اکتشاف منابع آب زیرزمینی

محمود صداقت

مقدمه:

آب در زیرزمین تقریباً در همه جا موجود است. ولی منابعی که از نظر کمّی قابل توجه، و از نظر کیفی برای مصرف مورد نظر مناسب باشند در همه جا یافت نمی‌شوند. بهره‌برداری صحیح از منابع آب زیرزمینی در هر ناحیه مستلزم مطالعه و شناخت ویژگیهای هیدرولوژیکی و زمین‌شناسی آن ناحیه است. هدف نهایی از این گونه مطالعات در هر منطقه بررسی کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی، تعیین میزان آب قابل برداشت با پتانسیل آبی منطقه مورد نظر، یافتن مناسبترین محلها و بهترین راههای بهره‌برداری و همچنین مطالعه امکانات توسعه بهره‌برداری و جلوگیری از اتلاف منابع آب زیرزمینی است.

در کشور ما که به علت وضع خاص جغرافیایی آن در اغلب نقاط کمبود باران و آبهای سطحی وجود دارد اهمیت بررسی و جستجوی منابع آب زیرزمینی روشن می‌شود. با توسعه هدفهای کشاورزی و صنعتی احتیاج به منابع آب بیشتر رو به فزونی است و لذا لازم است همزمان با اقداماتی از قبیل سدسازی و گسترش بهره‌برداری از منابع سطحی، آبهای زیرزمینی نیز در هر منطقه به دقت تحت مطالعه و کنترل دائمی قرار گیرد.

منابع آب موجود (چه زیرزمینی و چه سطحی) باید به درستی شناخته و برآورد شوند و با بهره‌گیری از تجربیات، روشها و تکنیکهای موجود، یعنی به کمک روشهای علمی برنامه‌ریزی دقیق و همه‌جانبه‌ای انجام گیرد تا حداکثر بهره‌برداری از منابع موجود به عمل آید.

مطالعه و اکتشاف آبهای زیرزمینی شامل مراحلی است که در زیر به اختصار مورد بررسی قرار می‌گیرد:

مطالعه زمین‌شناسی

معمولاً اولین قدم در مطالعه آبهای زیرزمینی در یک ناحیه (یک حوضه آب زیرزمینی) بررسی‌های زمین‌شناسی است. این کار با جمع‌آوری مطالعات انجام شده قبلی و بازدیدهای صحرایی در محل صورت می‌گیرد. اطلاعات زمین‌شناسی را باید یک ارزیابی کلی و اولیه در مورد ذخایر آب زیرزمینی تلقی نمود. پس از این مطالعات می‌توان محلهایی را که باید با روشهای دیگر مورد جستجو قرار گیرد تعیین کرد.

آب زیرزمینی در منافذ و درز شکاف موجود در رسوبات و سنگها تجمع یافته و از خلال آنها حرکت می‌کند. از آنجا که مقدار این فضاهای خالی، شکل، اندازه و نحوه ارتباط آنها با هم نتیجه فرایندهای مختلف در تشکیل سنگها و تغییرات بعدی سنگهاست بنابراین مطالعه زمین‌شناسی و تاریخ زمین‌شناسی یک منطقه از نظر پی بردن به وجود ذخایر آب زیرزمینی لازم است.

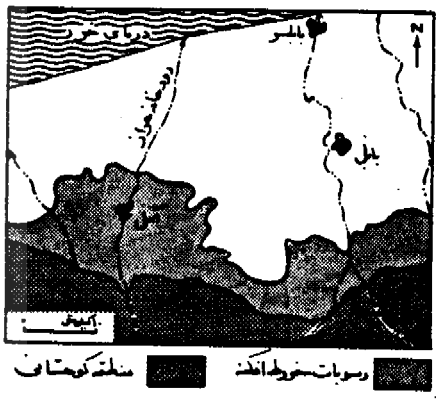
مطالعه چینه‌شناسی یک منطقه ممکن است سفره‌هایی را در زیر لایه‌های نامناسب سطحی نشان دهد، یا تداوم و ارتباط بین سفره‌ها را مشخص کند یا حد و مرز یک سفره را نمایان سازد. با مطالعه جنس، ضخامت و شیب لایه‌های آبدار می‌توان اطلاعاتی از قبیل عمق لازم برای حفر چاهها، کیفیت آب و میزان آبدار بودن لایه را برآورد نمود.

با بررسی نوع سنگها و رسوبات و پدیده‌های زمین‌شناسی در هر حوضه می‌توان اطلاعات مفیدی از نظر امکان تشکیل سفره‌های آب زیرزمینی به دست آورد. مثلاً رسوبات ناپیوسته یا سخت نشده مثل آبرفتها، رسوبات بادی، رسوبات یخچالی می‌توانند سفره‌های آب زیرزمینی خوبی تشکیل دهند. رسوبات آبرفتی دره‌ها یا بستر قدیمی رودخانه‌ها، که عمدتاً متشکل از ماسه و شن و قلوه‌سنگ‌اند، گرچه ممکن است با رسوبات دانه ریزتری پوشیده شده باشند، غالباً پتانسیل

آبی زیادی دارند. به علت عمل فرسایش رودخانه قبلی سنگ کف در این دره‌ها دارای عمق زیادی است. گرچه مطالعه سطحی زمین‌شناسی در پیدا کردن این نوع دره‌های مدفون مفید است، ولی برای یافتن آنها معمولاً از مطالعات ژئوفیزیکی استفاده می‌شود.

مخروط افکنه‌ها که معمولاً اطراف دره‌های آبرفتی یا حوضه‌هایی یافت می‌شوند که به طریق تکتونیکی تشکیل شده‌اند دارای رسوباتی با نفوذپذیری زیادند. لذا به علت نفوذ آبهای سطحی کوههای اطراف از نظر تشکیل سفره‌های آب زیرزمینی بسیار باارزش‌اند.

بسیاری از قناتهای پر آب در ایران در مخروط افکنه‌ها حفر شده‌اند. در محل ورود رودخانه هراز به دشت مازندران مخروط افکنه‌ای به وسعت تقریباً ۳۰۰ کیلومتر مربع ایجاد شده که ضخامت رسوبات در آن به ۳۰۰ متر می‌رسد (در اطراف آمل). بهمین جهت منبع آب زیرزمینی خوبی ایجاد کرده که با حفر چاههای عمیق به مقدار زیادی بهره‌برداری می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱ ــ مخروط افکنه‌ها در بخشی از دشتهای ساحلی دریای خزر تقریباً نوار ممتدی را در دامنه کوههای البرز ایجاد کرده‌اند.

گسلها معمولاً به عنوان سدهای هیدرولیکی برای حرکت جانبی آب در نظر گرفته می‌شوند، چون موجب جابجائی قائم یا حتی قطع‌شدگی لایه‌های نفوذپذیر می‌شوند. به علاوه منطقه گسلی ممکن است با ذرات دانه ریزتری پر شده باشد. البته گاهی مناطق گسلی ممکن است بهترین محل برای حفر چاه باشد.

انواع سنگهای رسوبی، آذرین و دگرگونی از نظر تشکیل سفره‌های آب زیرزمینی خصوصیات متفاوتی دارند (برای اطلاعات بیشتر به مقاله «آبهای زیرزمینی»، مجله رشد زمین‌شناسی، شماره ۶ مراجعه کنید). لذا مطالعه سنگها و سازندهای مختلف در هر حوضه آب زیرزمینی از نظر پی بردن به امکان تشکیل منابع قابل توجه آب در آنها و همچنین مطالعه تأثیرات آنها بر روی کیفیت آب زیرزمینی ضروری است.

مطالعات زمین‌شناسی سطحی همراه با نتایج حفاری چاهها و بررسی‌های ژئوفیزیکی منجر به تهیه نقشه‌ها و مقاطعی می‌شود که به وسیله آنها می‌توان رخنمون لایه‌ها و سازندهای مختلف را در سطح زمین و ترتیب قرار گرفتن آنها را در زیر سطح زمین مشخص کرد. لذا این نقشه‌ها و مقاطع و توضیحات همراه آنها نشان خواهد داد که چه سازندها و سنگهایی احتمالاً آبدارند و در کجا در زیر زمین قرار گرفته‌اند.

از آنجا که وجود آب زیرزمینی تا حدودی وابسته به مشخصات سطح زمین است، لذا با تعبیر و تفسیر عکسهای هوایی در یک منطقه نیز می‌توان اطلاعات باارزشی از این نظر فراهم آورد. پوششهای گیاهی، شبکه زهکشی، فرسایش، رنگ و پدیده‌های سطحی خاص مثل دشتهای آبرفتی، تراسها، مخروط افکنه‌ها و غیره در روی عکسهای هوایی مشخصند و حکایت از شرایط زیرین می‌کنند. با استفاده از عکسهای هوایی می‌توان طرحی از مناطق با حداکثر و حداقل امکان وجود منابع آب را مشخص کرد.

