تمامی آبخوان‌ها، ازجمله چالش‌های بحث‌برانگیز و هزینه‌بر پیش روی این رویکردها هستند که به تهیه بستری قانونی و اجرایی نیازمندند.

شکل ۸. مقیاس زمانی تغییرات مؤلفه‌های مختلف بیلان (دستورالعمل آب اتحادیه اروپا، ۲۰۱۵)



۳-۱. روش‌های متداول

در روش‌ها و دستورالعمل‌های مورد بررسی، روش‌های مختلفی برای برآورد بیلان آب زیرزمینی ارائه شده است که می‌توان به روش‌های مدلسازی، پایش نوسانات سطح آب و بیلان منطقه غیراشباع خاک، به‌عنوان پرکاربردترین این روش‌ها اشاره کرد. هر کدام از این روش‌ها به‌رغم مزایای متعدد، معایبی نیز دارند. برای مثال، اگرچه روش‌های مدلسازی (نظیر MODFLOW) توانایی برآورد تغییرات در یک سیستم آب زیرزمینی محصور، نامحصور و یا ترکیبی از هر دو را در شرایط ماندگار و غیرماندگار دارند، اما ممکن است از نظر دوره مدلسازی ـ که معمولاً بلندمدت است ـ بر مقیاس زمانی بیلان منطبق نباشند. البته در بسیاری از روش‌ها، مدلسازی ابزار مناسبی برای ارزیابی وضعیت اولیه سیستم آب زیرزمینی در ابتدای دوره زمانی برآورد بیلان و همچنین برآورد بیلان در دوره‌های زمانی بلندمدت معرفی شده است. در روش‌های پایش نوسانات سطح آب با استفاده از تغییرات سطح آب مشاهده شده در چاه‌های مشاهداتی، آبدهی ویژه و مساحت آبخوان، تغییرات ذخیره سیستم آب زیرزمینی محاسبه می‌شود. ازجمله محدودیت‌های این روش‌ها نیز می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- پایش نوسانات سطح آب نیازمند مقدار آبدهی ویژه‌ای است که معرف کل سیستم آب زیرزمینی باشد که به‌دلیل ماهیت این پارامتر و عدم‌قطعیت موجود در برآورد آن، عدم‌قطعیت برآورد بیلان حتی تا چند برابر افزایش می‌یابد. تقسیم محدوده مطالعه به واحدهای ریزتر که بتوان در هر کدام از این واحدها، شرایط را همگن فرض کرد، می‌تواند کمک‌کننده باشد.
- موقعیت مکانی چاه‌های مشاهداتی باید به‌گونه‌ای باشد که ترازهای مشاهداتی معرف وضعیت سیستم آب زیرزمینی باشند که این مسئله در بسیاری از مناطق به‌دلیل کمبود چاه‌های مشاهداتی و یا عدم توانایی در احداث آنها، میسر نبوده و موجب افزایش خطا و عدم‌قطعیت در برآوردها به‌دلیل میانیابی بین آنها می‌شود. این خطاها می‌تواند متغیر باشد و از چند درصد تا چند برابر رخ دهد.

- در این روش‌ها نمی‌توان نرخ ثابتی را برای تغذیه در نظر گرفت.

رویکرد بیلان آب منطقه توسعه ریشه (غیراشباع)،[1] روشی برای برآورد پارامتر تغذیه آبخوان (تبادل دو منطقه غیراشباع و سطح آبخوان) از طریق محاسبه بیلان آب در منطقه غیراشباع است. این روش با بررسی رابطه بین پارامترهای بارش، تبخیر و تعرق و رواناب و همچنین خصوصیات خاک، میزان تغذیه به سطح سفره را تخمین می‌زند. عموماً این روش در مناطقی که سایر روش‌ها به‌دلیل محدودیت آمار و اطلاعات قابل پیاده‌سازی نیستند، کاربرد دارد و منجر به بهبود برآوردها می‌شود.

۲. مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی (براساس مرور مطالعات بین‌المللی)

مؤلفه‌های اصلی بیلان آب زیرزمینی را در دو دسته ورودی‌ها (مؤلفه‌های تغذیه) و خروجی‌ها (مؤلفه‌های تخلیه) می‌توان با توجه به شرایط مختلفی همچون موقعیت قرارگیری سیستم آب زیرزمینی (از نظر مجاورت با عوامل مختلف طبیعی و غیرطبیعی همچون رودخانه‌ها، دریاها و مخازن سدها و سایر پیکره‌های آبی)، خصوصیات فیزیکی خاک، مشخصات آبخوان (از نظر محصور و غیرمحصور بودن)، کاربری اراضی و بسیاری عوامل دیگر از این دست، به شکلی جزئی‌تر مورد بررسی قرار داد.

با توجه به محدودیت اندازه‌گیری بسیاری از مؤلفه‌های بیلان به‌خصوص مؤلفه‌های تغذیه و همچنین مشکلات احتمالی دیگری همچون عدم دقت کافی در آماربرداری، نقص داده‌ها، عدم همخوانی بازه‌های زمانی متغیرهای مختلف و کافی نبودن داده‌ها و ایستگاه‌های سنجش پارامترهای مختلف و همچنین تأثیر دیرهنگام برخی پارامترها در بیلان مانند تغذیه از سطح، برآورد بیلان عموماً با خطاها و عدم‌قطعیت‌های بسیاری مواجه بوده و با افزایش تعداد مؤلفه‌های بیلان در محاسبات، این خطاها و عدم‌قطعیت‌ها از چند درصد تا چند برابر افزایش می‌یابند. در دستورالعمل‌ها و روش‌شناسی‌های بین‌المللی مانند روش شناسی آب زیرزمینی حسابداری آب NSW[2] (۲۰۱۵) کشور استرالیا، روش‌های برگزیده برآورد پارامترهای بیلان دشت‌های مرتفع (۲۰۰۹) کشور ایالات متحده آمریکا و روش شناسی برآورد منابع آب زیرزمینی (۲۰۰۹) کشور هند، به ضرورت و اهمیت بررسی خطاها و عدم‌قطعیت‌های موجود در محاسبه بیلان آب زیرزمینی اشاره شده است، اما در اکثر مراجع تأکید شده تا لزوم بررسی و انتخاب روش‌های برآورد خطاها و عدم‌قطعیت‌ها، با توجه به مقیاس زمانی و مکانی و خصوصیات مختلف منطقه و همچنین اهداف مطالعه تعیین شود. به‌طور کلی، اصلی‌ترین منابع عدم‌قطعیت‌ها و خطاهای شناخته شده شامل موارد زیراند:

- تغییرات زمانی و مکانی مقادیر پارامترهای مختلف،
- خطاهای اندازه‌گیری،

1. Soil-Water Balance
2. New South Walse (NSW)

- صحت و اعتبار فرضیات در نظر گرفته شده در محاسبات.

جهت آ شنایی بی شتر با روش‌ها، رویکردها و فرآیندهای محا سبه بیلان در حوزه بین‌المللی، در بخش بعدی تعدادی از مطالعات بیلان آب زیرزمینی انجام شده در نقاط مختلف دنیا مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳. مرور چند مطالعه بین‌المللی

در این بخش، چند تجربه بین‌المللی در محا سبه بیلان منابع آب زیرزمینی معرفی شده و از منظر اهداف مطالعات، رویکردها و روش‌های مورد استفاده، نقاط ضعف و قوت، بررسی خواهند شد. با توجه به توسعه روش‌ها در گذر زمان، جهت بررسی و نقد بهتر و به‌روزتر، تعدادی از مطالعات دو دهه اخیر در کشورهای ایالات متحده آمریکا، کانادا، استرالیا، آفریقای جنوبی، اسلوونی و لبنان در نظر گرفته شده است تا هم از نظر تنوع و پراکندگی مکانی مطالعات و هم از نظر تنوع در سطح توسعه کشورهای مورد مطالعه، مورد بررسی قرار گیرند. (جدول ۳)

در تمام مطالعات، ابتدا به بررسی و شناخت جغرافیا، شرایط هوا و اقلیم‌شناسی، شرایط زمین‌شناسی، خصوصیات عمومی و شرایط هیدرولیکی سیستم آب زیرزمینی و آبخوان یا آبخوان‌های موجود در آن، منابع م صرفی و مقادیر بردا شت و شرایط کیفی سی ستم آب زیرزمینی پرداخته شده ا ست. سپس به برآورد مؤلفه‌های مختلف بیلان از نظر داده‌های مورد نیاز، دوره آماری داده‌ها و روش‌های برآورد، پرداخته شده و در نهایت، نحوه محاسبه بیلان و نتایج آن ارائه شده که در موارد استفاده از مدلسازی برای محاسبه بیلان، مدل مفهومی و سایر اطلاعات مدلسازی نیز شرح داده شده است.

در بخش‌های بعدی، روش‌های به‌کار گرفته شده جهت محاسبه مؤلفه‌های مختلف بیلان، مدل‌های به‌کار رفته برای برآورد بیلان و تحلیل‌های حساسیت[1] و عدم‌قطعیت‌های در نظر گرفته شده در مطالعات مذکور (جدول ۳)، مورد بررسی بیشتر قرار می‌گیرد.

۱. تحلیل حساسیت (Sensitivity Analysis) به مطالعه تأثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی گفته می‌شود. به‌عبارت دیگر، روشی برای تغییر دادن در ورودی‌های یک مدل به‌صورت سازمان‌یافته است که بتوان تأثیرات این تغییرها را در خروجی پیش‌بینی کرد.

