

جمهوری اسلامی ایران
ریاست جمهوری
معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی

راهنمای کاربرد ردیاب‌ها در بررسی نشت و فرار آب از مخزن و تکیه‌گاه‌های سد

نشریه شماره ۵۶۱

وزارت نیرو
دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا
<http://seso.moe.org.ir>

معاونت نظارت راهبردی
امور نظام فنی
nezamfanni.ir

۱۳۹۱

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

امور نظام فنی اجرایی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این نشریه نموده و آن را برای استفاده به جامعه مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلط‌های مفهومی، فنی، ابهام، ابهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این‌رو، از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی مراتب را به صورت زیر

گزارش فرمایید:

۱- شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.

۲- ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.

۳- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.

۴- نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید.

کارشناسان این امور نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت.

پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه: تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی علی‌شاه - مرکز تلفن ۳۳۲۷۱

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، امور نظام فنی

Email: info@nezamfanni.ir

web: nezamfanni.ir



بسمه تعالی

ریاست جمهوری

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور

شماره: ۲۰/۲۰۵۶۶	بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران
تاریخ: ۱۳۹۱/۳/۲۱	
موضوع: راهنمای کاربرد ردیاب‌ها در بررسی نشت و فرار آب از مخزن و تکیه‌گاه‌های سد	
<p>به استناد ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و ماده (۶) آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی مصوب سال ۱۳۵۲ و در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور (موضوع تصویب‌نامه شماره ۴۲۳۳۹/ت ۳۳۴۹۷ هـ، مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیأت محترم وزیران)، به پیوست نشریه شماره ۵۶۱ امور نظام فنی، با عنوان «راهنمای کاربرد ردیاب‌ها در بررسی نشت و فرار آب از مخزن و تکیه‌گاه‌های سد» از نوع گروه سوم ابلاغ می‌شود.</p> <p>رعایت مفاد این ضابطه برای دستگاه‌های اجرایی، مشاوران، پیمانکاران و سایر عوامل ذی‌نفع نظام فنی و اجرایی، در صورت نداشتن ضوابط معتبر بهتر، از تاریخ ۱۳۹۱/۶/۱ اجباری است.</p>	
<p>محمد مهدی رحمتی معاون نظارت راهبردی</p>	

بسمه تعالی

پیشگفتار

با توجه به اهمیت مطالعه سازندهای کارستی در بررسی مساله آببندی سدها و گسترش روزافزون سازههای آبی در این سازندها و به دلیل وجود ذخایر آبی مناسب در آنها انجام مطالعات و بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی سازندهای کارستی و ردیابی پتانسیل آببندی این سازندها در قبل از احداث سدها و همچنین پس از آبگیری مخازن لازم و ضروری است.

با توجه به فراوانی روشها، دستگاهها و ردیابهای مورد استفاده در کشورهای در حال توسعه و توسعه یافته جهان، امروزه نیاز به تهیه یک راهنمای مطالعاتی همخوان با نیازهای فنی کنونی کشور بیش تر احساس می شود.

با توجه به اهمیت مبحث فوق، امور آب وزارت نیرو در قالب طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور، تهیه نشریه «راهنمای کاربرد ردیابها در بررسی نشت و فرار آب از مخزن و تکیه گاههای سد» را با هماهنگی امور نظام فنی و اجرایی معاونت نظارت راهبردی رییس جمهور در دستور کار قرار داد و پس از تهیه، آن را برای تایید و ابلاغ به عوامل ذینفع نظام فنی و اجرایی کشور به معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور (دفتر نظام فنی اجرایی) ارسال نمود که پس از بررسی، براساس ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه و آیین نامه استانداردهای اجرایی مصوب هیات محترم وزیران و طبق نظام فنی اجرایی کشور (مصوب شماره ۴۲۳۳۹/ت/۳۳۴۹۷ هـ- مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیات محترم وزیران) تصویب و ابلاغ گردید.

هدف این نشریه ارائه راهنمایی جهت کاربرد ردیابها در بررسی نشت و فرار آب از مخزن و تکیه گاههای سد می باشد. بدین وسیله معاونت نظارت راهبردی از تلاش و جدیت رییس امور نظام فنی جناب آقای مهندس غلامحسین حمزه مصطفوی و کارشناسان محترم امور نظام فنی و نماینده مجری محترم طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور وزارت نیرو، جناب آقای مهندس محمد ابراهیم نیا و متخصصان همکار در امر تهیه و نهایی نمودن این نشریه، تشکر و قدردانی می نماید و از ایزد منان توفیق روزافزون همه ی این بزرگواران را آرزومند می باشد.