اطلاعات مربوط به آبهای سطحی نیز در دست باشد. اینگونه اطلاعات از نظر محاسبه بیلان کلی آب ناحیه ضرورت دارد. اندازه‌گیری دبی آب رودخانه‌ها باید به طور پیوسته صورت گیرد. برای اینکار معمولاً ارتفاع آب رودخانه‌ها توسط اشلهای ثابتی که کنار رودخانه نصب می‌شود روزانه اندازه‌گیری شده و در فواصل طولانی‌تر مثلاً به طور ماهیانه دبی رودخانه (حجم آبی که در واحد زمان از مقطع معینی عبور می‌کند) به وسایل مختلف

جمع‌آوری اطلاعات و آمار منابع آب

قدم بعدی در مطالعه هیدروژئولوژی یک منطقه جمع‌آوری اطلاعات در مورد کلیه منابع آبی موجود اعم از منابع زیرزمینی (چاه، چشمه، قنات) و منابع سطحی (رودخانه، دریاچه و...) است. موقعیت این گونه منابع در روی نقشه پایه منطقه پیاده می‌شود.

در مورد چاهها اطلاعات مختلف مربوط به چاه، مثل: محل، نوع، عمق، عمق سطح آب، مقدار دبی بهره‌برداری، مدت کارکرد سالیانه، قدرت و مشخصات موتور پمپ، کیفیت آب و در صورت امکان اطلاعات مربوط به جنس رسوبات و سنگهایی که چاه در آن حفر شده و تعداد سفره‌ها گردآوری می‌شود و در جداولی درج می‌گردد:

از چاههایی که درحال حفاری هستند اطلاعات پرارزشی در مورد جنس لایه‌ها و سنگها، موقعیت لایه‌های آبدار، تغییرات سطح آب، ظرفیت آبدهی چاه و غیره می‌توان به دست آورد. مشخصات قنوات مثل طول، عمق مادر چاه، تغییرات دبی و کیفیت آب آنها نیز اندازه‌گیری شده و در جداولی یادداشت می‌شود. مشخصات چشمه‌های معمولی و معدنی منطقه نیز جمع‌آوری می‌شود.

در مطالعه آبهای زیرزمینی در هر ناحیه باید

شماره چاه	نام محل	نام مالک	تاریخ بازدید	نوع چاه	نوع موتور	قدرت موتور	عمق چاه	عمق سطح آب	دبی	کارکرد سالیانه	تخلیه سالیانه	میزان کلر	هدایت الکتریکی

اندازه‌گیری می‌شود. آنگاه رابطه‌ای بین ارتفاع سطح آب رودخانه و دبی آن برقرار شده و به این ترتیب تغییرات دبی رودخانه در طول زمان به دست می‌آید و در نتیجه می‌توان مقدار تخلیه سالیانه و تخلیه متوسط یک رودخانه را محاسبه کرد.

جمع‌آوری آمار آب و هوایی از قبیل بارندگی، تبخیر، دما و غیره نیز از نظر مطالعات هیدروژئولوژی یک منطقه و به ویژه تهیه بیلان کلی آب در یک حوضه آبریز لازم است.

بررسی‌های ژئوفیزیکی

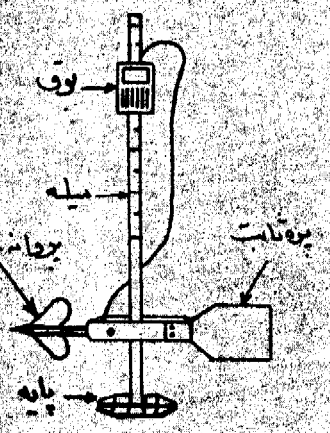
با استفاده از بررسی‌های ژئوفیزیکی که از سطح زمین انجام می‌گیرد با هزینه‌ای نسبتاً کم و سریع می‌توان به طور کلی اطلاعات مفیدی در مورد منابع آب زیرزمینی به دست آورد. در روشهای ژئوفیزیکی مستقیماً نوع سنگها، تخلخل، نفوذپذیری و مشخصاتی از این قبیل به دست نمی‌آید بلکه با اندازه‌گیری پاره‌ای خواص فیزیکی سنگها می‌توان محلهایی را که احتمال وجود سفره‌های آب زیرزمینی مطلوب در آنها بیشتر است تعیین کرد و مناطق مناسبتر برای بهره‌برداری را مشخص نمود. البته برای کسب اطلاعات دقیق‌تر باید نتایج بررسی‌های ژئوفیزیکی با نتایج حاصل از چاههای اکتشافی تلفیق شوند. در واقع با بررسی‌های ژئوفیزیکی می‌توان محلهای مناسبتر برای حفر چاهها را مشخص کرد.

روشهای ژئوفیزیکی متنوعند ولی معمولی‌ترین روش مورد استفاده در مطالعه آبهای زیرزمینی روش اندازه‌گیری مقاومت مخصوص الکتریکی زمین (ژئوالکتریک) است. روش لرزه‌ای و دیگر روشهای ژئوفیزیکی نیز در بعضی نقاط استفاده شده است (برای اطلاعات بیشتر در مورد این روشها به مقاله «اکتشافات ژئوفیزیکی» مجله رشد زمین‌شناسی، شماره ۳ مراجعه کنید)

با استفاده از مطالعات ژئوفیزیکی به طور کلی می‌توان اطلاعاتی در مورد شرایط

اندازه‌گیری دبی جریان آب

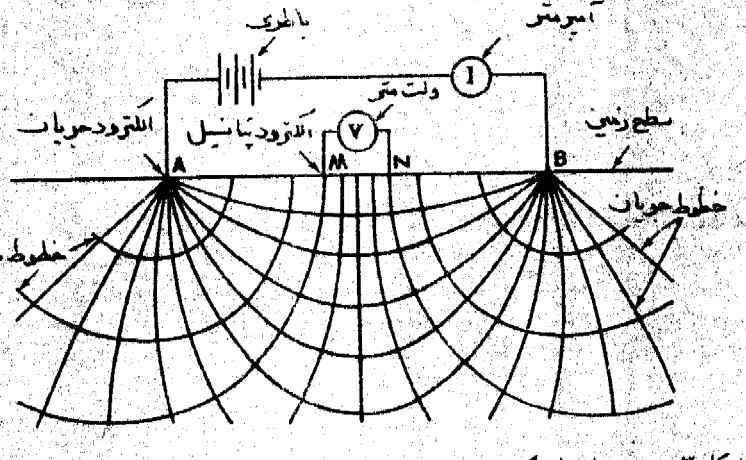
برای اندازه‌گیری دبی جریانهای آب مثل رودخانه، قنات و چشمه راههای مختلفی وجود دارد ولی معمولی‌ترین آنها استفاده از پروانه آبی (مولینه) است. این دستگاه دارای پره‌های متحرکی است که وقتی آنرا در مسیر جریان آب قرار می‌دهند شروع به چرخش می‌کند. سرعت چرخش آنرا که بستگی به سرعت جریان آب دارد توسط دستگاهی الکتریکی اندازه‌گیری می‌کنند و به این ترتیب سرعت جریان آب را به دست می‌آورند. با اندازه‌گیری سرعت جریان در چند نقطه از مقطع رودخانه و با دانستن سطح مقطع دبی جریان آب قابل محاسبه است.



شکل ۲ ــ ساختمان کلی مولینه

روش ژئوالکتریک

اساس روش ژئوالکتریک بر اندازه‌گیری مقاومت مخصوص الکتریکی زمین است. مطابق شکل ۳ از دو الکترود AB جریانی به شدت I وارد زمین کرده و اختلاف پتانسیل حاصله (ΔV) را بین دو الکترود دیگر (MN) اندازه‌گیری می‌کنند و از رابطه $\rho_a = K\frac{\Delta V}{I}$ مقاومت مخصوص ظاهری زمین را به دست می‌آورند. (K ضریب ثابتی است که به فاصله و آرایش الکترودها بستگی دارد). با افزودن فاصله الکترودها جریان به عمق بیشتری نفوذ می‌کند. بنابراین تغییرات مقاومت مخصوص ظاهری نسبت به عمق را می‌توان به دست آورد. با مقایسه این تغییرات با منحنی‌های تئوریک تعداد لایه‌ها، ضخامت و مقاومت مخصوص هر کدام تعیین می‌شود. همچنین نقشه‌های تغییرات مقاومت مخصوص ظاهری برای اعماق ثابت نیز تهیه می‌شود. مقاومت مخصوص سنگها دارای دامنه تغییرات وسیعی است که به جنس، چگالی، تخلخل و به ویژه کمیت و کیفیت آب و عوامل دیگر بستگی دارد. با دانستن حدود تغییرات مقاومت مخصوص و با تعبیر و تفسیر مقاطع و نقشه‌های ژئوالکتریک می‌توان اطلاعاتی در مورد وضع آب‌شناسی و زمین‌شناسی در زیرزمین به دست آورد.