جدول ۳. چند نمونه از مطالعات بین‌المللی بیلان منابع آب زیرزمینی

پروژه/ مطالعه	سال	محدوده مطالعه					اهداف پروژه	نهاد مسئول
		کشور		محدوده / آبخوان				
		نام	GDP (Milions of $, year=2015)	نام منطقه	مساحت (کیلومتر مربع)	اقلیم (معیار کوپن)		
تأمین آب سیستم رودخانه وال: [1] ارزیابی آب زیرزمینی	۲۰۰۶	آفریقای جنوبی	۳۱۲,۷۹۸	منابع آب واال (Vaal) (آبخوان دولومیت با مرز بسته)	۲۴۱,۴۷۹	بیابانی گرم و خشک، معتدل و خشک با تابستان‌های گرم	برآورد کمی منابع آب زیرزمینی و پیش‌بینی ارزیابی پتانسیل طرح‌های توسعه	سازمان امور آب و جنگلداری
مدل مفهومی سیستم آبخوان آبرفتی کربناتی حوضه بزرگ	۲۰۱۰	ایالات متحده آمریکا	۱۸,۰۳۶,۶۴۸	حوضه بزرگ آبخوان‌های آبرفتی کربناتی (بخش‌هایی از ایالات یوتا و نوادا) با لحاظ تبادلات مرزی	۲۴۸,۸۹۹	نیمه‌خشک بیابانی	ارزیابی منطقه‌ای منابع آب زیرزمینی موجود	وزارت کشور ایالات متحده آمریکا، سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا
مدلسازی آب زیرزمینی نامبیلاپ [2]	۲۰۱۲	استرالیا	۱,۳۳۹,۵۳۹	نامبیلاپ (دارای ورودی و خروجی مرزی)	۴۲	مدیترانه‌ای، با زمستان‌های سرد و مرطوب و تابستان‌های گرم و خشک	تهیه ملزومات مدلسازی آب زیرزمینی، ارزیابی منابع آب موجود	سازمان آب محیط زیست و منابع طبیعی منطقه استرالیای غربی
بیلان آب برای آب زیرزمینی محدوده مشترک بهار جیتا [3]	۲۰۱۳	لبنان	۴۷,۱۰۳	حوضه آب زیرزمینی بهار جیتا (دارای ورودی و خروجی به‌صورت آماری)	۴۰۶	مدیترانه‌ای، اقیانوسی، نیمه‌گرمسیری با زمستان‌های مرطوب و تابستان‌های خشک	ارزیابی منابع آب موجود، تأمین پایدار آب بیروت	شورای توسعه و بازسازی لبنان
پروژه بیلان آب منطقه جنوب شرقی (توسعه یک مدل منطقه‌ای جریان آب زیرزمینی)	۲۰۱۵	استرالیا	۱,۳۳۹,۵۳۹	جنوب شرقی استرالیا (با مرز آبخوان بسته در یک لایه و تراز ثابت در دو لایه دیگر)	۲۸,۰۰۰	مدیترانه‌ای با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد و مرطوب	توسعه مدل بیلان آب منطقه‌ای، ارزیابی و بهبود اطلاعات محلی بیلان آب مانند مقادیر استخراج آب، ورودی و خروجی‌های زیرزمینی در داخل مرز و تبادلات با خارج مرز و ساحل، برآورد کمی ذخایر آب‌های	سازمان آب، محیط زیست و منابع طبیعی

پروژه/ مطالعه	سال	محدوده مطالعه				اهداف پروژه	نهاد مسئول
		کشور		محدوده / آبخوان			
		نام	GDP (Milions of $, year=2015)	نام منطقه	مساحت (کیلومتر مربع)	اقلیم (معیار کوپن)	
						زیرزمینی و سطحی در مقیاس منطقه‌ای، شناخت خلأهای مطالعاتی موجود	
بیلان ماهانه آب زیرزمینی منطقه کلونا[4]	۲۰۱۶	کانادا	۱,۵۵۰,۵۳۷	کلونا (دارای ورودی خروجی مرزی)	۱,۱۸۸	نیمه‌خشک قاره‌ای با زمستان‌های معتدل و مرطوب و تابستان‌های گرم و خشک	توسعه مدل هیدرولوژیکی، توسعه یک مدل بیلان آب زیرزمینی، استفاده از مدل بیلان برای برآورد بیلان ماهانه، ارزیابی منابع آب زیرزمینی موجود	سازمان محیط زیست بریتیش‌کلمبیا
تغذیه آب زیرزمینی در اسلوونی	۲۰۱۶	اسلوونی	۴۲,۷۴۷	کل کشور	۲۰,۲۷۳	معتدل، نیمه‌مدیترانه‌ای، سرد کوهستانی (آلپاین)	کمی‌سازی تغذیه آب زیرزمینی	سازمان محیط زیست اسلوونی

1. Vaal
2. Nambeelup
3. Jeita Spring using
4. Kelowna

۴. روش‌های برآورد مؤلفه‌های بیلان

با توجه به ماهیت مؤلفه‌های بیلان و داده‌های در دسترس، مقیاس مکانی و زمانی و شرایط منطقه (جغرافیایی، زمین‌شناسی، کاربری اراضی و غیره)، در مطالعات مختلف، روش‌های مختلفی برای برآورد مؤلفه‌های تغذیه و تخلیه به‌کار گرفته شده است.

در برآورد مؤلفه‌های تغذیه، عموماً از روش‌های مبتنی‌بر بیلان ناحیه غیراشباع خاک استفاده شده است که توابعی از شرایط اقلیمی، خاک، زمین‌شناسی، توپوگرافی و کاربری اراضی هستند. در این روش‌ها با برآورد میزان آب نفوذیافته (از بارش یا آبیاری یا هر منبع دیگری)، پارامترهای خاک و آب زهکش شده از منطقه غیراشباع، میزان آب نفوذیافته به منطقه اشباع یا همان آبخوان برآورد می‌شود. اکثر روش‌ها و مدل‌های مورد استفاده و توسعه داده شده جهت برآورد نرخ تغذیه، به‌صورت توزیعی هستند و مقیاس مکانی مدل‌های به‌کار گرفته شده در قیاس با مقیاس تهیه بیلان بسیار کوچک‌تر است به‌طوری که در برخی مطالعات مانند پروژه بیلان آب منطقه جنوب شرقی استرالیا، از مدل‌های بیلان منطقه غیراشباع خاک با ابعاد ۲۵۰ متری و در پروژه تغذیه آب زیرزمینی در اسلوونی با ابعاد ۱۰۰ متری استفاده شده است. عموماً نتایج مدل‌های بیلان ناحیه غیراشباع به‌صورت نرخ تغذیه به کل منطقه یا مناطقی که هدف تهیه بیلان آب زیرزمینی هستند، تعمیم داده می‌شود.

برای برآورد مؤلفه‌های تخلیه نیز تاکنون روش‌ها و رویکردهای متعددی به‌کار گرفته شده است که ازجمله شاخص‌ترین آنها می‌توان به برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از مدلسازی، الگوریتم‌های سنجش از دور و داده‌های مشاهداتی (لایسیمتری)، برآورد جریان پایه با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی و داده‌های مشاهداتی جریانات سطحی، برآورد تبادلات مرزی با استفاده از روابط و مدل‌های مختلفی همچون دارسی، برآورد تخلیه‌های طبیعی با استفاده از مدلسازی خطی مخزن همچنین آمار و اطلاعات برداشت‌ها توسط مصارف مختلف (کشاورزی، صنعتی، شهری و ...) در مورد تخلیه غیرطبیعی، اشاره کرد. جهت برآورد مؤلفه ذخیره نیز روش‌هایی نظیر مدلسازی خطی مخزن و برآورد با استفاده از اطلاعات ترازهای مشاهداتی آب، آبدهی ویژه و تراز سنگ بستر ارائه شده است. اما معمولاً ذخیره، در فرآیند برآورد بیلان حاصل شده است. (جدول ۴)

۵. کاربرد مدلسازی در برآورد بیلان

عموم مطالعات بیلان انجام شده در سطوح بین‌المللی، از انواع مختلفی از مدل‌ها جهت برآورد بیلان استفاده کرده‌اند. برخی از این مطالعات نظیر مدل مفهومی سیستم آبخوان آبرفتی کربناتی حوضه بزرگ آمریکا (۲۰۱۰)، تأمین آب سیستم رودخانه وال و ارزیابی آب زیرزمینی در آفریقای جنوبی (۲۰۰۶)، مدلسازی آب زیرزمینی نامبیلاپ استرالیا (۲۰۱۲) و تغذیه آب زیرزمینی در اسلوونی (۲۰۱۶)، با استفاده از مدل‌های مختلف، به شبیه‌سازی مؤلفه‌های مختلف بیلان پرداخته‌اند و بیلان نهایی محدوده را با استفاده از مدل مفهومی خود به‌دست آورده‌اند. در مطالعاتی همچون پروژه بیلان آب منطقه جنوب

شرقی استرالیا (۲۰۱۵) و بیلان ماهانه آب زیرزمینی منطقه کلونا کانادا (۲۰۱۶)، از مدل‌های عددی همچون MODFLOW و GROWA و جهت پروژه بیلان آب برای آب زیرزمینی محدوده مشترک بهار جیتا (۲۰۱۳)، از مدل شیءگرا WEAP استفاده شده است. ابعاد پایه مدلسازی با توجه به مساحت محدوده مورد مطالعه و جزئیات مورد بررسی و دقت نظر در اهداف مطالعه، متفاوت است. به‌عنوان مثال، در پروژه مدلسازی آب زیرزمینی نامبیلاپ استرالیا (۲۰۱۲) با مساحت مدلسازی ۴۲ کیلومتر مربع، جهت ارزیابی وضعیت آب زیرزمینی محدوده، از سلول‌های ۴۰ متری استفاده شده است. در حالی که در پروژه بیلان آب منطقه جنوب شرقی استرالیا (۲۰۱۵) با هدف ارزیابی منابع آب زیرزمینی موجود و شناخت خلأ در آمار و اطلاعات و داده‌ها در محدوده دیگری در استرالیا به مساحت ۲۸۰۰۰ کیلومتر مربع، از قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متری و مدل MODFLOW استفاده شده که این امکان را به پروژه داده تا در این دقت مکانی و لایه‌های مختلف، پارامترهای مؤثر در بیلان را با دقت بهتری تخمین بزند.