امید است متخصصان و کارشناسان با ابراز نظرات خود درخصوص این نشریه ما را در اصلاحات بعدی یاری فرمایند.

معاون نظارت راهبردی

بهار ۱۳۹۱

تهیه و کنترل

مجری: دانشکده صنعتی شاهرود

مؤلف اصلی: غلامحسین کرمی دانشگاه صنعتی شاهرود دکترای هیدروژئولوژی

اعضای گروه تهیه‌کننده:

علیرضا افتخاری	شرکت بین‌المللی بهسازی و تزریق پارسیان	کارشناس ارشد هیدروژئولوژی
غلامعباس کاظمی	دانشگاه صنعتی شاهرود	دکترای هیدروژئولوژی
غلامحسین کرمی	دانشگاه صنعتی شاهرود	دکترای هیدروژئولوژی
مجید کمالی نیسیانی	دانشگاه صنعتی شاهرود	کارشناس ارشد هیدروژئولوژی

اعضای گروه نظارت:

عبدالوحید آغاسی	دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی	دکترای مهندسی منابع آب
یوسف خلیج امیرحسینی	موسسه تحقیقات آب	کارشناس ارشد سنجش از راه دور
مریم رحیمی فراهانی	طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور - وزارت نیرو	فوق لیسانس عمران - آب

اعضای گروه تایید کننده (کمیته تخصصی مدیریت منابع آب طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور):

احمد ابریشم‌چی	دانشگاه صنعتی شریف	دکترای منابع آب
عبدالوحید آغاسی	دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی	دکترای منابع آب
بهرام ثقفیان	مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری	دکترای منابع آب
فضلعلی جعفریان	شرکت مدیریت منابع آب ایران	لیسانس زمین‌شناسی
عباسقلی جهانی	کارشناس آزاد	فوق لیسانس مهندسی هیدرولوژی
پیمان دانش کارآراسته	دانشگاه بین‌المللی امام‌خمینی	دکترای علوم و مهندسی آبیاری
مریم رحیمی فراهانی	طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور - وزارت نیرو	فوق لیسانس عمران - آب

اعضای گروه هدایت و راهبردی:

خشایار اسفندیاری	رییس گروه امور نظام فنی
فرزانه آقارمضانعلی	رییس گروه امور نظام فنی
ساناز سرافراز	کارشناس منابع آب امور نظام فنی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	مقدمه
۳	فصل اول - کلیات
۵	۱-۱- کلیات
۵	۱-۱-۱- نشت و فرار آب از مخازن و تکیه‌گاه‌های سدها
۶	۱-۱-۲- ضرورت بررسی نشت و فرار آب
۸	۱-۱-۳- روش‌های بررسی نشت و فرار آب از مخازن و تکیه‌گاه‌های سدها
۱۰	۱-۱-۴- مروری بر تحقیقات و پروژه‌های انجام شده در جهان و ایران
۱۵	فصل دوم - مطالعات زمین‌شناسی
۱۷	۱-۲- بازدید صحرایی و سنجش‌های میدانی
۱۷	۱-۲-۱- ویژگی‌های واحدهای سنگی
۱۹	۱-۲-۲- ویژگی‌های ساختاری
۱۹	۱-۲-۳- ویژگی‌های ریخت‌شناسی
۲۰	۱-۲-۴- ویژگی‌های مربوط به نهشته‌های جوان
۲۱	۲-۲- چگونگی تفکیک سازندها و ویژگی‌های آنها
۲۱	۲-۲-۱- کلیات
۲۱	۲-۲-۲- نحوه تعیین مرز و تفکیک سازندها
۲۲	۲-۲-۳- تفکیک سازندها در شرایط خاص هیدروژئولوژیکی
۲۳	۲-۲-۴- تفکیک سازندها در جهت عمودی
۲۳	۳-۲- بررسی گسل‌ها، شکستگی‌ها، خطواره‌ها و سامانه درزه و شکاف‌ها
۲۳	۳-۲-۱- گسل‌ها
۲۴	۳-۲-۲- درزه‌ها
۲۵	۳-۲-۳- خطواره‌ها
۲۶	۴-۲- نحوه تحلیل سامانه درزه‌ها و گسل‌ها در گستره مخزن و سد
۲۶	۴-۲-۱- تحلیل گسل‌ها
۲۷	۴-۲-۲- تحلیل سامانه درزه‌ها
۲۹	فصل سوم - بررسی امور اکتشافی
۳۱	۱-۳- بررسی اکتشافات ژئوفیزیکی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۳۱	۳-۱-۱- مقدمه
۳۱	۳-۱-۲- ماتریکس سازندهای سخت
۳۱	۳-۱-۳- شکستگی‌ها
۳۱	۳-۱-۴- منطقه هوازده
۳۲	۳-۱-۵- فلسفه اکتشافات ژئوفیزیکی
۳۲	۳-۱-۶- روش مقاومت الکتریکی
۳۷	۳-۱-۷- تصویرنگاری الکتریکی
۳۷	۳-۱-۸- روش‌های الکترومغناطیس
۴۰	۳-۱-۹- سامانه‌های VLF
۴۱	۳-۱-۱۰- روش مقاومت VLF
۴۱	۳-۱-۱۱- سامانه‌های الکترومغناطیس تدریجی (TEM) Transient
۴۱	۳-۱-۱۲- روش‌های لرزه‌ای
۴۳	۳-۱-۱۳- مغناطیس سنجی
۴۴	۳-۱-۱۴- ثقل سنجی
۴۴	۳-۱-۱۵- روش‌های بررسی لوگ گمانه‌ها
۴۷	۳-۱-۱۶- نتیجه‌گیری
۴۸	۳-۲- بررسی نتایج حفاری‌های اکتشافی (گمانه‌ها) و مطالعات ژئوتکنیک
۴۸	۳-۲-۱- آزمایش لوژن
۴۹	۳-۲-۲- آزمایش نفوذپذیری لوفران
۵۱	فصل چهارم - بررسی مطالعات هیدروژئولوژی
۵۳	۴-۱- بررسی نتایج کمی
۵۳	۴-۱-۱- سطح آب زیرزمینی و نوسانات آن
۵۶	۴-۱-۲- جهت جریان و الگوی آن
۵۸	۴-۱-۳- خصوصیات هیدرودینامیکی لایه‌ها
۶۰	۴-۱-۴- آب‌دهی چشمه‌ها و تغییرات آن
۶۲	۴-۱-۵- مقایسه آنمود چشمه‌ها و هیستوگراف
۶۲	۴-۱-۶- بررسی تغییرات دما و هدایت الکتریکی چشمه‌ها
۶۶	۴-۲- بررسی نتایج کیفی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۶۶	۴-۲-۱- کیفیت آب زیرزمینی و تغییرات آن
۶۶	۴-۲-۲- تغییرات کیفی آب‌های سطحی
۶۷	۴-۲-۳- تحلیل کموگراف چشمه‌ها
۷۰	۴-۳- تعیین موقعیت فضایی گسل‌ها، شکستگی‌ها و زون‌های خرد
۷۰	۴-۳-۱- تعیین موقعیت فضایی گسل‌ها، شکستگی‌ها و زون‌های خرد شده
۷۲	۴-۳-۲- تعیین موقعیت فضایی گسل‌ها، شکستگی‌ها و زون‌های خرد شده
۷۳	۴-۴- نحوه ارتباط هیدرولیکی مخزن و تکیه‌گاه‌ها با منابع آب پایین‌دست و تشخیص زون‌های ارتباطی
۷۶	۴-۵- تعیین وضع تراوایی زون‌های ارتباطی
۷۷	۴-۶- برآوردی از ارتباط هیدرولیکی مخزن و تکیه‌گاه‌های سد با منابع آب مجاور
۷۹	۴-۷- تهیه مدل مفهومی اولیه
۸۱	فصل پنجم - ردیابی
۸۳	۵-۱- کلیات
۸۳	۵-۲- کاربرد انواع ردیاب‌ها در بررسی نشت و فرار آب از سدها و مخازن
۸۳	۵-۲-۱- ردیاب‌های محیطی
۸۳	۵-۲-۲- ردیاب‌های مصنوعی
۸۴	۵-۳- ملاحظات ایمنی در پروژه‌های ردیابی
۸۴	۵-۴- ملاحظات زیست محیطی در پروژه‌های ردیابی
۸۵	۵-۵- حداقل تخصص‌های مورد نیاز در گروه کاری
۸۵	۵-۶- لوازم و تجهیزات مورد نیاز
۸۵	۵-۷- نقد مطالعات ردیابی قبلی
۸۵	۵-۸- چگونگی انتخاب نوع ردیاب
۸۵	۵-۹- عوامل موثر در تعیین تعداد ردیاب تزریقی
۸۶	۵-۱۰- نحوه تعیین مقدار ردیاب تزریقی
۸۶	۵-۱۱- نقاط تزریق و چگونگی تعیین محل آنها
۸۶	۵-۱۲- نحوه تعیین نقاط نمونه‌برداری
۸۶	۵-۱۳- روش‌های تزریق (امتیازات و محدودیت‌ها)
۸۶	۵-۱۴- نحوه نمونه‌برداری و ارسال نمونه‌ها به آزمایشگاه
۸۶	۵-۱۵- سنجش‌های میدانی به هنگام عملیات ردیابی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۸۶	۵-۱۶- سنجش‌های آزمایشگاهی نمونه‌ها
۸۶	۵-۱۷- چگونگی تدوین برنامه عملیات میدانی پروژه
۸۹	فصل نهم - تجزیه و تحلیل نتایج
۹۱	۶-۱- جمع آوری و تلفیق کلیه نتایج مطالعات قبلی
۹۱	۶-۲- بررسی‌های کیفی
۹۱	۶-۲-۱- تعیین نقاط دارای پتانسیل نشت
۹۳	۶-۲-۲- تعیین جهت و مسیرهای فرار و نشت آب
۹۳	۶-۲-۳- چگونگی تعیین نحوه ارتباط هیدرولیکی مخزن سد با منابع آب مجاور
۹۴	۶-۳- بررسی‌های کمی
۹۶	۶-۳-۱- نحوه برآورد زمان ماندگاری
۹۷	۶-۳-۲- چگونگی برآورد درصد بازیافت ردیاب
۹۸	۶-۳-۳- نحوه تعیین سرعت و الگوی جریان آب
۱۰۱	۶-۳-۴- چگونگی تعیین حجم فرار و نشت آب
۱۰۲	۶-۳-۵- رابطه بین رقوم آب در مخزن و مقدار نشت آب
۱۰۳	۶-۳-۶- تصحیح و تکمیل مدل مفهومی اولیه
۱۰۵	منابع و مراجع