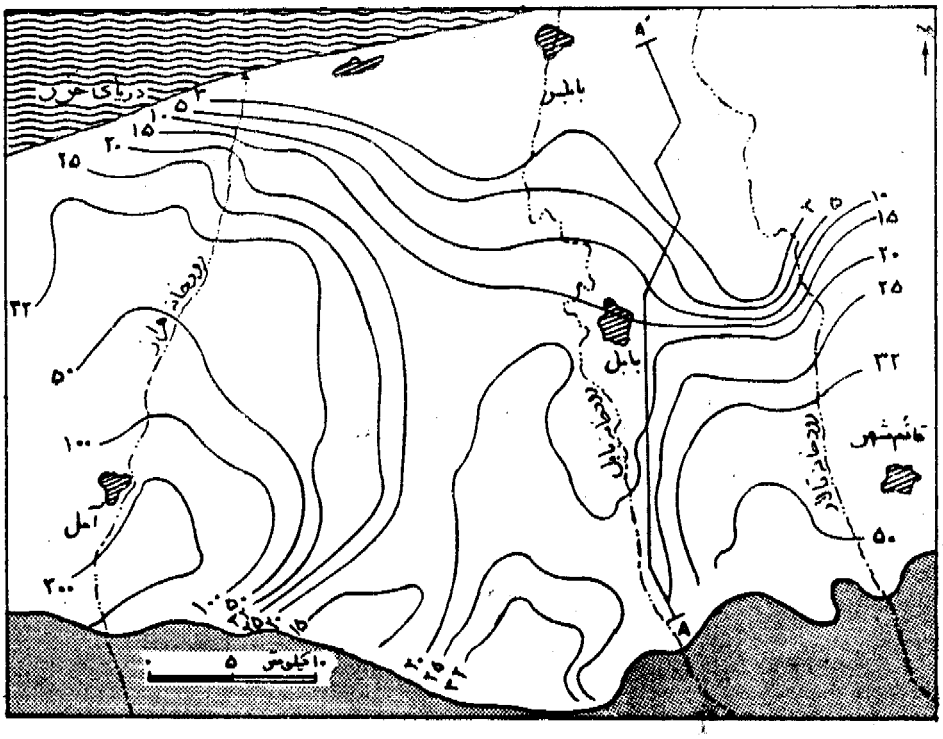


شکل ۳ ــ روش اندازه‌گیری مقاومت مخصوص زمین و میدان الکتریکی در یک لایه هموژن

زیرزمین از قبیل نوع و عمق لایه‌ها، عمق آب زیرزمینی، موقعیت سنگ کف، گسلها، کیفیت آب‌زیرزمینی‌ونواحی‌دارای‌آب‌شوربه‌دست‌آورد.

به عنوان نمونه‌ای از نقشه‌ها و مقاطع ژئوالکتریک نقشه بخشی از دشتهای ساحلی استان مازندران نشان داده شده است (شکل ۴). در این نقشه فاصله بین الکترودهای فرستنده جریان به داخل زمین (AB) برابر ۴۰۰ متر است که در نتیجه مقاومت مخصوص ظاهری قشری از زمین به عمق تقریباً ۱۰۰ متر را نشان می‌دهد. در این نقشه به طور کلی از جنوب به طرف شمال مقاومت مخصوص ظاهری کاهش پیدا می‌کند. مخروط افکنه هراز در اطراف آمل ناحیه مقاوم وسیعی را به وجود آورده که مقاومت مخصوص ظاهری آن به ۲۰۰ اهم متر می‌رسد. بهمین جهت این ناحیه و قسمتهای جنوبی دشت بهترین مناطق برای بهره‌برداری از آبهای زیرزمینی است. بالا بودن مقاومت مخصوص دراین ناحیه ناشی از نوع رسوبات و کم‌بودن املاح محلول در آبهای زیرزمینی است. در نواحی شمالی دشت مقاومت مخصوص ظاهری کاهش می‌یابد (کمتر از ۱۰ اهم متر). لذا از نظر بهره‌برداری مناسب نیست. مطالعات بیشتر نشان می‌دهد که نواحی شمالی دشت (شمال بابل و قائم شهر) تحت تأثیر نفوذ آب دریاست. تغذیه زیاد آب زیرزمینی از طریق مخروط افکنه هراز موجب عقب راندن جبهه آب شور شده است.

پس از تعیین ضخامت و مقاومت مخصوص لایه‌های زمین در محل هرسونداژ ژئوالکتریک با ارتباط دادن لایه‌های مشابه مقاطع ژئوالکتریک نیز تهیه می‌شود. به عنوان نمونه مقطع AA حوالی بابل و بابلسر در شکل (۴) نشان داده شده است. در این مقطع سنگ کف با مقاومت مخصوص کمتر از ۵ اهم زیاد مشخص می‌شود. به علاوه در لایه‌های آبدار به طور کلی به طرف شمال به علت دانه ریزتر شدن رسوبات و افزایش املاح محلول آب (در نتیجه نفوذ آب شور دریا و علل دیگر) مقاومت



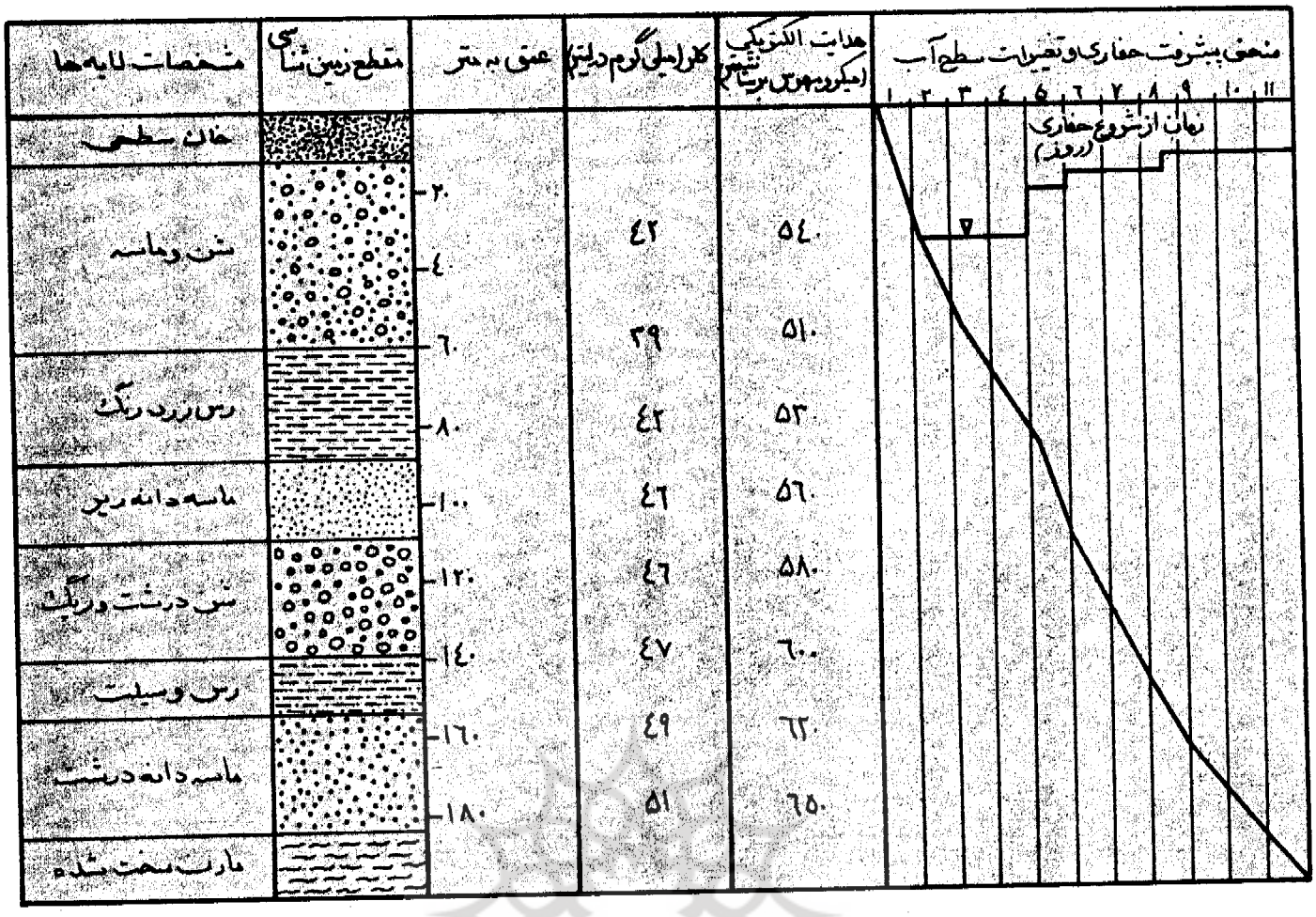
شکل ۴ ــ الف ــ نقشه تغییرات مقاومت مخصوص ظاهری با طول الکترودهای فرستنده جریان ۴۰۰ = AB متر و ب ــ مقطع ژئوالکتریک در امتداد AA که تغییرات مقاومت مخصوص زمین را نسبت به عمق نشان می‌دهد (ارقام بر حسب اهم متر) اقتباس از گزارش: مطالعات ژئوالکتریکی ناحیه آمل ــ بابل ــ قائل شهر تهیه توسط گروه مهندسان مشاور آبکاو)