جدول ۴. روش‌های به‌کار برده شده جهت برآورد مؤلفه‌های مختلف بیلان

پروژه/ مطالعه	تاریخ پروژه/ مطالعه	کشور	روش‌های برآورد به تفکیک مؤلفه‌ها		
			تغذیه	تخلیه	ذخیره
تأمین آب سیستم رودخانه وال: ارزیابی آب زیرزمینی	۲۰۰۶	آفریقای جنوبی	بقای جرم کلرید، فرض برابری نرخ تغذیه با نرخ تخلیه طبیعی از چشمه‌ها و جریان پایه	تخمین مجموع برداشت توسط مصارف مختلف با استفاده از آمارهای موجود، تخمین تخلیه از خروجی‌های طبیعی	برآوردی انجام نشده و در فرآیند برآورد بیلان به‌دست آمده است
مدل مفهومی سیستم آبخوان آبرفتی کربناتی حوضه بزرگ	۲۰۱۰	ایالات متحده آمریکا	مدلسازی بیلان منطقه غیراشباع خاک (توزیعی) در مناطق مستعد در تغذیه‌کنندگی برای تخمین بازه درصد تغذیه	استفاده از داده‌های مطالعات گذشته و جزئی تبخیر و تعرق در منطقه، تخمین مجموع برداشت، در نظر گرفتن کمترین جریان طبیعی روزانه خروجی	با استفاده از آمار چاه‌های مشاهده‌ای و اکتشافی (آبدهی ویژه)
مدلسازی آب زیرزمینی نامبیلاپ	۲۰۱۲	استرالیا	برآورد تغذیه سالانه با استفاده از معادله ریچاردز (مدلسازی ناحیه اشباع در یک بعد)	تبخیر و تعرق (داده‌های نفوذسنجی و پنمن ماتیس)، تخمین مجموع برداشت با استفاده از آمارهای موجود، تخمین جریان پایه با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی	برآوردی انجام نشده و در فرآیند برآورد بیلان به‌دست آمده است.
بیلان آب برای آب زیرزمینی محدوده مشترک بهار جیتا	۲۰۱۳	لبنان	فرض اولیه (درصدی از بارش و آبیاری) که تحلیل حساسیت شده است.	مقادیر برداشت براساس آمارهای بهره‌برداری، آمار جریان‌های موجود در منطقه (ماهانه)	برآوردی انجام نشده و در فرآیند برآورد بیلان به‌دست آمده است.
پروژه بیلان آب منطقه جنوب شرقی (توسعه یک مدل منطقه‌ای جریان آب زیرزمینی)	۲۰۱۵	استرالیا	برآورد تغذیه حاصل از بارش با استفاده از مدل LEACHM و تصاویر ماهواره‌ای و بیلان آب در سطح با الگوریتم CMRSET	مقادیر برداشت براساس آمارهای بهره‌برداری، آمار جریان‌های موجود در منطقه	برآوردی انجام نشده و در فرآیند برآورد بیلان به‌دست آمده است.
بیلان ماهانه آب زیرزمینی منطقه کلونا	۲۰۱۶	کانادا	نرخ تغذیه به‌وسیله کسری از آب مازاد محاسبه شده است.	تخلیه به‌وسیله شبیه‌سازی ساده خطی مخزن محاسبه شده است. مقادیر برداشت براساس آمارهای بهره‌برداری، تبادلات مرزی رخ داده با استفاده از قانون دارسی	به‌وسیله شبیه‌سازی ساده خطی مخزن محاسبه شده است.
تغذیه آب زیرزمینی در اسلوونی	۲۰۱۶	اسلوونی	برآورد تغذیه به‌وسیله مدل توسعه داده شده بیلان منطقه غیراشباع خاک با استفاده از تفکیک رواناب مستقیم و جریان پایه	سازمان محیط زیست تخلیه براساس آمارهای بهره‌برداری (تخلیه طبیعی، برداشت‌ها)	برآوردی انجام نشده و در فرآیند برآورد بیلان به‌دست آمده است.

همچنین، تأمین پایدار آب شرب شهر بیروت به‌عنوان هدف اصلی در مطالعه بیلان آب برای آب زیرزمینی محدوده مشترک بهار جیتا لبنان (۲۰۱۳)، نیاز به دخالت همزمان نیازهای شهری را در فرآیند مدلسازی ایجاب کرده است. ازاین‌رو در این مطالعه از مدلسازی یکپارچه منابع آب استفاده شده و ابزار مدلسازی شیءگرا WEAP به‌کار گرفته شده است تا بتوان مصارف و منابع مختلف را در برآورد بیلان دخیل کرد (جدول ۵). هر شبیه‌سازی نیازمند واسنجی و اعتبارسنجی است. عموماً جهت انجام این عملیات، قسمتی از مدت زمان دوره مدلسازی که با دوره داده‌های مشاهداتی برابر است، در نظر گرفته شده است. با توجه به عدم‌قطعیت اندک (معمولاً کمتر از ۱۰ درصد) داده‌های مشاهداتی مانند تراز آب، جریانات سطحی که در فرآیند مدلسازی برآورد می‌شوند، با در نظر گرفتن حد اختلافی معقولانه بین این داده‌ها با مقادیر شبیه‌سازی شده آن، فرآیند واسنجی سایر پارامترهای غیرقطعی، با استفاده از روش‌هایی همچون خطای جذر میانگین مربعات[1] انجام گرفته است.

۶. تحلیل عدم‌قطعیت

ماهیت پیچیده خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و تغییرات مکانی شدید آنها و همچنین محدودیت‌های فراوان جهت اندازه‌گیری این خصوصیات از یکسو و عدم‌قطعیت در اندازه‌گیری پارامترهای اقلیمی و هیدرولوژیکی ازسوی دیگر، ازجمله منابع اصلی بروز عدم‌قطعیت در برآوردهای بیلان آب زیرزمینی است. این پیچیدگی با توجه به وابسته بودن ماهیت رفتاری این برآوردها به محدوده مورد مطالعه و خصوصیات آن، شدیدتر نیز می‌شود. در مطالعات بیلان مورد بررسی، با توجه به اهداف و مقیاس برآورد بیلان، عدم‌قطعیت‌های برآورد بیلان، مورد تحلیل کمّی و دقیقی قرار نگرفته است و تنها، منابع عدم‌قطعیت آنها معرفی شده است. به‌طور کلی اصلی‌ترین منابع عدم‌قطعیت در برآورد بیلان آب زیرزمینی، پارامترهای مربوط به تغذیه و تخلیه است. محدودیت‌های آماربرداری و تغییرات مکانی خصوصیات فیزیکی خاک و به تبع آن، تغییرات مکانی نرخ نفوذ عمقی و هدایت هیدرولیکی در برآورد نرخ تغذیه و عدم‌قطعیت‌های فراوان در برآورد تبخیر و تعرق و تشخیص تخلیه‌گاه‌ها در برآورد نرخ تخلیه و همچنین مرزبندی سیستم آب زیرزمینی و شناخت حدودی جریانات زیرزمینی در برآورد تبادلات مرزی جریان، ازجمله اصلی‌ترین منابع عدم‌قطعیت در برآورد بیلان آب زیرزمینی‌اند. (جدول ۶)

با توجه به این منابع عدم قطعیت و خطا، می‌توان پارامترهای نفوذ عمقی (بارش، آبیاری، شبکه آبرسانی یا فاضلاب و ...) و جریان ورودی از مرزها را از میان پارامترهای ورودی و همچنین پارامترهای تراوش به جریانات سطحی و زیرسطحی و خروجی از مرزها را از میان پارامترهای خروجی به‌عنوان مهمترین و چالش‌برانگیزترین پارامترهای بیلان معرفی کرد. به‌طوری‌که اعداد برآورد شده با رویکردها و فرضیات متفاوت حتی تا چند برابر هم می‌توانند نسبت به هم متفاوت باشند.

1. Root-mean-square error (RMSE)

ب) بررسی رویکردها و اهداف کلان از برآورد بیلان آب زیرزمینی در سطح بین‌المللی

ارزیابی بیلان منابع آب زیرزمینی می‌تواند ابزار مناسبی جهت شناسایی خصوصیات یک سیستم آب زیرزمینی نظیر ذخیره این منابع و رفتار هیدرولیکی آنها باشد و پژوهشگران، متخصصان و تصمیم‌گیران در مسائل مربوط به منابع آب را در شناسایی محدودیت‌های موجود در مسیر ارزیابی این منابع یاری کند.

مطالعات مورد بررسی نیز با اهدافی این‌چنینی به مطالعه بیلان منابع آب زیرزمینی پرداخته‌اند. ارزیابی منابع آب زیرزمینی در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف، در طرح‌های ارزیابی جامع منابع آب کشورها، ارزیابی منابع آب موجود در یک منطقه جهت تخصیص پایدار آب، شناسایی ملزومات و محدودیت‌های ارزیابی منابع آب زیرزمینی و تخمین مؤلفه‌هایی همچون تغذیه و تخلیه، ازجمله اهداف خرد و کلان در برآورد بیلان منابع آب زیرزمینی هستند (جدول ۲). به‌طور کلی در مطالعات مختلف، رویکردها و روش‌های برآورد بیلان، به‌عنوان ابزارهای کاربردی و منعطفی جهت ارائه چشم‌اندازهای مناسب از یک سیستم آب زیرزمینی، با هدف پایداری کشاورزی، صنعت، محیط زیست و در نگاه نهایی، جوامع بشری است.

ج) مزایا و آسیب‌شناسی الگوها در سطح بین‌المللی در برآورد بیلان آب زیرزمینی

روش‌ها و الگوهای مورد استفاده در مطالعات مورد بررسی در برآورد بیلان، دارای مزایا و معایب خاص خود هستند و به‌طور قطع نمی‌توان الگوی برتری را از این بین معرفی کرد. اما می‌توان به نقاط قوت قابل توجه در طرح‌های انجام شده در زمینه بیلان منابع آب زیرزمینی اشاره کرد:

- تهیه و ارائه گزارش‌ها و اطلس‌های بیلان و یا حسابداری آب به‌صورت سالانه و ارزیابی سالانه منابع آب زیرزمینی در خلال این گزارش‌ها،
- برآورد بیلان منابع آب زیرزمینی در مقیاس حوضه‌ای و در سطح آبخوان‌ها جهت کاهش عدم‌قطعیت‌های موجود در مؤلفه‌های تغذیه و تخلیه و همچنین تدقیق در برآورد ذخیره آبی یک منطقه، کشور و یا قاره،
- استفاده از مدل‌های منطقه‌ای جهت شبیه‌سازی سیستم‌های آب زیرزمینی با توجه به شرایط خاص منطقه از نظر محدودیت‌های آماربرداری، خصوصیات اقلیمی، خصوصیات زمین‌شناسی و توپوگرافی، نوع مصارف و غیره،
- توسعه و بهبود روش‌ها در گذر زمان و انعطاف آنها در استفاده از رویکردهای مختلف.

همچنین این روش‌ها و الگوها نقاط ضعفی نیز دارند که در زیر به برخی از آنها اشاره شده است:

- عدم وجود یکپارچگی در الگوی روش و تجهیزات آماربرداری در نقاط مختلف یک طرح جامع برآورد بیلان،
- در یک طرح جامع برآورد بیلان، در بعضی محدوده‌های مطالعاتی، برخی مؤلفه‌ها با عدم‌قطعیت بیشتری نسبت به محدوده‌های دیگر لحاظ شده و یا به کل لحاظ نمی‌شوند که عدم‌قطعیت برآورد کلی بیلان را در طرح مورد نظر افزایش می‌دهد،
- عدم تدقیق در تحلیل عدم‌قطعیت‌های موجود در برآورد بیلان منابع آب زیرزمینی.