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۷	شکل ۱-۱- موقعیت قرارگیری آب زیرزمینی در مجاورت مخازن سدها
۲۲	شکل ۱-۲- تفکیک سازندها در مواردی که گذر از یک سازند به سازند دیگر تدریجی باشد
۳۳	شکل ۱-۳- نمودار شماتیک آرایشهای ژئوفیزیکی (a) آرایش ونر و (b) آرایش شلومبرژه
۳۶	شکل ۲-۳- منحنی سونداژ یک منطقه نمونه سازند سخت و احتمال خطای معادل گیری
۳۸	شکل ۳-۳- نمودار شماتیک روش Slingram
۴۰	شکل ۳-۴- بررسی اثر گسل با استفاده از روش VLF
۴۲	شکل ۳-۵- روش لرزه نگاری انکساری و نمودار زمان-فاصله
۴۶	شکل ۳-۶- انواع لوگ‌های مورد بررسی در گمانه‌ها

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۵۴	شکل ۴-۱- نوسانات مقدار بارندگی و تغییرات سطح آب زیرزمینی را در یک دوره طولانی مدت در آبخوانی در کالیفرنیا
۵۵	شکل ۴-۲- نحوه محاسبه بازده بارومتری
۵۷	شکل ۴-۳- چگونگی تهیه نقشه هم پتانسیل آب زیرزمینی را با استفاده از ارتفاع سطح آب زیرزمینی در سه پیژومتر
۷۵	شکل ۴-۴- سامانه‌های جریان کارستی (نقل از Karami 2002).
۹۵	شکل ۶-۱- توزیع غلظت در چهار زمان مختلف پس از تزریق ردیاب بر مبنای حل یک بعدی معادله انتقال جرم
۹۵	شکل ۶-۲- توزیع غلظت در چهار زمان مختلف پس از تزریق ردیاب بر مبنای حل دو بعدی معادله انتقال جرم
۹۶	شکل ۶-۳- نمودارهای غلظت-زمان در حالت‌های مختلف ضریب پخشیدگی آبخوان
۹۸	شکل ۶-۴- جریان افشان، حدواسط و مجرای (Quinlan and Ewers, 1985).
۹۹	شکل ۶-۵- محدوده اعتبار قانون دارسی (Freeze and Cherry 1979).
۱۰۱	شکل ۶-۶- نقشه هم پتانسیل به صورت شماتیک