مخصوص کاهش می‌یابد.

حفاریهای اکتشافی

دقیق‌ترین اطلاعات در مورد وضعیت زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی لایه‌های آبدار از طریق حفر چاه به دست می‌آید. در منطقه مورد مطالعه با توجه به اطلاعات موجود (زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و...) چندین نقطه مناسب برای حفاری در نظر می‌گیرند. معمولاً ابتدا یک چاه آزمایشی (گمانه) با قطر کم حفر می‌شود و در صورتی که آن نقطه مناسب تشخیص داده شود قطر آنرا افزایش داده و چاه را لوله‌گذاری و تجهیز می‌کنند. در زمان حفر این چاهها از لایه‌های مختلف نمونه‌برداری می‌شود و در صورت امکان پس از پایان حفاری با نمودارگیری یا چاه‌پیمایی[1] (به مقاله «اکتشافات ژئوفیزیک»، مجله رشد زمین‌شناسی، شماره ۳ مراجعه کنید) جنس و مشخصات لایه‌ها را تعیین می‌کنند. در حین حفاری با برداشتن نمونه‌های آب و آزمایش آنها تغییرات کیفیت آب نسبت به عمق و سفره‌های نامطلوب مشخص می‌شود. اندازه‌گیری تراز آب در داخل چاه در مدت حفاری نیز به تفکیک سفره‌های آزاد و تحت فشار کمک خواهد کرد (شکل ۵)

چاههای اکتشافی معمولاً به دو روش «ضربه‌ای» و «دورانی» حفر می‌شوند. سرعت حفاری ضربه‌ای نسبتاً کمتر ولی در مقابل ارزانتر و آسانتر است و در حین حفاری امکان برداشت نمونه سنگها (گرچه خرد شده) و



شکل ۵ ــ اطلاعات حاصل از حفر یک چاه اکتشافی به صورت نمودار

نمونه آب در اعماق مختلف و اندازه‌گیری تغییرات تراز آب در چاه وجود دارد. در مواقعی که لایه‌ها ریزشی باشند روش ضربه‌ای موفقیت‌آمیز نبوده و بهتر است از روش دورانی استفاده شود.

حفاری دورانی سریعتر است ولی احتیاج به تجهیزات و مهارت بیشتری دارد. در این روش چون سنگها خرد شده و با گل حفاری مخلوط می‌شوند لذا مطالعه مشخصات لایه‌ها به ویژه وقتی خیلی دانه‌ریز باشند ممکن است دقیق نباشد. البته در این روش امکان استفاده از عملیات چاه‌پیمایی در پایان حفاری وجود دارد. به علاوه در صورت لزوم می‌توان با نمونه‌گیرها نمونه‌های دقیقی از لایه‌ها به دست آورد. در حفاری دورانی امکان مطالعه تغییرات تراز آب یا برداشت نمونه آب وجود ندارد.

بنابراین هدف از حفر چاههای اکتشافی را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

۱ ــ تعیین ضخامت، جنس و مشخصات لایه‌ها و سازندها در محل

۲ ــ تعیین عمق سنگ کف

۳ ــ بررسی وضع کیفی آبهای زیرزمینی در اعماق مختلف و تفکیک سفره‌های آبدار شیرین و شور

۴ ــ تعیین ضرایب هیدرودینامیک و مشخص کردن قدرت آبدهی سفره با استفاده از آزمایشات پمپاژ

روشهای حفاری چاههای عمیق

۱ ــ روش ضربه‌ای: دراین روش عمل حفر با بلندکردن و رهاکردن رشته‌ای از ابزار حفاری صورت می‌گیرد که به انتهای آن مته متصل است. این ضربات باعث خردکردن سنگها در ته چاه می‌شود. رشته ابزار حفاری که وزن آن ممکن است به چند تن برسد توسط کابلی که به موتور دستگاه متصل است بالا و پائین برده می‌شود. در این روش عمل حفر متناوباً قطع می‌شود تا مواد کند شده به وسیله لوله‌ای استوانه‌ای به نام گل‌کش از ته چاه خارج شود. در این روش اگر لایه‌ها ریزشی باشند چاه لوله‌گذاری موقت می‌شود و حفاری از میان لوله ادامه می‌یابد.

۲ ــ روش دورانی: دراین روش مته به انتهای یک سری لوله‌های توخالی به نام لوله‌های حفاری متصل است. لوله‌های حفاری همراه با مته توسط موتور دستگاه به گردش در می‌آید و موجب حفر چاه می‌شود. برای خارج کردن مواد کنده شده از گل حفاری (مخلوطی از بنتونیت، آب و مواد دیگر) استفاده می‌گردد که دائماً به داخل لوله حفاری پمپ شده و پس از خروج از سر مته و ضمن بالا آمدن از فاصله بین لوله حفاری و جدار چاه مواد کنده شده را با خود بالا می‌آورد. گل حفاری موجب خنک کردن سرمته، تسهیل عمل حفر وجلوگیری از ریزش دیواره چاه در ضمن حفاری نیز می‌شود و بنابراین در این روش در ضمن حفاری معمولاً احتیاج به لوله‌گذاری نیست.

۵ ــ مشخص کردن تعداد سفره‌های آبدار و وجودسفره‌های آرتزین‌ونحوه‌مهارکردن آنها.

۶ ــ تعیین مشخصات لازم برای حفاری چاههای بهره‌برداری در نقاط مختلف منطقه مورد مطالعه.

آزمایشات پمپاژ

آزمایش پمپاژ چاههای اکتشافی و چاههای دیگر نیز بخشی از مطالعه آبهای زیرزمینی را تشکیل می‌دهد، که منظور از آن تعیین موارد زیر است:

ــ تعیین ضرایب هیدرودینامیک سفره آبدار (ضریب ذخیره و ضریب قابلیت انتقال):

برای اینکار چاه را با دبی معین برای مدتی مورد پمپاژ قرار می‌دهند و همزمان با آن افت سطح آب در چاه اصلی و در چاههای پیزومتری که در اطراف آن حفر شده اندازه‌گیری می‌شود. آنگاه با استفاده از روابطی ضرایب فوق محاسبه می‌شود (رجوع کنید به مقاله آبهای زیرزمینی).

ــ تعیین قدرت آبدهی چاه: برای اینکار قبل از شروع پمپاژ ارتفاع سطح آب در چاه (سطح استاتیک) اندازه‌گیری می‌شود. سپس چاه بادبی معین آنقدر مورد پمپاژ قرار می‌گیرد تا آنکه سطح آب در چاه ثابت شود و در این حال ارتفاع سطح آب دوباره اندازه‌گیری می‌شود (سطح دینامیک). اختلاف ارتفاع سطح استاتیک و دینامیک مقدار افت را به ازای دبی پمپاژ نشان می‌دهد. نسبت دبی به افت برآوردی از «ظرفیت ویژه[1]» چاه است که معیاری است برای نشان دادن قدرت آبدهی چاه.