جدول ۵. کاربرد مدلسازی در مطالعات برآورد بیلان منابع آب زیرزمینی

پروژه/ مطالعه	تاریخ پروژه/ مطالعه	نام	مساحت محدوده (کیلومتر مربع)	مدلسازی بیلان					
				نوع مدل	روش حل (عددی غیرعددی)	ابعاد	روابط / مدل‌های فرعی		
							تغذیه	تخلیه	ذخیره
تأمین آب سیستم رودخانه وال: ارزیابی آب زیرزمینی	۲۰۰۶	آفریقای جنوبی	۲۴۱,۴۷۹	استفاده از نتایج تحقیقات متعدد (مدل‌های مفهومی منطقه‌ای، FEFLOW 3D)	-	-	آمار موجود در گزارش‌های پیشین	آمار موجود در گزارش‌های پیشین	آمار موجود در گزارش‌های پیشین
مدل مفهومی سیستم آبخوان آبرفتی کربناتی حوضه بزرگ	۲۰۱۰	ایالات متحده آمریکا	۲۴۸,۸۹۹	مدل مفهومی	عددی	استفاده از داده‌های با مقیاس ۲۷۰ متر ماهانه مدل مشخصه حوضه[1]	مدل بیلان خطی برای هر سلول	پریستلی تیلور برای تبخیر و تعرق	پس از برآورد بیلان به‌صورت تغییرات ذخیره ارائه شده است.
مدلسازی آب زیرزمینی نامبیلاپ	۲۰۱۲	استرالیا	۴۲	مدل مفهومی	عددی	۴۰ متر	نرخ تغذیه با استفاده از مدل منطقه‌ای محدوده، مدل MIKE SHE برای ورودی‌های مرزی	تبخیر و تعرق با استفاده از مدل منطقه‌ای محدوده، مدل MIKE SHE برای خروجی‌های مرزی	پس از برآورد بیلان به‌صورت تغییرات ذخیره ارائه شده است.
بیلان آب برای آب زیرزمینی محدوده مشترک بهار جیتا	۲۰۱۳	لبنان	۴۰۶	WEAP[1]	مدل خطی	شیءگرا	معرفی درصد تغذیه بارش و آب برگشتی به مدل	تبخیر تعرق با استفاده از روش فائو، آمار برداشت مصارف، معرفی الگوی جریان ماهانه به مدل	پس از برآورد بیلان به‌صورت تغییرات ذخیره ارائه شده است.

پروژه/ مطالعه	تاریخ پروژه/ مطالعه	نام	مساحت محدوده (کیلومتر مربع)	مدلسازی بیلان				
				نوع مدل	روش حل (عددی غیرعددی)	ابعاد	روابط / مدل‌های فرعی	
							تغذیه	تخلیه	ذخیره
پروژه بیلان آب منطقه جنوب شرقی (توسعه یک مدل منطقه‌ای جریان آب زیرزمینی)	۲۰۱۵	استرالیا	۲۸۰۰۰	MODFLOW	عددی	۱۰۰۰ متری در سه لایه	برآورد تغذیه با استفاده از مدل LEACHM به‌عنوان ورودی برایMODFLOW	آمار و اطلاعات موجود	خروجی مدلسازی
بیلان ماهانه آب زیرزمینی منطقه کلونا	۲۰۱۶	کانادا	۱۱۸۸	مدل مفهومی نیمه‌توزیعی با گام‌های زمانی ماهانه	عددی	۴۲ منطقه براساس خصوصیات توپوگرافی و تخلیه (زهکشی)	قانون دارسی برای تبادلات مرزی	قانون دارسی برای تبادلات مرزی، شبیه‌سازی خطی مخزن	شبیه‌سازی خطی مخزن
تغذیه آب زیرزمینی در اسلوونی	۲۰۱۶	اسلوونی	۲۰۲۷۳	GROWA[۲]	عددی	۱۰۰ متر	محاسبه در فرآیند مدلسازی	محاسبه در فرآیند مدلسازی	محاسبه در فرآیند مدلسازی

۱. Basin Characterization Model (BCM): یک مدل نیمه‌فیزیکی جهت شبیه‌سازی تغذیه آب‌زیرزمینی و بیلان آب با مؤلفه‌های باران، برف، تبخیر و تعرق، رطوبت خاک و ذخیره، جریان و هدایت هیدرولیکی ناحیه اشباع است و یک مدل با رویکردی یکپارچه جهت برنامه‌ریزی منابع آب است که به‌وسیله آن می‌توان مدل بیلان عمومی را ایجاد کرد.

۲. مدلی جهت برآورد بیلان.

جدول ۶. منابع عدم‌قطعیت‌ها و تحلیل آنها در برآورد بیلان

پروژه/ مطالعه	تاریخ پروژه/ مطالعه	کشور	تحلیل عدم‌قطعیت	
			منابع عدم‌قطعیت	توضیحات
مدل مفهومی سیستم آبخوان آبرفتی کربناتی حوضه بزرگ	۲۰۱۰	ایالات متحده آمریکا	نرخ تغذیه و تخلیه	عدم‌قطعیت کلی در تغذیه ۵۰ ± درصد عدم‌قطعیت کلی در تخلیه ۳۰ ± درصد در مورد تغذیه، نرخ نفوذ مستقیم از بارش و نرخ نفوذ از رواناب سطحی و در مورد تخلیه، پارامترهای تبخیر و تعرق و جریانات پایه دارای عدم‌قطعیت هستند.
مدلسازی آب زیرزمینی نامبیلاپ	۲۰۱۲	استرالیا	داده‌های اقلیمی	منبع عدم‌قطعیت تنها معرفی شده و برآورد نشده است و به واسنجی اکتفا شده است.
پروژه بیلان آب منطقه جنوب شرقی (توسعه یک مدل منطقه‌ای جریان آب زیرزمینی)	۲۰۱۵	استرالیا	تحلیل حساسیت و عدم‌قطعیت تغذیه و تخلیه	عدم‌قطعیت موجود در محاسبات نرخ نفوذ، هدایت هیدرولیکی و برآورد تبخیر و تعرق به روش FAO56، تحلیل حساسیت با نصف و دو برابر کردن تغذیه، هدایت هیدرولیکی و نرخ تخلیه
بیلان ماهانه آب زیرزمینی منطقه کلونا	۲۰۱۶	کانادا	هندسه آبخوان، داده‌های هیدرولیکی آبخوان، تغذیه و تخلیه	تحلیل عددی صورت نگرفته و توصیفی است. تبادلات بین آبخوان و جریانات سطحی، آب برگشتی از مصارف، تغذیه حاصل از بارش، برداشت از آبخوان

نظر به بررسی‌های انجام شده در سطح بین‌المللی، یکی از رویکردهای بسیار مناسب برآورد بیلان آب، چارچوب حسابداری آب است که با استفاده از آن می‌توان اهدافی ازجمله مکان‌یابی نقاط مناسب جهت اعمال سیاست به منابع آب، شناسایی مکان‌های مناسب جهت توسعه و بهبود بهره‌وری، تعیین خط‌مشی‌های قیمتگذاری آب و تحلیل نظام عرضه و تقاضا را محقق کرد. چارچوب حسابداری آب، مهیا کردن فرآیندی جهت جمع‌آوری، سازماندهی و ترکیب داده‌های فیزیکی (مقادیر حجمی آب) و اقتصادی آب به‌منظور تدوین مجموعه‌ای از اطلاعات یکپارچه از آبی است که به یک محدوده مطالعاتی وارد، در آن ذخیره و از آن خارج می‌شود. هدف اصلی این رویکرد، سازماندهی داده‌های مهم منابع آب و اقتصاد، دسته‌بندی آنها در تعدادی حساب، کنار هم قرار دادن این حساب‌ها و ایجاد بستری مناسب جهت تحلیل منابع آب است.

کشور استرالیا یکی از پیشگامان در به‌کارگیری چارچوب حسابداری آب بوده و آن را برای تمام

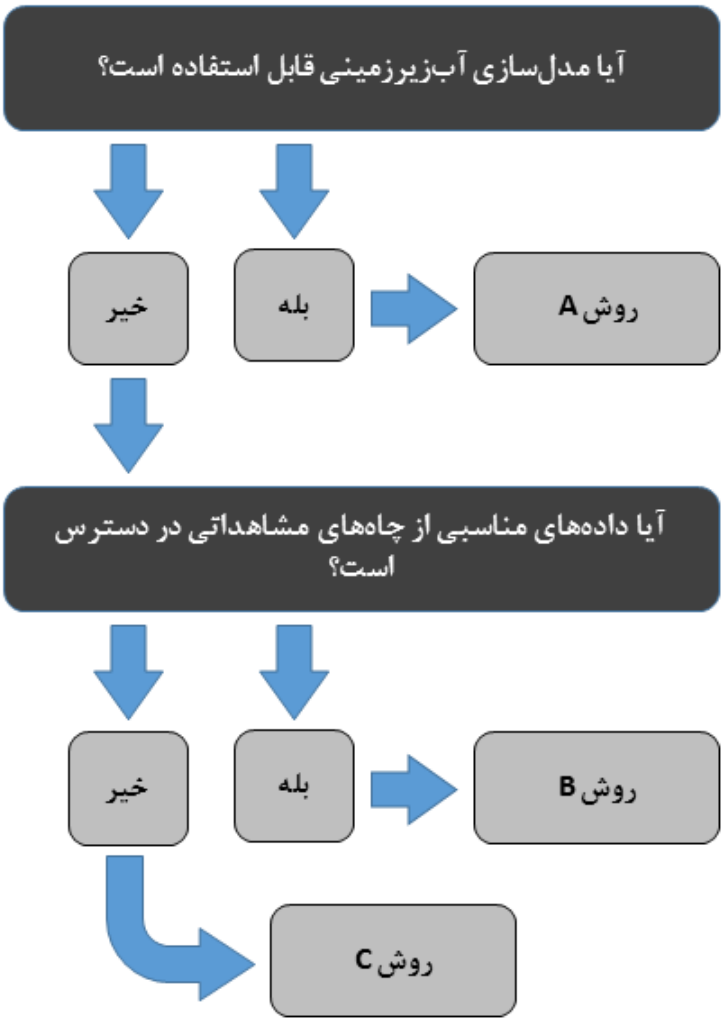
ایالات خود با استفاده از اطلاعات موجود بین سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۰ پیاده‌سازی کرد که در نتیجه آن، اولین گزارش حسابداری آب برای سال‌های ۱۹۹۳ تا ۱۹۹۶ و پس از آن گزارشی در سال ۲۰۰۱ به‌صورتی دقیق‌تر برای بازه مذکور منتشر شد.