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۱۰	جدول ۱-۱- پروژه‌های سدسازی هند که در آنها از ایزوتوپ‌ها برای ردیابی استفاده شده است
۳۴	جدول ۱-۳- مقادیر حداکثر عمق موثر پیمایش و عمق میانه پیمایش برای دو آرایش
۳۸	جدول ۳-۲- عمق اکتشاف SEM در ۵۰۰۰ HZ
۴۳	جدول ۳-۳- محدوده امواج لرزه‌ای برای سازندهای مختلف
۵۹	جدول ۴-۱- هدایت هیدرولیکی رسوبات و لایه‌های زمین‌شناسی
۶۰	جدول ۴-۲- طبقه‌بندی چشمه‌ها بر اساس آب‌دهی آنها
۶۹	جدول ۴-۳- تقسیم‌بندی اجمالی چشمه‌ها بر اساس نوع جریان (نقل از Jacobsen and Longmuir 1974)
۶۹	جدول ۴-۴- ضریب تغییرات پارامترهای فیزیکی و شیمیایی در چشمه‌های مجرای و افشان
۷۰	جدول ۴-۵- فراوانی درزه‌ها در دسته درزه‌های مختلف

مقدمه

یکی از مسایل مهم در مورد سدها، بررسی آب‌بندی سازندهای موجود در مخزن و تکیه‌گاه‌ها قبل از احداث سد و پس از آب‌گیری مخزن (در صورت وجود نشست و فرار آب قابل توجه) می‌باشد. معمولاً قسمت عمده فرار آب، در سدهای مناطق کارستی و از طریق چشمه‌های طبیعی که قبل از آب‌گیری سد وجود داشته‌اند صورت می‌گیرد به این ترتیب که بده این چشمه‌ها در اثر فرار آب از مخزن به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد.

در مورد دیگر سازندهای سخت و غیرکارستی (به استثنای سنگ‌های ولکانیکی مانند بازالت‌ها)، لازم به ذکر است که این قبیل سازندها عمدتاً تراوایی بسیار ناچیزی داشته و یا اینکه اگر در اثر فرایندهای تکتونیکی به‌طور محدودی دارای تراوایی شوند به دلیل عدم امکان انحلال و توسعه زون‌های تراوا، جریان آب در آنها به صورت افشان^۱ می‌باشد و بنابراین در مورد این قبیل سازندها نگرانی خاصی به منظور آب‌بندی سدها وجود ندارد. در بعضی از مناطق بازالت‌ها رفتار هیدروژئولوژیکی شبیه سازندهای کارستی با جریان مجرای^۲ را از خود نشان می‌دهند که می‌توانند همانند سازندهای کارستی مخاطراتی را در آب‌بندی سدها به‌وجود آورند.

- هدف

با توجه به اهمیت مطالعه سازندهای کارستی در بررسی مساله آب‌بندی سدها و همچنین گسترش قابل توجه این سازندها با ذخایر آبی مناسب در کشور و توسعه فعالیت‌های سدسازی در آنها، هدف از تهیه این راهنما بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی سازندهای کارستی و ارائه راهنمای چگونگی کاربرد مطالعات زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، بررسی‌های اکتشافی و نهایتاً مطالعات ردیابی در تعیین پتانسیل آب‌بندی این سازندها در قبل از احداث سدها و پس از آب‌گیری مخازن می‌باشد.

- دامنه کاربرد

این راهنما توسط کارشناسان و مشاوران مرتبط با پروژه‌های سدسازی و سایر پروژه‌های مرتبط از قبیل تونل‌ها و کانال‌های انتقال آب به ویژه در مناطق کارستی قابل استفاده می‌باشد.

فصل ۱

کلیات

۱-۱-۱ کلیات

امروزه احداث سد در بسیاری از کشورهای جهان امری متداول و مرسوم بوده و به عنوان شاخصی از پیشرفت و توسعه یک کشور محسوب می‌شود. در این راستا احداث سد در مناطق با پتانسیل فرار آب (مخصوصاً مناطق کارستی) به دلیل توسعه زیاد آنها و همچنین تشکیل منابع عظیم آب در آنها و با توجه به وجود حفرات و مجاری انحلالی، امری رایج می‌باشد.