معمولاً آزمایشات پمپاژ را در چند مرحله انجام می‌دهند که به آن آزمایش افت پله‌ای می‌گویند. در هر مرحله بادبی معین آنقدر پمپاژ را ادامه می‌دهند تا سطح آب در چاه متعادل شود. سپس بادبی بیشتر همین عمل را تکرار می‌کنند. در هر مرحله افت کلی را در چاه اندازه‌گیری می‌کنند. با استفاده از این نوع آزمایش آبدهی مجاز چاه را به دست می‌آورند.

بررسی تغییرات سطح ایستابی و پیزومتریک

به منظور بررسی تغییرات سطح ایستابی یا پیزومتریک در طول زمان، تغییرات عمق سطح آب در نقاط مختلف و تهیه نقشه‌های تراز آب زیرزمینی اقدام به حفر تعدادی چاه مشاهده‌ای می‌کنند. چاهها باید تا سفره موردنظر (سفره‌های آزاد سطحی یا سفره‌های تحت فشار) ادامه داشته باشد.

عمق سطح آب در درون چاههای مشاهده‌ای معمولاً به طور ماهیانه اندازه‌گیری می‌شود و این تغییرات به صورت منحنی‌هایی (معروف به هیدروگراف چاه) نشان داده می‌شود که تغییرات سطح آب را نسبت به زمان نشان می‌دهد. با استفاده از هیدروگرافهای فوق معمولاً «هیدروگراف واحد» منطقه مورد مطالعه تهیه می‌شود که تغییرات متوسط سطح آب زیرزمینی در یک منطقه را در طول زمان نشان می‌دهد (شکل ۶). اندازه‌گیری دائمی عمق سطح ایستابی و پیزومتریک از نظر کنترل میزان برداشت مجاز از یک سفره نیز لازم است. از یک سفره آب باید آنقدر برداشت نمود که موجب افت دائمی سطح ایستابی و پیزومتریک نشود.

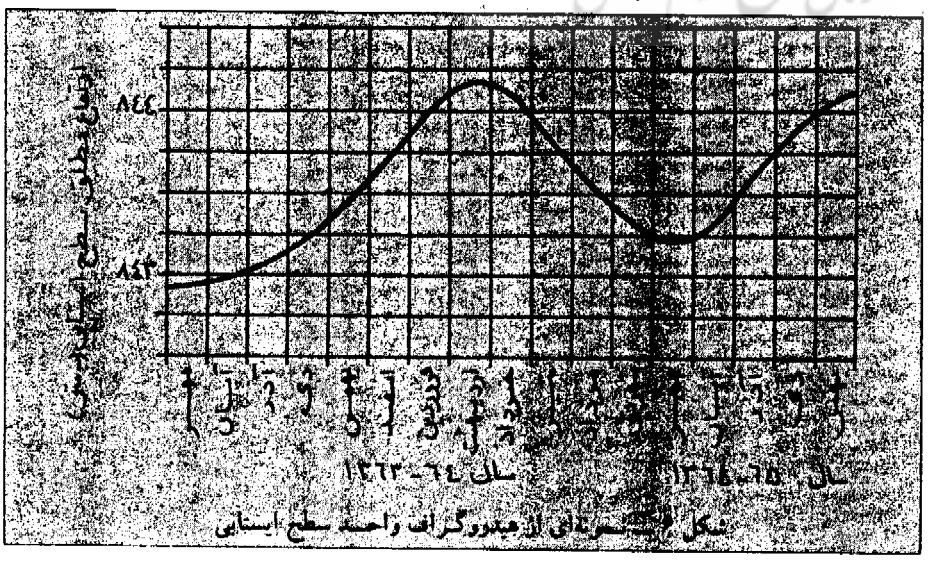
با اندازه‌گیری عمق سطح آب در چاههای مختلف منطقه و با روش انتر پلاسیون «نقشه نقاط هم عمق سطح آب» نیز تهیه می‌شود.

تهیه نقشه‌های تراز آب زیرزمینی نیز از نظر پی‌بردن به جهت حرکت آبهای زیرزمینی، منابع تغذیه و تخلیه و کسب اطلاعات مفید دیگر نیز ضروری است (مقاله آبهای زیرزمینی).

مطالعات هیدروشیمی

تعیین کیفیت یعنی خصوصیات شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی آب نشان خواهد داد که تا چه حد برای مصرف موردنظر مناسب است. کیفیت آب زیرزمینی نتیجه کلیه فرایندها و واکنشهایی است که از زمان تشکیل آب در آتمسفر تا ظهور آن در سطح زمین بر روی آن عمل کرده است. آب ضمن حرکت آهسته در زیر زمین کانیها و سنگها را به تدریج حل می‌کند و بنابراین همیشه کم یا زیاد حاوی نمکهای محلول است. انواع و غلظت این نمکها به جنس سنگها، سرعت حرکت آب، منشاء آب و مسافتی که طی کرده بستگی دارد.

میزان املاح محلول در آب زیرزمینی قبل از هر چیز بستگی به قابلیت انحلال کانیها و سنگهای مسیر آن دارد. سنگهای آذرین، توفها و سنگهای دگرگونی اگر به علت درز و شکاف فراوان آبدار باشند غالباً آبهایی با کیفیت عالی دارند (نمکهای محلول در آنها معمولاً کمتراز ۱۰۰ و به ندرت بیش از ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر است). آبرفتهایی که دامنه کوههای متشکل از سنگهای آذرین قرار گرفته‌اند غالباً دارای



شکل ۶ ــ نمونه‌ای از هیدروگراف واحد سطح ایستابی

سفره‌های آب زیرزمینی مطلوبی هستند. مثلاً سفره‌های آب زیرزمینی در مخروط افکنه‌های دامنه جنوبی البرز (حوالی تهران، کرج و قزوین)، که حوضه‌های آبریز تغذیه کننده این مخروط افکنه‌ها بیشتر در توفهای سبز و سنگهای آتشفشانی قرار دارد. غالباً حاوی آبهایی با کیفیت خوب هستند.

سنگهای رسوبی معمولاً خیلی بیشتر از سنگهای آذرین قابل حل‌اند و به علاوه در سطح زمین فراوان‌ترند. معهذا سنگهایی مثل ماسه سنگ‌ها، کنگلومراها و سنگهای آهکی غالباً دارای آبهایی با کیفیت خوب هستند. سنگهای تبخیری مانند سنگ نمک و سنگ گچ قابلیت انحلال زیادی دارند. رسها، سیلتهای دانه‌ریز و موادآلی خاصیت «تبادل یونی[2]» دارند یعنی آنکه بعضی از کاتیونها را از محیط آب جذب و یونهایی را افزایش می‌دهند.

رسوبات آبرفتی در حوضه‌های تکتونیکی، اگر به صورت حوضه بسته‌ای باشند و یا آب آنها از نواحی عمیق‌تر سفره که در تماس با سنگهای تبخیری یا آبهای محبوس است ناشی شود، در اینصورت ممکن است حاوی آبهایی با نمکهای محلول زیاد باشند. ولی در سفره‌های آبرفتی که مفری برای خروج آبهای زیرزمینی وجود دارد و آبهای زیرزمینی قدیمی‌تر و آبهای محبوس با آبهای جوی جدیدتر جانشین شده‌اند آبهای شیرین‌تری یافت می‌شود. دره‌های آبرفتی رودخانه‌ها معمولاً دارای آبهای زیرزمینی با مقدار شوری نسبتاً کمی هستند. سفره‌های فوقانی در رسوبات دشتهای ساحلی معمولاً حاوی آب زیرزمینی غنی با شوری کم است. ولی سفره‌های عمیق‌تر در اثر نفوذ آب دریا یا آبهای محبوس حاوی آبهای شور و غیرقابل استفاده‌اند. البته عمق برخورد به آبهای شور به عوامل مختلف از قبیل فاصله از دریا، میزان تغذیه آبهای شیرین از سطح یا زیرزمین، میزان استخراج و زمین شناسی محل بستگی دارد. چنانکه دیدیم در قسمتهایی از دشتهای ساحلی استان مازندران و گیلان به علت تغذیه کمتر و استخراج بیش از اندازه آبهای زیرزمینی، آب شور به مقدار زیادی به داخل سفره‌ها نفوذ کرده است. تلماسه‌ها معمولاً دارای آبهایی با کیفیت خوب هستند ولی در نواحی ساحلی در مقابل نفوذ آب شور بسیار آسیب‌پذیرند.