در سال ۲۰۱۱، فرمانداری نیوساوت‌ولز (NSW)، روش‌شناسی بخش آب زیرزمینی گزارش ملی حسابداری سالانه آب[1] را منتشر کرد. سازمان آب NSW دریافت که داده‌های مناسب آب زیرزمینی جهت استفاده در گزارش‌های سالانه حسابداری آب، در این محدوده بسیار متغیرند. برای تمامی پیکره‌های آبرفتی و لایه‌های آب‌دار در این منطقه، مجموعه‌ای از چاه‌های مشاهداتی مناسب، داده‌های اکتشافی اندازه‌گیری شده و یک شبیه‌سازی کامپیوتری مهیا شده است که با یک بار به‌روزرسانی آن توسط داده‌های ورودی مورد نیاز، می‌توان تمامی ملزومات تهیه بیلان برای آبخوان مورد نظر را تأمین کرد. برای سایر مناطق نیز بیلان منابع آب زیرزمینی بدون نیاز به اطلاعات و یا با اطلاعات اندک در دسترس قابل تخمین است. البته برای بهبود برآورد منابع آب زیرزمینی جهت ارائه در گزارش‌های حسابداری آب، سازمان آب NSW، بودجه‌ای را جهت توسعه سیستم‌های پایش هیدرولوژیکی و روش‌های برآورد منابع آب زیرزمینی جهت به‌کارگیری در گزارش‌های حسابداری آب، اختصاص داد. این روش در سال ۲۰۱۵ به‌روزرسانی شد. در این دستورالعمل، روش مناسب برای هر محدوده با استفاده از الگوریتم ساده تصمیم‌گیری زیر انتخاب می‌شود (شکل ۹). این روش‌ها به سه روش A (مدل‌های آب زیرزمینی)، B (نوسانات تراز آب)[2] و C (بیلان منطقه غیراشباع خاک)[3] تقسیم شده‌اند.

در تمامی مطالعات آب زیرزمینی در گزارش حسابداری آب حوضه‌های مختلف استرالیا، مراحل مدلسازی، واسنجی و تحلیل‌های عدم‌قطعیت با توجه به پارامترهای دارای عدم‌قطعیت، طبق دستورالعمل مدلسازی آب زیرزمینی استرالیا (۲۰۱۲) انجام شده است.

1.General Purpose Water Accounting Reports
2.Water Table Fluctuation (WTF)
3. Soil Water Budget (SWB)

شکل ۹. الگوریتم انتخاب روش برآورد حساب آب زیرزمینی (روش‌شناسی آب زیرزمینی NSW، ۲۰۱۵)



د) مرور و جمع‌بندی اجمالی بر اهم آموزه‌ها در مطالعات بین‌المللی برآورد بیلان

در بخش دوم این مطالعه به بررسی الگوها و مطالعات بین‌المللی در زمینه برآورد و تهیه بیلان پرداخته و به اهم نکات و آموزه‌های این مطالعات اشاره شد. بیلان آب زیرزمینی در مقیاس‌های مکانی مختلفی نظیر مقیاس‌های قاره‌ای، کشوری، منطقه‌ای، حوضه‌ای و آبخوان قابل برآورد است که انتخاب نوع این مقیاس‌ها براساس هدف از تهیه بیلان تعیین می‌شود. همچنین بیلان آب زیرزمینی باید در مقیاس زمانی مشخصی تهیه شود. با توجه به تأخیر سیستم آب زیرزمینی در پاسخ به تغییرات تغذیه و همچنین سرعت بسیار کم آب در محیط خاک، بهتر است بیلان آب زیرزمینی معمولاً برای دوره‌های سالانه و به بالا (۱۰ الی ۲۰ ساله) تهیه شود. بنابراین در تهیه بیلان آب زیرزمینی، توجه به دو نکته مقیاس مکانی و مقیاس زمانی تهیه بیلان، بسیار حائز اهمیت است. بیلان آب زیرزمینی دارای مؤلفه‌های مختلف تغذیه و تخلیه‌کننده آب زیرزمینی است که برخی از این مؤلفه‌ها، خود به برآورد نیاز دارند. به‌دلیل حضور آب

در خاک، مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی به خصوصیات خاک وابسته است که به‌دلیل ماهیت ناشناخته و پیچیده، معمولاً با ساده‌سازی‌ها و فرضیاتی در محاسبات اعمال شده، که همین امر باعث افزایش سطح خطا و عدم‌قطعیت در برآورد بیلان می‌شود. بنابراین، توجه به تحلیل‌های عدم‌قطعیت در تهیه بیلان امر بسیار مهمی است که به لزوم آن در مطالعات مختلف بین‌المللی اشاره شده است. تاکنون روش‌ها و چارچوب‌های مختلفی برای تهیه و ارائه بیلان ارائه شده که به اهم آنها اشاره شد. در این میان، یکی از رویکردهای نوین در برآورد دارایی‌های آبی، چارچوب حسابداری آب است. هدف اصلی این رویکرد، سازماندهی داده‌های مهم منابع آب، دسته‌بندی آنها در تعدادی حساب، کنار هم قرار دادن این حساب‌ها و ایجاد بستری مناسب جهت تحلیل منابع آب است. کشور استرالیا یکی از پیشگامان به‌کارگیری این چارچوب در برآورد دارایی‌های آبی است و برای منابع مختلف ازجمله آب زیرزمینی، روش‌شناسی برآورد بیلان ارائه داده است که به سه روش A (مدل‌های آب زیرزمینی)، B (نوسانات تراز آب) و C (بیلان منطقه غیراشباع خاک) تقسیم شده‌اند.

به‌طور کلی برآورد بیلان آب زیرزمینی، ابزار بسیار کاربردی و مهمی برای تحلیل منابع آب زیرزمینی، شناسایی منابع تغذیه‌کننده و تخلیه‌کننده و برآورد موجودی آن در دوره‌های مختلف زمانی است که تحلیل و اتخاذ تصمیم‌ها در مدیریت این منابع را برای کارشناسان، تصمیم‌گیران و قانونگذاران تسهیل می‌کند. این رویکرد در کشورهای بسیاری جهت تهیه اطلس‌های منابع آب و گزارش‌های منابع آب موجود، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

بخش سوم ـ نقدی بر روش‌های رایج برآورد بیلان آب زیرزمینی کشور

الف) مسائل، چالش‌ها و مشکلات برآورد بیلان آب زیرزمینی

منابع آب زیرزمینی به‌عنوان تنها منبع آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بررسی مستندات موجود و همچنین گزارش‌های بیلان انجام شده برای دشت‌های کشور نشان می‌دهد که روش‌های حاضر به جهت برآورد بیلان آب زیرزمینی، منابع عدم‌قطعیت زیادی حتی تا چند برابر را به‌همراه دارند که در محاسبات بیلان در نظر گرفته نمی‌شوند. همچنین شدت اثر این عدم‌قطعیت‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای به محدوده مورد مطالعه وابسته است. ازجمله این عدم‌قطعیت‌ها می‌توان به میزان ورودی (تغذیه) به آبخوان، ضریب آب برگشتی مصارف کشاورزی، ورودی و خروجی آبخوان، قابلیت انتقال و ضریب ذخیره آبخوان و حتی آب‌های محاسبه نشده مانند برداشت‌های ثبت نشده، دزدی آب و غیره اشاره کرد. طولانی بودن زمان محاسبات مربوط به بیلان آب، با توجه به نبود اطلاعات لازم و همچنین عدم امکان اندازه‌گیری برخی از مؤلفه‌های بیلان آب، برآورد بیلان آب زیرزمینی را با مشکلات فراوانی از لحاظ دقت و زمان کاربرد مواجه کرده است. در ادامه به مسائل، چالش‌ها و

مشکلات برآورد بیلان آب زیرزمینی کشور، براساس بررسی‌های انجام شده و همچنین گزارش اندیشکده تدبیر آب ایران (۱۳۹۳)، اشاره شده است.

۱. میزان ورودی (تغذیه) به آبخوان

نفوذ ناشی از بارش و همچنین رواناب‌ها به‌عنوان ورودی به منابع آب زیرزمینی (آبخوان) با عدم‌قطعیت همراه است که به نوسانات سالانه بارش و روندهای بلندمدت آن بستگی دارد. ازاین‌رو، استفاده از عدد متوسط بارش موجب ساده‌سازی و اعمال خطا در میزان ورودی طبیعی به آبخوان می‌شود. جهت جلوگیری از بروز خطا و همچنین بررسی عدم‌قطعیت ورودی‌ها به یک سفره آب زیرزمینی لازم است که بارش بلندمدت محدوده تأثیرگذار بر آبخوان مورد بررسی قرار گیرد و به‌جای ارائه یک عدد قطعی متوسط، باید ورودی طبیعی به‌صورت احتمالی بررسی و میزان ورودی طبیعی به آبخوان در شرایط مختلف بارش محاسبه و ارائه شود. همچنین تغییرات درون‌سالی بارش و الگوی بارش نیز، عامل تعیین‌کننده‌ای است که می‌تواند در تدقیق برآوردهای بیلان، نقش مؤثری ایفا کند.

۲. ضریب نفوذپذیری

ضریب نفوذپذیری یکی از عدم‌قطعیت‌هایی است که در محاسبات ورودی به آبخوان وجود دارد. ضریب نفوذپذیری باید از طریق اندازه‌گیری مستقیم اعتبارسنجی شود، در غیر این صورت ارقام در نظر گرفته شده، دارای عدم‌قطعیت خواهند بود. در مطالعات برآورد بیلان آب‌های زیرزمینی کشور، جهت محاسبه میزان نفوذ، ابتدا از میزان بارش مربوط به مناطق مختلف، میزان تبخیر و تعرق کسر می‌شود و بدین ترتیب بارش مؤثر[1] محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از اطلاعات مربوط به میزان رواناب تولید شده در محدوده مورد نظر، رواناب محاسبه و از بارش مؤثر کسر شده و مقدار باقی‌مانده، معادل میزان نفوذ خواهد شد. ازاین‌رو، در محاسبه مقدار نفوذ، عدم‌قطعیت در محاسبه میزان تبخیر و تعرق نیز می‌تواند وجود داشته باشد که باید در محاسبات در نظر گرفته شود. همچنین این ضریب با ضرایب هیدرودینامیک آبخوان نیز مرتبط است که براساس اطلاعات چاه‌های اکتشافی قابل برآورد است که توصیه می‌شود این کنترل در برآوردها انجام شود.