۱-۱-۱-۱-۱ نشت و فرار آب از مخازن و تکیه‌گاه‌های سدها

به‌طور کلی هیچ سدی را نمی‌توان آب‌بند کامل در نظر گرفت و مساله فرار آب در کلیه سدهای کارستی وجود دارد. اما به دلیل وجود آبخوان‌های عظیم در مناطق کارستی احداث سد در آنها نباید بدون مطالعات کافی، منتفی شود. بلکه باید با مطالعات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی در مقیاس ناحیه‌ای و سپس در محدوده سد، نقاط با پتانسیل فرار آب را شناسایی کرد و با به‌کارگیری روش‌های مناسب مقدار فرار آب را تا حد قابل قبولی کاهش داد. مسلماً انجام این روش‌ها در بعضی موارد مستلزم صرف هزینه زیادی بوده و در بسیاری از پروژه‌ها این هزینه به ۱۵ تا ۲۰ درصد هزینه کل پروژه نیز می‌رسد. متأسفانه به دلیل پیچیدگی و تنوع مشکلات موجود در مناطق کارستی در بعضی موارد علی‌رغم مطالعات دقیق و گسترده، مشکل فرار آب از سدها به مقدار زیاد وجود داشته به گونه‌ای که تکنولوژی موجود جهت درمان آن کافی نبوده و یا اینکه اقتصاد پروژه این امکان را از متخصصان سلب می‌نماید. به عنوان مثال سد مونترآک^۱ در اسپانیا که چهل سال پیش ساخته شده است در اثر فرار آب از مخزن و تکیه‌گاه‌ها هرگز پر نشده است و در سد کاماراسا^۲ در اسپانیا نشت اولیه $2/5 \text{ m}^3/\text{s}$ به مقدار $11/5 \text{ m}^3/\text{s}$ افزایش یافت. همین‌طور سد می^۳ در ترکیه که بر روی سنگ آهک کارستی احداث شده، هرگز پر نشده است. کف مخزن این سد بر روی آهک‌ها که با آبرفت به ضخامت ۱۵ تا ۲۰ متر پوشیده شده که عبور آب از میان آبرفت با توجه به ارتفاع آب دریاچه سد باعث به‌وجود آمدن بیش از ۳۶ فروچاله^۴ در مخزن سد شده، قرار گرفته است. از نمونه‌های دیگر می‌توان به سد لار در ایران با فرار آب $10/8 \text{ m}^3/\text{s}$ ، سد کبان^۵ ترکیه با فرار آب $26 \text{ m}^3/\text{s}$ ، سد ورتاک^۶ یوگسلاوی با فرار آب $15 \text{ m}^3/\text{s}$ ، سد ماوورو^۷ در مقدونیه با فرار آب $9-12 \text{ m}^3/\text{s}$ ، سد گریت فالز^۸ در ایالت تنسی آمریکا با فرار آب $9/5 \text{ m}^3/\text{s}$ ، سد آتاتورک^۹ ترکیه با فرار آب بیش از $10 \text{ m}^3/\text{s}$ و سد هوتو^{۱۰} در هرزگوین با فرار آب $3 \text{ m}^3/\text{s}$ اشاره کرد. همچنین در بسیاری از پروژه‌ها، مقدار فرار آب از مجاری انحلالی معادل میانگین بده سالیانه رودخانه بوده است.

1- Montejaque

2- Camarassa

3- May

4- Sinkhole

5- Keban

6- Vrtac

7- Mavrovo

8- Great Falls

9- Ataturk

10- Hutovo

۱-۱-۲- ضرورت بررسی نشت و فرار آب

از آنجایی که پس از آب‌گیری سد، بار هیدرولیکی^۱ افزایش می‌یابد، فرار آب هرچند به مقدار ناچیز اجتناب‌ناپذیر است و هیچ مخزنی را نمی‌توان آب‌بند کامل در نظر گرفت. مساله فرار آب در مناطق کارستی با توجه به توسعه درز و شکاف‌ها و مجاری انحلالی دارای پتانسیل بیش‌تری نسبت به سایر مناطق می‌باشد.

نیل^۲، ۱۹۷۲ طرق مختلف فرار آب از سدهای کارستی را به شرح زیر بیان کرده است:

الف- عبور آب از زیر سد به داخل دره همان رودخانه یا عبور آب از داخل سازندهای کارستی به داخل دره مجاور

ب - معکوس شدن جریان به داخل چشمه‌ها در نتیجه افزایش تراز آب در مخزن

ج - فرار آب از طریق فروچاله که به غارهای زیرزمینی متصل هستند.