میزان شوری آبهای زیرزمینی از محل تغذیه به طرف محل تخلیه به تدریج افزوده می‌شود. به طورکلی هرچه سرعت آب زیرزمینی کمتر و فاصله طی شده بیشتر باشد نمکهای محلول در آب نیز بیشتر می‌شود. در مناطقی که سطح ایستابی به سطح زمین نزدیک می‌شود ممکن است آب زیرزمینی مستقیماً تبخیر شده و در نتیجه غلظت نمکهای محلول آن افزایش یابد (مثلاً نواحی جنوبی تهران).

در سفره‌های آب زیرزمینی ممکن است موادی از منابع دیگر (آب دریا، فاضلابها و آلودگیهای سطحی و غیره) نیز وارد شود.

آزمایش نمونه‌های آب: برای تعیین مشخصات کیفی یک نمونه آب زیرزمینی باید آنرا از نظر شیمیایی، فیزیکی و وجود باکتریها مورد آزمایش قرار داد.

تجزیه شیمیایی کامل یک نمونه عبارتست از تعیین غلظت کلیه مواد معدنی موجود در آن. کاتیونهایی که به طور معمول کم یا زیاد در آبهای زیرزمینی یافت می‌شوند عبارتند از: Ca^{++}، Mg^{++}، Na^{+} (و K^{+}) و آنیونهای معمولی عبارتند از: CO_3^{--}، HCO_3^{-}، SO_4^{--}، Cl^{-} و NO_3^{-}. به علاوه مواد فرعی مثل آهن (Fe)، آلومینیم (Al)، سیلیس (SiO_2)، بُر (B)، فلئور (F) و سلنیم (Se) نیز به مقدار جزءای در آبهای زیرزمینی یافت می‌شود. غلظت عناصر یا یونهای محلول در آب به صورت میلی‌گرم در لیتر ($\frac{1}{1000}$ گرم در لیتر) یا برحسب قسمت در میلیون (ppm) یا میلی‌اکی‌والان گرم در لیتر بیان می‌کنند. میلی‌اکی‌والان گرم برابر $\frac{1}{1000}$ اکی والان گرم (وزن اتمی تقسیم بر ظرفیت) است. در آزمایش کامل یک نمونهٔ آب مجموع مقادیر آنیونها و کاتیونها برحسب اکی‌والان گرم در لیتر باید مساوی باشد.

تجزیه شیمیایی آب همچنین شامل اندازه‌گیری هدایت الکتریکی، «باقیمانده خشک»[3] (T.D.S)، «سختی»[4] آب و PH است.

از آنجا که هدایت الکتریکی آب با غلظت نمکهای محلول آن بستگی دارد لذا معیاری است برای تشخیص غیرمستقیم نمکهای محلول در آب. اندازه‌گیری هدایت الکتریکی به آسانی توسط یک دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی انجام می‌گیرد. نتایج آزمایش نمونه‌های آب را به صورت هدایت الکتریکی مخصوص و برحسب میکرومهوس بر سانتیمتر بیان می‌کنند. هدایت الکتریکی مخصوص آب دریا ۴۵۰۰۰ تا ۵۵۰۰۰ و آب باران حدود ۵ تا ۳۰ میکرومهوس بر سانتیمتر است.

باقیمانده خشک عبارتست از غلظت کل نمکهای محلول در آب. باقیمانده خشک آبهای زیرزمینی از کمتر از ۱۰۰ تا بیش از ۱۰۰/۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر ممکن است تغییر کند. مقدار باقیمانده خشک آب دریا حدود ۳۴۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر است. حداکثر T.D.S برای آب آشامیدنی ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر توصیه شده است. ولی آبهایی با دو یا حتی سه برابر این مقدار نیز در صورتی که منابع دیگری در دسترس نباشد استفاده می‌شود. معمولاً بین T.D.S و هدایت الکتریکی رابطه‌ای برقرار می‌شود. البته این ارتباط به نوع یونها و دما بستگی دارد. ولی غالباً برای آبهای طبیعی و معمولی ۱۰۰۰ میکرومهوس بر سانتیمتر را معادل ۶۴۰ میلی‌گرم در لیتر در نظر می‌گیرند.

سختی آب به واکنش آب با صابون و رسوب‌گذاری در ظرفها یا لوله‌ها بستگی دارد. آبهایی که مقدار نسبتاً زیادی املاح کلسیم و منیزیم و بعضی مواد دیگر داشته باشند صابون در آنها بخوبی کف نمی‌کند. «سختی کل» را به صورت مجموع غلظت یونهای کلسیم و منیزیم برحسب میلی‌گرم در لیتر $CaCO_3$ بیان می‌کنند. آبهایی که برای مصارف خانگی استفاده می‌شود نباید سختی بیش از ۸۰ میلی‌گرم در

لیتر داشته باشند.

در تجزیه فیزیکی آب خصوصیاتی مثل دما، رنگ، بو، مزه و تیرگی[5] آب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

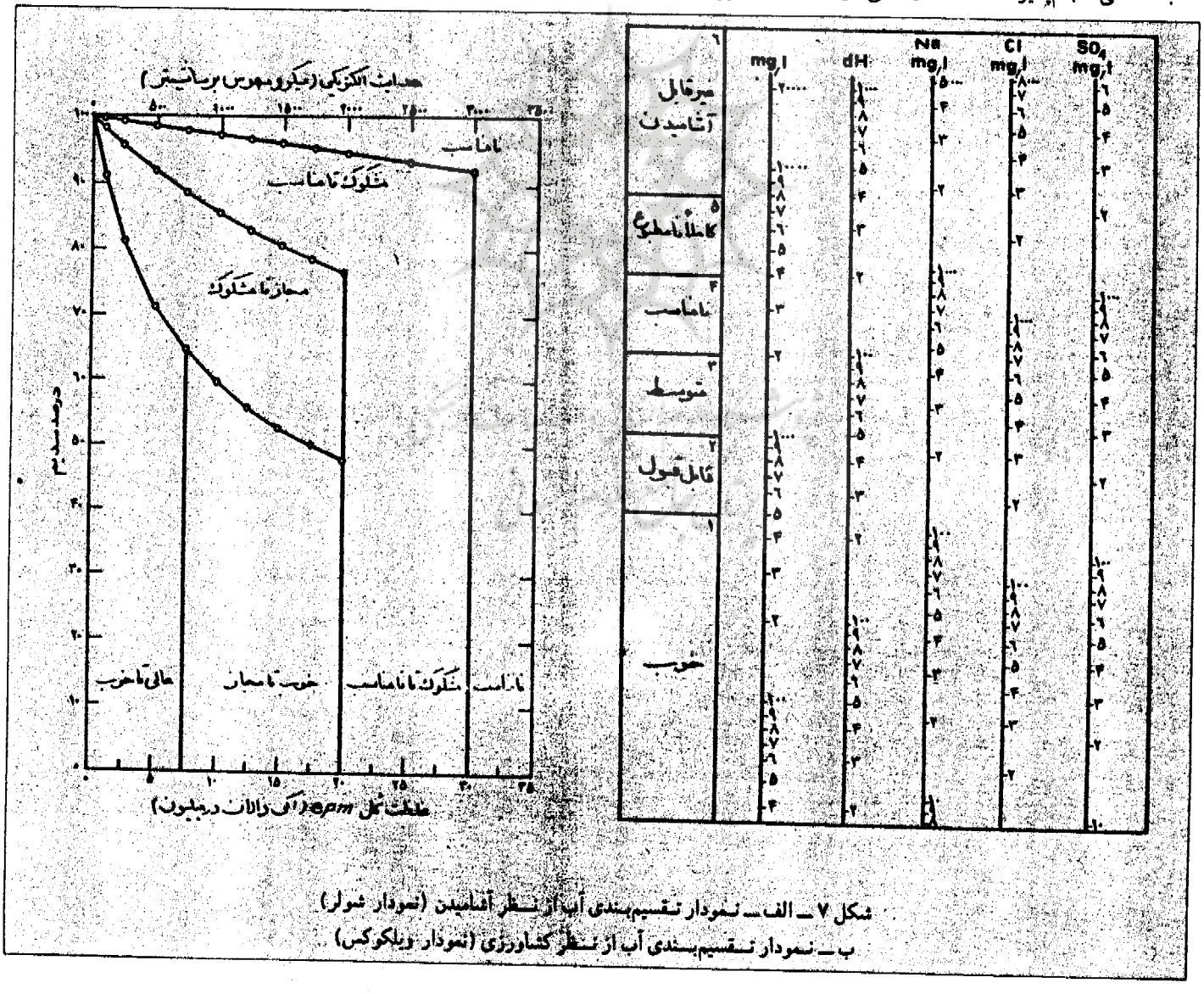
در تجزیه باکتری‌شناسی آب کیفیت بهداشتی آنرا از نظر مصارف عمومی مشخص می‌سازند. این نوع تجزیه از نظر تعیین آلودگی آبهای زیرزمینی توسط فاضلابها مهم است.