۳. ضریب آب برگشتی مصارف کشاورزی

آب برگشتی مصارف کشاورزی نیز از دیگر عوامل عدم‌قطعیت در محاسبات بیلان است که به‌صورت ضریبی از آب برگشتی کشاورزی محاسبه می‌شود که در این زمینه توجه به عمق سطح ایستابی آب و ضخامت ناحیه غیراشباع، اهمیت فراوانی دارد. این ضریب از چند درصد تا حدود ۳۰ الی ۴۰ درصد (براساس نوع آبیاری، الگوی کشت، اقلیم، شیب زمین، بافت خاک و ...) متغیر است. همچنین تأخیر

---

۱. بارش مؤثر به‌صورت بارشی که تبدیل به رواناب یا نفوذ می‌شود، تعریف شده است. (گزارش اندیکشده تدبیر آب، ۱۳۹۱).

زمانی بین زمان ورود آب به خاک (نفوذ) و رسیدن آن به سفره آب زیرزمینی (تغذیه)، عامل مهمی به‌خصوص در آبخوان‌هایی که ضخامت ناحیه غیراشباع بزرگ‌تر دارند، محسوب می‌شود که از چند ساعت تا چند سال متغیر است. نصب امکانات اندازه‌گیری در آبخوان‌های حساس کشور و آزمودن زمان پیمایش آب در ناحیه غیراشباع با روش‌هایی همچون آزمون ردیاب می‌تواند در این زمینه کمک‌کننده باشد. در شرایط عدم وجود داده‌های اندازه‌گیری پیشنهاد می‌شود با بهره‌گیری از توصیه مراجع فنی و تجربیات پیشین برای این زمان تأخیر، سری زمانی تغذیه مورد استفاده در محاسبات بیلان را از نظر زمانی واسنجی کرد.

۴. ورودی و خروجی زیرزمینی، قابلیت انتقال و ضریب ذخیره آبخوان

میزان ورودی و همچنین خروجی از محدوده مطالعاتی، یکی از پارامترهای مهم برآورد بیلان آب زیرزمینی است. اهمیت این پارامتر زمانی است که مرز محدوده مطالعاتی به‌صورت مرزهای نفوذپذیر بوده و موجب ورود و خروج آب زیرزمینی از آبخوان مجاور شود که با عدم‌قطعیت‌هایی همراه است. میزان ورودی/خروجی به پارامترهایی نظیر عرض ناحیه انتقال، گرادیان هیدرولیکی و ضریب قابلیت انتقال بستگی دارد. بنابراین در نظر گرفتن یک سال معین و تعمیم آن به کل دوره برنامه‌ریزی منجر به ورود عدم‌قطعیت قابل توجهی می‌شود. علاوه‌براین، ضریب ذخیره آبخوان با توجه به نوع آبخوان و همچنین مشخصه‌های آبخوان، یکی دیگر از منابع عدم‌قطعیت است. کنترل محاسبات در حوضه‌های آبریز زیرزمینی (بدون ورود و خروج آب زیرزمینی) و همچنین ناحیه‌بندی محدوده مطالعاتی به‌لحاظ داده‌های مورد استفاده ضرایب قابلیت انتقال و ضریب ذخیره (براساس داده‌های حاصل از چاه‌های اکتشافی و آزمون پمپاژ)، می‌تواند به تدقیق نتایج کمک کند.

به‌عنوان مثال در یک مطالعه مقایسه‌ای انجام شده در جنوب ایتالیا در سال ۲۰۱۷، سری‌های زمانی سالانه بیلان آب زیرزمینی با استفاده از دو رویکرد مختلف بیلان ارزیابی شد. در رویکرد اول از معادله اصلی بیلان (ارائه شده در قسمت مقدمه بخش اول) استفاده شده که حجم آب را برحسب میلیون مترمکعب و ارتفاع آب زیرزمینی را برحسب میلیمتر بر واحد سطح بیان می‌کند. در رویکرد دوم برای تخمین حجم آب زیرزمینی از روش‌های زمین‌آماری[1] استفاده شد و واسنجی برآورد بیلان انجام گرفت و منجر به کاهش عدم‌قطعیت‌ها در پارامترهای آبخوان شد.

---

۱. این روش (Geostatistical Techniques)، مجموعه‌اي از ابزارهاي آماري را با اختلاط ابعاد زمانی و مکانی مشاهدات در پردازش داده‌ها فراهم می‌آورد که با استفاده از اطلاعات به‌دست آمده از نقاط نمونه‌برداري شده قادر به ارائه مجموعه وسیعی از تخمین‌گرهاي آماري به‌منظور برآورد خصوصیت مورد نظر در نقاط نمونه‌برداري نشده، شود. ابزارهاي جدیدي که اخیراً توسعه پیدا کرده، مسائل جدی‌تر و دقیق‌تری همچون ارزیابی عدم‌قطعیت در مورد کیفیت پارامتر مورد نظر و همچنین مدلسازي فرآیندهای مکانی و زمانی را نیز وارد این دانش کرده است.

ب) تحلیلی بر آموزه‌های مهم از بررسی روش‌های برآورد بیلان آب زیرزمینی در سطح بین‌المللی و پیشنهاد مسیر تدقیق و بهبود روش برآورد بیلان آب زیرزمینی در کشور

رویکردهای پیشنهاد شده در ادامه از اصلی‌ترین وظایف وزارت نیرو در راستای تدقیق بیلان آب زیرزمینی بوده و باید جزئیات لازم جهت برنامه‌ریزی تحقق آنها انجام شود. تقسیم فعالیت‌ها و کارهای لازم به انجام و ملحوظ کردن اعتبارات مالی و فنی در برنامه‌های سالانه وزارت نیرو ازجمله موارد حائز اهمیت است و ضرورت دارد هیئت دولت و مجلس شورای اسلامی نیز در مصوب کردن بودجه‌های مالی لازم اهتمام ورزند.

۱. رویکرد حسابداری آب با در نظر گرفتن مدلسازی

با توجه به رویکردهای مدیریتی و در نظرگیری ابعاد اجتماعی، اقتصادی و سیاسی منابع آب در چارچوب حسابداری آب، توسعه و استفاده از این چارچوب در برآورد بیلان منابع آب و به‌طور جزئی‌تر، منابع آب زیرزمینی، پیشنهاد می‌شود. یکی از کشورهای پیشگام در امر به‌کارگیری چارچوب حسابداری آب، کشور استرالیا است که از سال ۲۰۰۰ اقدام به تهیه و انتشار گزارش سالانه حسابداری آب در مقیاس حوضه آبریز و کشوری کرده است. برای تهیه گزارش‌های یکپارچه حسابداری آب در سطح کشور، دستورالعمل‌ها و استانداردهایی به سفارش دولت استرالیا توسط سازمان هواشناسی و سازمان‌های آب این کشور تهیه شده است. جهت ارزیابی و برآورد آب زیرزمینی در گزارش سالانه عمومی حسابداری آب، سازمان آب NSW دستورالعملی را در سال ۲۰۱۱ منتشر کرد که سه روش مدلسازی، تحلیل نوسانات سطح آب و بیلان منطقه غیراشباع خاک را برای برآورد آب زیرزمینی، با توجه به آمار و اطلاعات در دسترس معرفی کرده است. به‌طور سالانه، برای تمامی مناطق یا حوضه‌های آبریز موجود در این منطقه، گزارش حسابداری آب تولید شده و آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های مذکور برآورد می‌شود.

با توسعه امکانات آماربرداری و افزایش دقت در شبیه‌سازی و برداشت داده‌ها، امکان تغییر روش به روش‌های دقیق‌تر مانند روش فوق وجود دارد، اما بدون داشتن داده‌های دقیق، کاربرد رویکردهایی مانند رویکرد حسابداری آب توصیه نمی‌شود.

۲. رویکرد تحلیل عدم‌قطعیت

عدم‌قطعیت در پارامترهای برآورد بیلان آب زیرزمینی وجود دارد. محدودیت‌های آماربرداری و تغییرات مکانی خصوصیات فیزیکی خاک و به تبع آن، تغییرات مکانی نرخ نفوذ عمقی و هدایت هیدرولیکی در برآورد نرخ تغذیه و عدم‌قطعیت‌های فراوان در برآورد تبخیر و تعرق و نرخ تخلیه و همچنین مرزبندی سیستم آب زیرزمینی و شناخت حدودی جریانات زیرزمینی در محاسبه تبادلات مرزی جریان، از اصلی‌ترین منابع عدم‌قطعیت در برآورد بیلان آب زیرزمینی است. ازاین‌رو عدم‌قطعیت‌های زیادی در برآورد مؤلفه‌های بیلان وجود دارد که منجر به محاسبات مختلفی از عوامل ورودی و خروجی می‌شود و

در نتیجه به برآورد آب قابل برنامه‌ریزی متفاوت توسط گروه‌های مطالعاتی مستقل می‌انجامد.

لذا باید این عدم‌قطعیت‌ها در حد امکان کاهش یابد. دقت در اندازه‌گیری و برآورد مؤلفه‌های بیلان و رویکرد انجام شبیه‌سازی برای سفره‌های آب زیرزمینی در محاسبه بیلان آب زیرزمینی از راهکارهای کاهش عدم‌قطعیت است. همچنین توصیه می‌شود تحلیل‌های حساسیت بر پارامترهای دارای عدم‌قطعیت در بازه معقول تغییرات آنها انجام شده و همچنین برآوردهای بیلان به‌صورت احتمالاتی (یعنی میانگین داده‌ها و انحراف معیار تغییر از آن) گزارش شود تا بیانگر قطعیت مقادیر بیلان مورد استفاده در برنامه‌ریزی‌ها باشد.

۳. رویکرد سنجش از دور

در زمینه استفاده از تکنیک‌های جدید نظیر سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در تعیین اجزای مختلف بیلان آب، مطالعات متعددی در نقاط مختلف دنیا انجام شده است. در این رویکرد بیلان آبی از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌برداری‌های زمینی استفاده می‌شود که تجربیات بین‌المللی نتایج خوبی را گزارش کرده‌اند. این رویکرد نیز می‌تواند در تعیین بیلان آب زیرزمینی دشت‌های کشور مورد استفاده قرار گیرد. وجود داده‌های زمینی نظیر اطلاعات دستگاه‌های نفوذسنج و نیز داده‌های ثبت آنلاین در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر (مثلاً روزانه) در چاه‌های مشاهده‌ای بسیار راهگشا است. لذا توصیه می‌شود با برنامه‌ریزی دشت‌های کشور به این امکانات مجهز شوند. بومی‌سازی نحوه کاربری و واسنجی تصاویر ماهواره‌ای و تشکیل بانک‌های اطلاعاتی مربوطه از سایر توصیه‌ها در این زمینه است.