د - فرار آب از طریق گسل‌ها و مناطق درز و شکاف‌دار

ه - فرار آب در نتیجه شستشوی رس و سایر مواد نرم باقیمانده در درز و شکاف‌ها و مجاری انحلالی

و - فرار آب در نتیجه انحلال ژئیس و سایر کانی‌های تبخیری

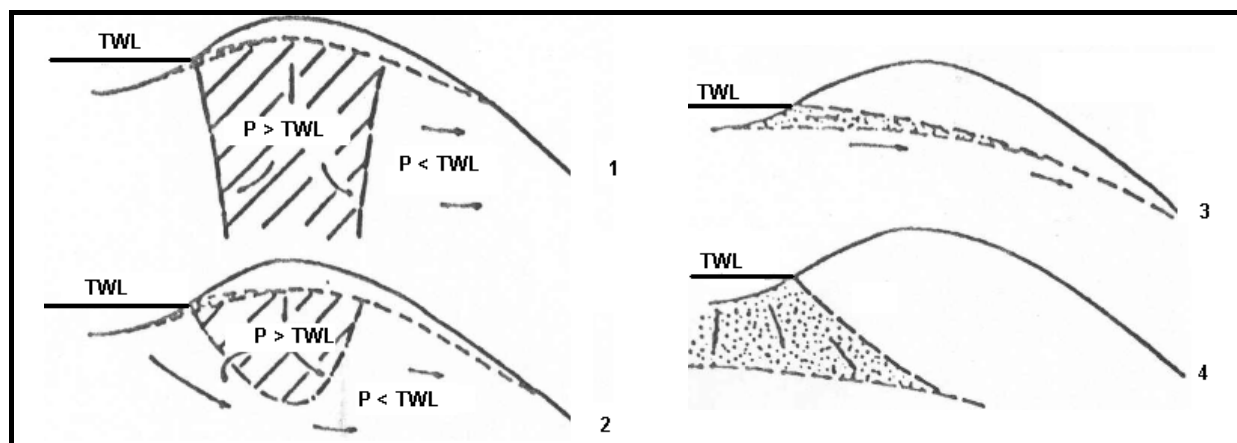
ز- فرار آب در نتیجه عدم تحمل سنگ‌های پی بر اثر آب‌گیری سد و بار هیدرولیکی وارده

با توجه به حالت‌های مختلف فوق‌الذکر در فرار آب از سدها، بررسی پتانسیل وقوع هر یک از این حالت‌ها ضروری می‌باشد. به‌طور کلی در پدیده فرار آب از سدها یک یا چند حالت از حالت‌های مذکور می‌تواند به وقوع بپیوندد. به عنوان مثال در بعضی از موارد پس از آب‌گیری مخازن، چشمه‌های جدیدی در مناطق پایین‌دست ظاهر شده است که تغذیه این چشمه‌ها از داخل مخزن به دو طریق عمده بوده است. یکی ورود آب مخزن به داخل گسل‌ها، درز و شکاف‌ها و کانال‌های انحلالی و خروج آن از چشمه‌ها و دیگری خروج آب از طریق فروچاله‌ها که در داخل مخزن به‌وجود آمده‌اند. به این صورت که در مواردی که سازندهای کارستی توسط آبرفت پوشیده شده باشد، پس از آب‌گیری مخزن در اثر افزایش فشار آب این رسوبات سوراخ شده و فروچاله‌ها در کف مخزن به‌وجود می‌آیند که می‌توانند آب را در داخل کانال‌های انحلالی موجود در آهک‌ها هدایت کرده و از چشمه‌ها خارج نمایند. به عنوان مثال در سد می^۳ ترکیه بیش از ۳۶ حفره فروکش به‌وجود آمده است که باعث شده‌اند، مخزن این سد هرگز پر نشود. نکته‌ای که ذکر آن بسیار حایز اهمیت می‌باشد این است که در بررسی پتانسیل فرار آب، علاوه بر بررسی امکان عبور آب در داخل سازندهای کارستی، باید به موقعیت تراز آب زیرزمینی نسبت به تراز کف مخزن و حداکثر تراز آب مخزن توجه شود. در شکل (۱-۱) چهار حالت موقعیت قرارگیری آب زیرزمینی در مجاورت مخازن نشان داده شده است.

1- Hydraulic Head

2- Knill

3- May



شکل ۱-۱- موقعیت قرارگیری آب زیرزمینی در مجاورت مخازن سدها

همان طور که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است این چهار حالت عبارتند از:

- سطح آب زیرزمینی و سطح پیزومتری بالاتر از حداکثر تراز آب مخزن^۱ می باشد.
- سطح آب زیرزمینی بالاتر از حداکثر تراز آب مخزن است ولی سطح فشار پیزومتری در عمق این گونه نیست.
- سطح آب زیرزمینی و پیزومتری پایین تر از حداکثر تراز آب مخزن بوده اما از تراز کف مخزن بالاتر است.
- سطح آب زیرزمینی پایین تر از کف مخزن قرار دارد.