در یک منطقه ابتدا از کلیه منابع موجود (چاه، چشمه، قنات ...) نمونه‌برداری شده و مورد آزمایش کامل قرار می‌گیرد. به علاوه تعدادی از چاهها، چشمه‌ها و قنوات انتخاب شده و به طور ماهیانه یا فصلی مورد آزمایش واقع می‌شوند تا تغییرات کیفی آب آنها در طول زمان مشخص شود. معمولاً آزمایش تعدادی از نمونه‌ها به اندازه‌گیری هدایت الکتریکی و کلر که به سادگی انجام‌پذیر است محدود می‌شود. نمونه‌هایی که از اعماق مختلف چاههای اکتشافی به دست می‌آید برای بررسی تغییرات عمقی کیفیت آب مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

معیارهای کیفیت آب: مناسب بودن آب برای مقاصد مختلف بستگی به معیارها و استانداردهایی دارد که به این منظور در نظر می‌گیرند. برای مصارفی مثل آشامیدن، کشاورزی و صنعت استانداردهایی وجود دارد. مثلاً نمونه‌ای از نمودارهایی که برای تقسیم‌بندی آب از نظر کشاورزی یا آشامیدن به کار می‌رود در شکل (۷) نشان داده شده است. شکل ۷ ــ ب نمودار تقسیم‌بندی آب از نظر کشاورزی است که بر مبنای هدایت الکتریکی و درصد سدیم صورت گرفته است. درصد سدیم عبارتست از $\%Na = \frac{(Na + K)\ 100}{Ca + Mg + Na + K}$ که غلظت یونها در آن برحسب میلی‌اکی‌والان در لیتر است.

نقشه‌ها و نمودارهای کیفیت آب: نتایج آزمایش آبهای زیرزمینی را به صورت نقشه‌ها و نمودارهای مختلفی نشان می‌دهند. این گونه نقشه‌ها و نمودارها از نظر نشان دادن وضعیت کیفی آبهای زیرزمینی در یک منطقه، تأثیر سازندهای زمین‌شناسی مختلف بر روی کیفیت آب، بررسی منابع شوری، تغییرات کیفیت آب در مسیر حرکت آن، تأثیر استخراج آبهای زیرزمینی توسط چاه و قنات بر روی کیفیت آب، تغییرات کیفی آب در طول زمان، تأثیر رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و دریا بر روی سفره‌های آب زیرزمینی و مسایل دیگر بسیار مفید است.

نقشه‌هایی که غالباً تهیه می‌شوند عبارتند از نقشه هدایت الکتریکی (شکل ۸)، کلر و باقیمانده خشک. این نقشه‌ها را معمولاً در



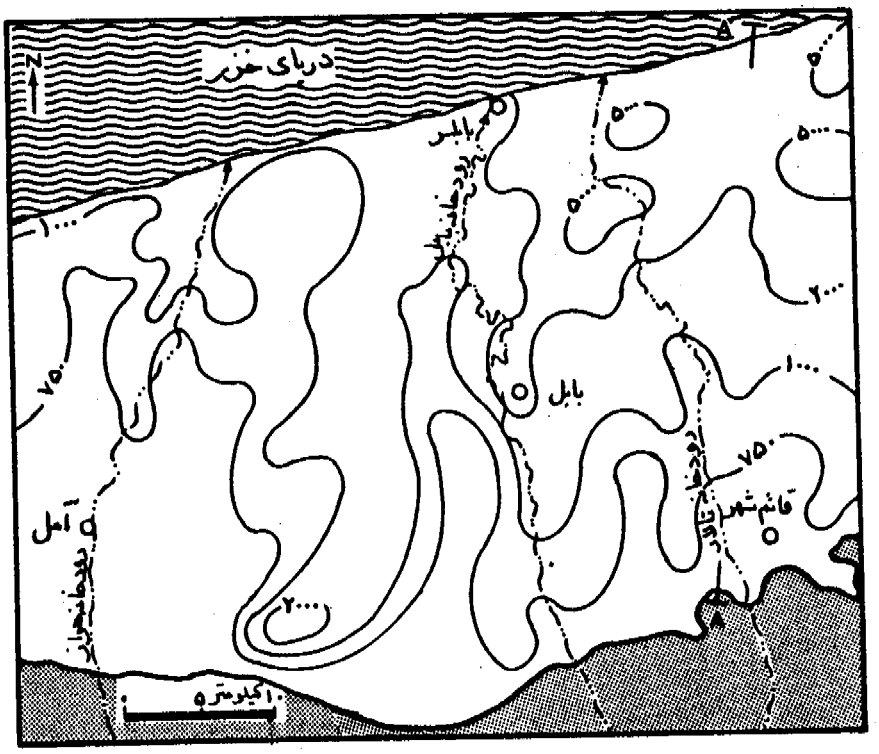
شکل ۷ ــ الف ــ نمودار تقسیم‌بندی آب از نظر آشامیدن (نمودار شولر)
ب ــ نمودار تقسیم‌بندی آب از نظر کشاورزی (نمودار ویلکوکس)

فواصل زمانی معین در یک منطقه تهیه می‌کنند تا تغییرات کیفی آب زیرزمینی را در طول زمان نشان دهد. قاعدتاً برای هر سفره نیز باید جداگانه تهیه شود.

برای تهیه این نقشه‌ها نمونه‌هایی را که در زمان معینی از یک سفره برداشت شده مورد تجزیه قرار داده و نتایج را بر روی نقشه‌های منبای منطقه پیاده می‌کنند و سپس با درون‌یابی (انترپلاسیون) نقاط هم‌ارزش را بهم متصل می‌کنند.

از نقشه‌های دیگر که معمولاً تهیه می‌شود نقشه تیپ آب است که محدودهٔ انواع آبها را برحسب فراوانی یونهای آن مشخص می‌کند.

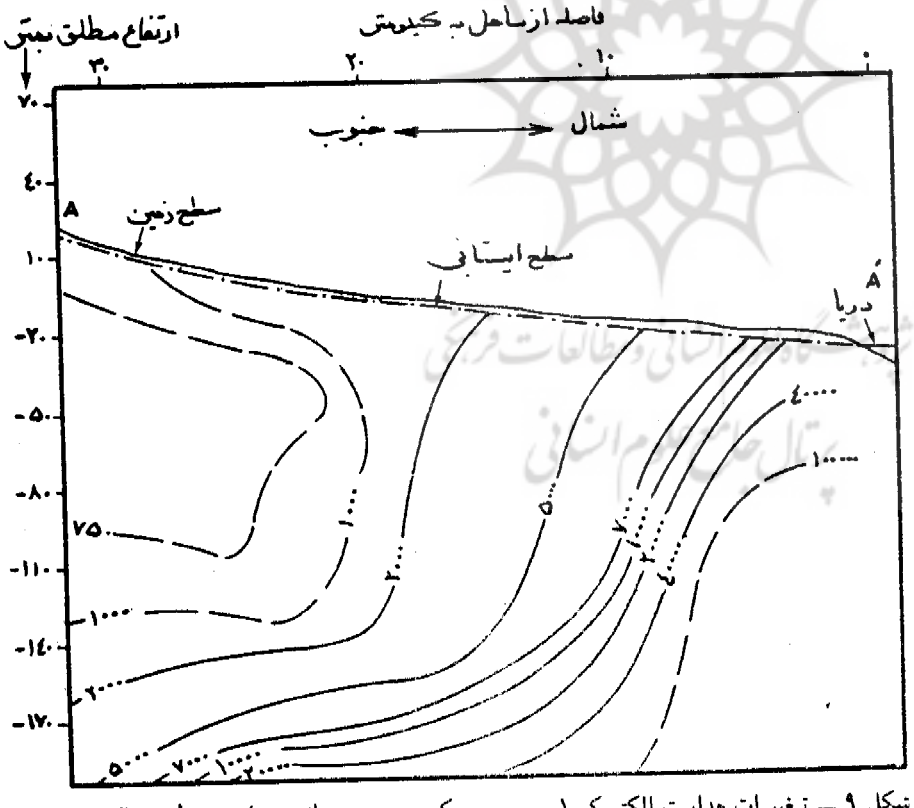
در صورت موجود بودن اطلاعات، تغییرات شوری آب را نسبت به عمق به صورت مقاطعی می‌توان نشان داد. نمونه‌ای از این مقاطع در شکل (۹) آمده است. این مقطع تغییرات کیفیت آب را با نزدیک شدن به دریا (به علت نفوذ آب شور دریا) بخوبی نشان می‌دهد.