تدقیق نقشه‌های کاربری اراضی و الگوی کشت، همچنین تدقیق تبخیر و تعرق واقعی و مصارف و در دسترس بودن آنها در طول زمان با تواترهای قابل قبول از دیگر توصیه‌ها در این راستا است که باید در دستورالعمل‌های سازمان‌های مسئول تهیه آنها نظیر وزارت جهاد کشاورزی قرار گیرد. نکته حائز اهمیت در داده‌ها و اطلاعات لازم همانند نقشه‌های کاربری اراضی یا تبخیر و تعرق واقعی، تعیین آنها در بازه‌های زمانی و تواتر زمانی معقول است، چراکه مطالعات مقایسه‌ای محدود موجود در کشور نشاندهنده تأثیرگذاری قابل توجه نحوه برآورد این پارامترها بر روی بیلان آبخوان و آب تجدیدپذیر (حتی بالغ بر ۵۰ درصد) است و همچنین وجود آنها جهت تنظیم و واسنجی داده‌های سنجش از دور ضرورت دارد.

برای مثال در سال ۲۰۱۷ مطالعه‌ای در استرالیا نشان داد که با بهره‌گیری از تخمین تغییرات ذخیره آب در آبخوان به‌صورت زمینی و تغییرات رطوبت خاک با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای، تدقیق برآوردهای بیلان آب زیرزمینی انجام شده است. در این مطالعه اشاره دارد که ترکیب داده‌های زمینی و ماهواره‌ای به‌خوبی می‌تواند سبب هم‌افزایی شده و نقاط ضعف هر کدام از روش‌ها را برطرف کرده و سبب تدقیق برآوردهای بیلان شود. البته در این مطالعه به تخصص‌های فنی بالاتر برای این رویکرد نیاز است.

۴. رویکرد مدلسازی

استفاده از این رویکرد هزینه‌بر و زمانبر بوده و نیازمند داده‌ها و اطلاعات جزئی‌تری است. توصیه می‌شود که آبخوان‌های مورد مطالعه با انتخاب معیارهای مناسب، دسته‌بندی شده و در هر دسته، در تعداد محدودی از آبخوان‌ها و ترجیحاً در مقیاسی کوچک‌تر براساس امکانات فنی و مالی، کار مدلسازی انجام شود. روش‌شناسی انجام این کار بهتر است به‌گونه‌ای تنظیم شود که حدالامکان بتوان از نتایج کسب شده هم برای تدقیق ضرایب و مؤلفه‌های بیلان در روش‌های مرسوم و هم از قابلیت تعمیم یافته‌ها به سایر آبخوان‌های همان دسته بهره برد.

جمع‌بندی

آمار و اطلاعات منابع آبی به جهت ماهیت احتمالی آنها و همچنین تخمین برخی پارامترها همواره با عدم‌قطعیت‌هایی همراه است. بررسی مستندات و گزارش‌های بیلان منابع آب زیرزمینی در کشور نشان می‌دهد که در روش‌های حاضر به جهت برآورد بیلان آب زیرزمینی، این عدم‌قطعیت‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. به‌دلیل اهمیت برآورد بیلان آب زیرزمینی در کارهای آبی، لازم است بیلان منابع آب زیرزمینی تدقیق شود. ازاین‌رو، اندیشکده آب ایران رویکرد شبیه‌سازی را برای سفره‌های آب زیرزمینی جهت برآورد بیلان آب زیرزمینی پیشنهاد داده است (۱۳۹۳). همچنین، در سطح بین‌المللی رویکردهای مختلفی ازجمله رویکرد حسابداری آب با در نظر گرفتن مدلسازی و رویکرد سنجش از دور برای برآورد بیلان آب زیرزمینی مدنظر قرار گرفته است که نتایج خوبی را گزارش کرده‌اند. با توجه به اینکه وزارت نیرو متولی اصلی مطالعات و تهیه بیلان منابع آب زیرزمینی است، لذا می‌تواند از این رویکردها به‌لحاظ ابعاد علمی، اقتصادی و اجرایی تدقیق و بهبود روش برآورد بیلان آب زیرزمینی در کشور بهره ببرد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

آمار و اطلاعات منابع آبی که پایه و اساس مطالعات بیلان آب زیرزمینی است، به جهت ماهیت احتمالی آنها با عدم‌قطعیت همراه است. ازاین‌رو، لازم است بر این داده‌ها تحلیل عدم‌قطعیت انجام شود و ویژگی‌های محدوده مورد بررسی نیز در این روند مدنظر قرار گیرد. همچنین حساسیت بیلان آب زیرزمینی به مؤلفه‌های ورودی به آبخوان مانند نفوذ از بارندگی و جریان سطحی، تغذیه از آب برگشتی مصارف، به جهت وابستگی به دقت تخمین نفوذپذیری، ضریب ذخیره سفره، قابلیت انتقال و ضرایب آب برگشتی آبخوان بسیار زیاد است. به همین دلیل، استفاده از روش‌های کاربردی و صحت‌سنجی این پارامترها ضروری است. همچنین برخی اطلاعات نظیر کاربری اراضی، الگوی کشت و برداشت از آب زیرزمینی در طول زمان متغیر بوده و باید تغییرات زمانی این اطلاعات در محاسبات ملحوظ شود که

این نیازمند در دسترس بودن اطلاعات زمانی مزبور در تواترهای زمانی منطقی است.

با توجه به مسائل فوق، برآورد بیلان آب زیرزمینی در کشور با چالش‌های متعددی روبه‌رو است. علاوه‌بر مشکل ساختاری به جهت نظارت و کنترل کیفیت برآورد بیلان، انتخاب مقیاس مکانی و زمانی مناسب و همچنین تحلیل عدم‌قطعیت‌های موجود در این برآوردها لازم است. نظر به بررسی‌های انجام شده در این مطالعه و با توجه به تجربیات ملی و بین‌المللی، تدقیق در مقیاس مکانی تا سطح حوضه و آبخوان در کنار تحلیل عدم‌قطعیت، می‌تواند تا حدود زیادی از عدم‌قطعیت‌های برآورد بیلان بکاهد که این رویکرد خود نیازمند دستورالعمل تهیه بیلان و نظام داده‌برداری جامع در سطح کشور است. تدقیق در برآورد بیلان با کمترین سطح عدم‌قطعیت، منوط به تدقیق در برآورد مؤلفه‌های بیلان است که خود منوط به تهیه آمار و اطلاعات پایه و همچنین همگام بودن دوره‌های زمانی این آمار و اطلاعات است. اگرچه این رویکرد از منظر اقتصادی ممکن است امری هزینه‌بر باشد، لکن در برآورد بیلان و آب قابل برنامه‌ریزی آب زیرزمینی و اتخاذ تصمیمات و سیاست‌های اثربخش برای مدیریت پایدار این منابع ارزشمند، بسیار راهگشا و مفید خواهد بود. در سطح بین‌المللی استفاده از روش‌های نوین ازجمله سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در تعیین اجزای مختلف بیلان آب و همچنین استفاده از چارچوب حسابداری آب به‌جهت به‌کارگیری رویکردهای مدیریتی و در نظرگیری ابعاد اجتماعی، اقتصادی و سیاسی منابع آب در برآورد بیلان منابع آب و به‌طور جزئی‌تر، منابع آب زیرزمینی، نتایج خوبی را به‌همراه داشته است.

علاوه‌بر در نظر گرفتن موارد فوق، به‌طور کلی موارد زیر در این مطالعه به‌عنوان رسالت‌های ضروری وزارت نیرو پیشنهاد می‌شود:

- توجه به اولویت‌ها در برنامه‌های وزارت نیرو و متعاقب آن برآورد بودجه‌های لازم برای بالا بردن امکانات سخت‌افزاری، نرم‌افزاری، تجهیزات و فناوری.
- لزوم توجه به عملیات تکمیل و به‌روزرسانی داده‌ها و اطلاعات در حوزه آب زیرزمینی (مانند غنی‌سازی شبکه چاه‌های مشاهده‌ای و نصب دیتالاگرهای آنلاین روی آنها، پایش‌ها و آزمون‌های میدانی مانند آزمون پمپاژ، ردیاب‌ها، ایزوتوپ‌ها، فناوری‌های سنجش از دور و... در راستای تدقیق برآورد مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی) توسط وزارت نیرو.
- نظارت و کنترل کیفیت برآورد بیلان در چارچوب و ساختار نظام‌مند موجود و توجه به ویژگی‌های هر محدوده مورد مطالعه.
- ارائه استاندارد و دستورالعمل اجرایی و جامع در سطح کل کشور توسط سازمان‌ها و مراجع ذی‌ربط (وزارت نیرو، سازمان برنامه و بودجه) جهت پایش و برداشت آمار و اطلاعات و داده‌های مورد نیاز برآورد بیلان (مؤلفه‌های بیلان) و تشکیل بانک اطلاعاتی آنلاین.
- ارائه استاندارد و دستورالعملی اجرایی و جامع در سطح کل کشور توسط سازمان‌ها و مراجع

ذی‌ربط (وزارت نیرو، سازمان برنامه و بودجه) جهت برآورد و تهیه بیلان منابع آب و به‌طور خاص، منابع آب زیرزمینی، با تأکید بر مقیاس‌های مکانی و زمانی و در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌های موجود.

- تهیه دستورالعمل‌های لازم در سازمان‌های مسئول برای فراهم‌آوری داده‌ها و اطلاعات خام پایه مورد نیاز برآورد بیلان در دقت، تواتر زمانی و مقیاس مطلوب و با توجه به‌خصوصیات متفاوت محدوده‌های مطالعاتی کشور.
- دسته‌بندی آبخوان‌های کشور براساس یکسری معیار منتخب و برنامه‌ریزی جهت انجام مدلسازی (عددی) با انتخاب روش‌شناسی مناسب قابل تعمیم و در راستای برآورد/کنترل بیلان.
- مطالعه دقیق ابعاد علمی، اجرایی و اقتصادی تدقیق و بهبود روش برآورد بیلان آب زیرزمینی در کشور با توجه به برنامه‌ریزی‌های بیلان آب و همچنین تعیین آب قابل برنامه‌ریزی.

حوزه‌های سیاستگذار کشور ازجمله مجلس شورای اسلامی نیز می‌توانند در این مسیر ایفای نقش کرده و با تخصیص و تصویب بودجه‌های لازم برای سازمان‌های متولی مانند وزارت نیرو و در صورت نیاز اصلاح ردیف‌های بودجه‌ای فعالیت‌های سازمان‌های ذی‌ربط مسیر را هموار سازند. با برنامه‌ریزی و پیاده‌سازی راهکارهایی مانند آنچه در این نوشتار پیشنهاد شد می‌توان امیدوار بود که در برآوردهای آب زیرزمینی در دسترس و قابل برنامه‌ریزی با دقت بهتری عمل کرد و با رعایت اهداف توسعه پایدار در مورد این منابع، از اتلاف سرمایه‌ها و سیاستگذاری‌های غلط نیز ممانعت نمود.

منابع و مآخذ

۱. دفتر بررسی‌های منابع آب وزارت نیرو، دستورالعمل تهیه بیلان آب، ۱۳۷۰.
۲. دفتر برنامه‌ریزی و مطالعات منابع آب وزارت نیرو، تهیه مدل ریاضی سفره‌های آب زیرزمینی، ۱۳۷۴.
۳. دفتر مطالعات پایه منابع آب وزارت نیرو، دستورالعمل نحوه تهیه گزارش بیلان آب، محدوده‌های مطالعاتی در سطح حوضه‌های آبریز درجه ۲، الف) تهیه گزارش‌های مطالعات پایه منابع آب، ۱۳۹۰.
۴. طرح پایداری منابع آب زیرزمینی، مطالعه موردی دشت رفسنجان، قسمت اول، اندیشکده تدبیر آب ایران، ۱۳۹۳.
۵. فاضلی، ع.، خلاصه مذاکرات، نشست هم‌اندیشی بحران آب زیرزمینی، چالش‌ها و راهکارها، شانزدهمین کنفرانس ملی هیدرولیک ایران، دانشگاه محقق اردبیلی، ۱۵ شهریور ۱۳۹۶.
۶. قانون اجازه تأسیس بنگاه آبیاری، مصوب مجلس شورای ملی وقت، ۱۳۲۲.
۷. قانون اساسی جمهوری اسلامی ایران، مصوب مجلس شورای اسلامی، ۱۳۵۸.
۸. قانون آب و نحوه ملی شدن آن، مصوب مجلس شورای ملی وقت، ۱۳۴۷.
۹. قانون تأسیس وزارت آب و برق، مصوب مجلس شورای ملی وقت، ۱۳۴۲.
۱۰. قانون توزیع عادلانه آب، مصوب مجلس شورای اسلامی، ۱۳۶۱.
۱۱. قانون حفاظت و حراست از منابع آب‌های زیرزمینی کشور، مصوب مجلس شورای ملی وقت، ۱۳۴۵.
۱۲. قانون قنوات، مصوب مجلس شورای ملی وقت، ۱۳۰۹.
۱۳. قانون مدنی کشور، مصوب مجلس شورای ملی وقت، ۱۳۰۷.
۱۴. کتابچی، حامد؛ نیکخواه، روح‌انگیز و مرید، سعید. شبیه‌سازی عددی آبخوان نمدان در استان فارس ایران: بررسی اثرات

مدیریت آب سبز در احیای آبخوان، مجله علمی – پژوهشی تحقیقات منابع آب ایران (پذیرفته شده)، ۱۳۹۶.
۱۵. کمیته فنی اطلس منابع آب وزارت نیرو، تهیه نقشه‌های ژئوفیزیک، دستورالعمل شماره ۲۴، ۱۳۷۴.
۱۶. معاونت امور آب و آبفا وزارت نیرو، دستورالعمل تهیه مدل‌های ریاضی آب زیرزمینی، ۱۳۹۶.
۱۷. معاونت علمی فناوری ریاست‌جمهوری، سند ملی فناوری‌های راهبردی آب (سند اجمالی)، انستیتو آب و انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۳.
۱۸. میرنظامی، سیدجلال‌الدین و باقری، علی. ارزیابی سیستم حکمرانی آب در فرآیند حفاظت از منابع آب زیرزمینی ایران. مجله علمی – پژوهشی تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳(۲): ۵۵-۳۲، ۱۳۹۶.
۱۹. وزارت نیرو، سند ملی توسعه منابع آب، ۱۳۹۰.
۲۰. یوسف‌زاده چابک، معصومه، باقری، علی و داوری، کامران. ارزیابی سیستم منابع آب با رویکرد یکپارچه براساس چارچوب حسابداری آب در محدوده مطالعاتی مشهد. مجله آب و فاضلاب، ۲۷(۵): ۱۶-۳، ۱۳۹۵.
21. Ali A., 2011. NSW General Purpose Water Accounting Reports: Groundwater Methodologies, NSW Department of Primary Industries, Sydney.
22. Alley, W.M., Reilly, T.E. and Franke, O.L., 1999. Sustainability of ground-water resources (Vol. 1186). US Department of the Interior, US Geological Survey.
23. Alloisio, S. and Smith, H.R., 2016. Monthly groundwater budget for the aquifers in the Kelowna BC Area.
24. Andjelov, M., Mikulič, Z., Tetzlaff, B., Wendland, F., Uhan, J., 2016. Groundwater recharge in Slovenia - Results of a bilateral German-Slovenian Research project
25. Bredehoeft, J. and Hall, P., 1995. Ground-water models. Ground Water, 33(4), pp.530-532.
26. Bureau of Meteorology, 2010. Regional Water Balance: Initial Methods Review 2009, Melbourne, Australia.
27. Burrell M., Moss P., Petrovic J., Ali A., (2017) General Purpose Water Accounting Report 2015-2016: Murrumbidgee Catchment, NSW Department of Primary Industries, Sydney
28. Chatterjee, R. and Ray, R.K., 2014. Assessment of ground water resources: a review of international practices. Central Ground Water Board (CGWB), Bujal Bhawan, NH-IV, Faridabad, Haryana, pp.1-101.
29. Davie, T., 2008. Fundamentals of hydrology. Taylor & Francis.
30. District, W.C., 2014. Paso Robles Groundwater Basin Model Update.
31. DWAF, D.W.R.P., 2007. Vaal River System: Large Bulk Water Supply Reconciliation Strategies. Groundwater assessment: Aolomite aquifers.
32. Eslamian, S. ed., 2014. Handbook of engineering hydrology: fundamentals and applications. CRC Press.
33. European Commission, 2015. Guidance document on the application of water balances for supporting the implementation of the WFD, Office for Official Publications of the European Communities.
34. Healy, R.W., 2010. Estimating groundwater recharge. Cambridge University Press.
35. Heilweil, V.M. and Brooks, L.E., 2010. Conceptual model of the Great Basin carbonate and alluvial aquifer system. US Geological Survey Scientific Investigations Report, 5193, p.191.
36. http://rc.majlis.ir/fa/law
37. Marillier, B 2012, Nambeelup groundwater modelling report, Water science technical series, report no.47, Department of Water, Western Australia.
38. Methodology, G.R.E., 1997, 2009, 2015. Report of the groundwater resource estimation committee. Ministry of Water Resources, Government of India, New Delhi.
39. Morgan LK, Harrington N, Werner AD, Hutson JL, Woods J, Knowling MJ, 2015, South East Regional Water Balance Project – Phase 2. Development of a Regional Groundwater Flow Model, Goyder Institute for Water Research Technical Report Series No. 15/38

40. Passarella G, Barca E, Sollitto D, Masciale R, and Bruno DE, 2017, Cross-Calibration of Two Independent Groundwater Balance Models and Evaluation of Unknown Terms: The Case of the Shallow Aquifer of "Tavoliere di Puglia"(South Italy). Water Resources Management, 31(1), 327-340.
41. Rawls, W.J., David, G., Mullen, J.A. and Ward, T.J., 1996. Hydrology Handbook. Hydrology Handbook, 28.
42. Rian Titus, Kevin Pietersen and Ingrid Dennis, 2008. A Guideline for the Assessment, Planning and Management of Groundwater Resources in South Africa, Strategy and Guideline Development.
43. Schuler, P., Margane, A., 2013. Protection of Jeita Spring Technical Report No. 6 Water Balance for the Groundwater Contribution Zone of Jeita Spring using WEAP Including Water Resources Management Options & Scenarios
44. Seiler, K.P. and Gat, J.R., 2007. Groundwater recharge from run-off, infiltration and percolation (Vol. 55). Springer Science & Business Media.
45. Sokolov, A.A. and Chapman, T.G., 1974. Methods for water balance computations; an international guide for research and practice-A contribution to the International Hydrological Decade.
46. Stanton, J.S., Qi, S.L., Ryter, D.W., Falk, S.E., Houston, N.A., Peterson, S.M., Westenbroek, S.M., and Christenson, S.C., 2011, Selected approaches to estimate water-budget components of the High Plains, 1940 through 1949 and 2000 through 2009: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2011–5183, 79 p.
47. Street-Perrott, F.A., Beran, M. and Ratcliff, R. eds., 2012. Variations in the global water budget. Springer Science & Business Media.
48. Tian S, Tregoning P, Renzullo LJ, van Dijk AIJM, Walker JP, Pauwels VRN, Allgeyer S, (2017), Improved water balance component estimates through joint assimilation of GRACE water storage and SMOS soil moisture retrievals, Water Resources Research, 53, doi:10.1002/2016WR019641.
49. Water resources assessment: integral water balance in basins, 2008. UNESCO regional office for science for Latin America and the Caribbean.

مرکز پژوهش‌ها
مجلس شورای اسلامی

شناسنامه گزارش

شماره مسلسل: ۱۵۸۳۳

عنوان گزارش: نقدی بر برآورد بیلان منابع آب زیرزمینی در کشور ایران: راهکارها و پیشنهادها

نام دفتر: مطالعات زیربنایی (گروه آب و محیط زیست)
تهیه و تدوین‌کنندگان: حامد کتابچی ، داود محمودزاده
همکاران: سهند قدیمی، مهدی صاغی‌جدید
ناظران علمی: حسین افشین، محسن صمدی
مدیر مطالعه: جمال محمدولی سامانی
متقاضی: معاونت پژوهش‌های زیربنایی و امور تولیدی
ویراستار تخصصی: جمال محمدولی سامانی
ویراستار ادبی: طاهره سیدمحمد

واژه‌های کلیدی:
۱. بیلان آب
۲. آب‌های زیرزمینی
۳. ایران
۴. منابع آب
۵. کسری مخزن

تاریخ انتشار: ۱۳۹۷/۲/۱۰