شکل ۸ ــ نقشه هدایت الکتریکی (خطوط ایزوکنداکتیوتیه) سفره سطحی در بخشی از دشتهای ساحلی مازندران (ارقام منحنی‌ها برحسب میکروموهوس بر سانتیمتر است)

آبدهی مجاز و بیلان آب

برای آنکه منبع آب زیرزمینی به طور نامحدود قابل بهره‌برداری باشد باید بین تمام آبهای ورودی به حوضه و آبهای خروجی از آن تعادلی هیدرولوژیکی وجود داشته باشد. از یک سفره مقدار معینی آب می‌توان استخراج کرد. «آبدهی مجاز»[۶] مقدار آبی است که می‌توان از یک حوضه آب زیرزمینی سالیانه برداشت نمود بدون آنکه نتیجه نامطلوبی به بار آورد. ظاهراً مفهوم آبدهی مجاز ساده به نظر می‌رسد، آنقدر باید از یک سفره آب استخراج کرد که در آن تغذیه می‌شود. برداشت بیش از تغذیه، موجب کاهش ذخیره و در نتیجه افت دائمی سطح ایستابی و پیزومتریک شده، و بنابراین مخارج استخراج آب را از یک حد قابل قبول افزایش می‌دهد. ولی افت دائمی سطح آب تنها نتیجه نامطلوب نیست. لذا گاهی آبدهی مجاز باید کمتر از مقدار متوسط تغذیه باشد، مثلاً در سفره‌های ساحلی آبدهی مجاز محدود به مقدار برداشتی است که بیشتر از آن



شکل ۹ ــ تغییرات هدایت الکتریکی (برحسب میکروموهوس بر سانتیمتر) در مقطعی قائم در شمال قائم‌شهر (AA در شکل ۸)

خطر نفوذ آب شور دریا را در سفره به دنبال دارد.

آخرین مرحله در مطالعه آبهای زیرزمینی برقراری معادلهٔ «بیلان آب»[۷] یا تعادل هیدرولوژیکی در حوضه مورد مطالعه است که با استفاده از کلیه مطالعات انجام شده و داده‌های موجود صورت می‌گیرد. شکل کلی

این معادله عبارتست از:

[جریان خروجی زیرزمینی + جریان خروجی سطحی + آبهای انتقالی به حوضه‌های مجاور + تبخیر و تعرق + افزایش ذخیره زیرزمینی + افزایش ذخیره سطحی] = [بارش + جریان ورودی زیر سطحی + جریان ورودی سطحی + کاهش ذخیره سطحی + آبهای انتقالی از حوضه‌های مجاور + کاهش ذخیره آب زیرزمینی]

در موارد بسیاری می‌توان اقلام معینی را از معادله حذف کرد. مثلاً در یک سفره تحت فشار ممکن است بیلان آب مستقل از جریان سطحی، بارش، تبخیر و تعرق و غیره باشد.

تمام اقلام فوق را برحسب حجم آب در واحد زمان (معمولاً سال) بیان می‌کنند. معادله فوق را می‌توان برای مناطقی با هر اندازه نوشت ولی بهتر است محدودهٔ آب‌شناسی معینی مثلاً یک سفره، یک حوضه آب زیرزمینی یا حوضه آبریز یک رودخانه را در نظر گرفت.

با توجه به معادله بیلان آب آبدهی مجاز یا برداشت بیش از حد از یک حوضهٔ آب زیرزمینی را با توجه به شرایط موجود یا در هر شرایط خاصی در آینده می‌توان مشخص کرد. بیلان آب از مفاهیم اساسی در هیدرولوژی است و با تعیین مقادیر کمی اجزاء آن می‌توان تأثیر دخالت انسان را در چرخهٔ طبیعی آب و نحوه صحیح بهره‌برداری از منابع آب را روشن کرد.

حل معادله بیلان آب مستلزم گردآوری اطلاعات جامعی در حوضه مورد مطالعه است:

جریانهای ورودی و خروجی سطحی: دبی جریان آبهای سطحی با وسایل و روشهایی که‌اشاره‌شدپایدبه‌طور مداوم اندازه‌گیری‌شود.

بارش: اندازه‌گیری باران به وسیله دستگاههای باران‌سنج صورت می‌گیرد. ایستگاه‌های باران‌سنجی باید توزیع مناسبی داشته باشند تا بتوان بر مبنای داده‌های آنها و با رسم خطوط هم باران یا روشهای دیگر ارتفاع متوسط باران را به درستی بر آورد نمود.

تبخیر و تعرق[8]: تمام آبهای موجود در سطح و نزدیک سطح زمین در معرض تبخیر و تعرق قرار دارند. وسایل و روشهای مختلفی برای بر آورد تبخیر و تعرق از سطوح مختلف وجود دارد. از جمله استفاده از تشتکهای تبخیر است که به وسیله آنها تبخیر پتانسیل (مقدار تبخیر در صورت موجود بودن آب) اندازه‌گیری می‌شود و یا استفاده از روابطی تجربی است که براساس داده‌های هواشناسی به ویژه دما و مقدار بارندگی می‌توان میزان تبخیر و تعرق را برآورد نمود.

تغییرات ذخیره سطحی: با اندازه‌گیری تغییرات تراز آب در منابع سطحی و با توجه به مساحت آنها می‌توان تغییرات ذخیره سطحی را در یک دورهٔ معین محاسبه کرد. در صورت لزوم تغییرات پوشش برفی و یخ یخچالها نیز باید مورد توجه قرار گیرد.

تغییرات ذخیره آب زیرزمینی: اندازه‌گیری تغییرات ذخیره آب زیرزمینی (در منطقه اشباع) مستلزم اندازه‌گیری تغییرات تراز آب نسبت به زمان در چاههای مشاهده‌ای موجود در حوضه است که توزیع مناسبی داشته باشند. بعلاوه آبدهی ویژه یا ضریب ذخیره نیز باید بر آورد شود (مقاله آبهای زیرزمینی، مجله شماره ۶ رشد آموزش زمین شناسی). در نقشه‌ای از منطقه نقاطی را که مقدار تغییر تراز آب زیرزمینی در یک دوره معین یکسان است، به وسیله خطوطی بهم متصل می‌کنند. با ضرب کردن مقدار تغییر تراز آب در آبدهی ویژه (یا ضریب ذخیره) و در مساحت مقدار تغییر ذخیره در هر محدوده‌ای به دست می‌آید که با جمع کردن آنها مقدار تغییر ذخیره در حوضه معلوم می‌شود.

البته مقدار ذخیره در منطقه تهویه نیز تغییر می‌کند ولی اندازه‌گیری آن مشکل است. اما با انتخاب دوره‌هایی که در ابتدا و انتهای آن تغییرات رطوبت تقریباً یکسان باشد می‌توان اثر این عامل را به حداقل رساند.

جریانهای ورودی و خروجی زیر سطحی: بر آورد این اقلام از همه مشکلتر است زیرا که مستقیماً قابل اندازه‌گیری نیستند. گاهی یکی از آنها یا اختلاف آنها را به عنوان تنها مجهول از معادله بیلان بر آورد می‌کنند. با مطالعات زمین‌شناسی ممکن است معلوم شود که اساساً جریان زیر سطحی وجود ندارد. ولی بهرحال در مواردی نیز مسلم است که جریانی زیرزمینی از یک حوضه به حوضه دیگر وجود دارد بنابراین مقدار آن باید بر آورد شود برای اینکار لازم است که گرادیان هیدرولیک (i)، سطح مقطع عبور جریان (A) و نفوذپذیری (K) مشخص شود تا با استفاده از رابطه دارسی ($Q = KAi$) دبی جریان عبوری تعیین گردد. گرادیان هیدرولیک را با استفاده از نقشه‌های تراز آب زیرزمینی، سطح مقطع را با توجه به عرض عبور جریان و همچنین عمق آن که از نتایج حفاری چاهها یا ژئوفیزیک به دست می‌آید و نفوذپذیری را با استفاده از آزمایشات پمپاژ چاهها یا به راههای دیگر به دست می‌آورند.

زیرنویسها:

1 – Well – logging

2 – base exchange

3 – total dissolved solids

4 – hardness

5 – turbidity

6 – safe yield

7 – water balance

8 – evapo – transpiration

قدردانی:
از آقای محمد باقر اکبری که شکلهای متن مقاله را رسم کرده‌اند صمیمانه سپاسگزاری می‌کنم.