در حالت اول، سطح آب زیرزمینی و سطح پیزومتری بالاتر از حداکثر تراز آب مخزن است و آب به داخل مخزن تخلیه می شود، بنابراین ذخیره پتانسیل^۲ افزایش می یابد. این مولفه اضافی ذخیره می تواند تحت شرایط خاص زمین شناسی عامل مهمی باشد و حجم آب زیرزمینی در این حالت می تواند به اندازه ذخیره موجود در مخزن نیز برسد. معمولاً در این حالت باید مشاهدات سطح آب جهت تعیین محدوده پرده تزریق در سدها صورت گیرد و پرده تزریق تا نقطه ای امتداد یابد که در آن نقطه ارتفاع سطح آب بالاتر از حداکثر تراز مخزن قرار گیرد.

در حالت دوم، مجموعه ای از شرایط لیتولوژیکی و توپوگرافی به گونه ای است که سطح پیزومتری در پهلوهای مخزن از حداکثر تراز آب مخزن پایین تر بوده و بنابراین نشت عمیقی می تواند از این پهلوها به حوضه مجاور اتفاق بیفتد. احداث گمانه های عمیق و ارزیابی توزیع فشار آب زیرزمینی در اعماق می تواند به بررسی این حالت کمک فراوانی نماید.

در حالت سوم، سطح آب زیرزمینی در نزدیکی تراز رودخانه قرار گرفته است که می تواند به علت وجود سنگ های با نفوذپذیری بالا و همچنین تغذیه محدود آب زیرزمینی در مناطق کم باران باشد. در این شرایط افزایش تراز آب زیرزمینی در ارتباط با مخزن، احتمالاً کم بوده و بنابراین جریان آب زیرزمینی در محل سد پس از احداث سد به طور قابل توجهی افزایش نمی یابد.

در حالت چهارم، سطح ایستابی کاملاً پایین تر از کف مخزن قرار دارد که این حالت معمولاً بیانگر زهکشی عمیق توده های سنگی و یا تغذیه بسیار محدود و کم می باشد. وجود سطح ایستابی عمیق به این مفهوم نیست که احداث مخزن در آن منطقه بیهوده و ناممکن است، اما بدیهی است که مرحله اولیه آب گیری مخزن توأم با تغذیه آب زیرزمینی بوده و محیط هیدروژئولوژیکی جدیدی

1- Top Water Level (TWL)

2- Potential Storage

پس از بالا آمدن سطح ایستابی به وجود می‌آید. در این شرایط نفوذپذیری کف مخزن تنها عامل تعیین‌کننده آب‌بندی مخزن می‌باشد و چنانچه کف مخزن از مواد طبیعی ریزدانه پوشیده شده باشد و یا این که سنگ کف مخزن نفوذناپذیر باشد، این مخازن معمولاً کارایی خود را حفظ می‌کنند ولی این خطر نیز وجود دارد که در اثر افزایش تراز آب مخزن و فشار ستون آب، این لایه غیرقابل نفوذ شکسته شده و فرار آب به مقدار زیادی رخ دهد، همانطور که سد می در ترکیه، سد فلوتورن^۱ در نوادای آمریکا و سد لار در ایران به این شکل کارایی خود را از دست داده‌اند.

۱-۱-۳- روش‌های بررسی نشت و فرار آب از مخازن و تکیه‌گاه‌های سدها

یکی از مسایل مهم در مورد سدها خصوصاً سدهای مناطق کارستی، مساله آب‌بندی مخزن و تکیه‌گاه‌های آنها می‌باشد که به دلیل عملکرد انحلال در این مناطق و توسعه حفرات و مجاری انحلالی در آنها، مساله آب‌بندی آنها با مخاطرات زیادی همراه بوده است. به این ترتیب که امروزه این مشکل به عنوان یک مساله جهانی در نظر گرفته شده و مطالعات بررسی فرار آب با استفاده از روش‌های مختلف قبل از احداث سدها و پس از آب‌گیری مخزن امری کاملاً ضروری می‌باشد.

۱-۱-۳-۱- استفاده از ردیاب‌ها

امروزه از ردیاب‌ها در موارد متعددی استفاده می‌شود که از آن جمله می‌توان به کاربرد ردیاب‌ها در بررسی نشت از لوله‌های انتقال مایعات، مطالعه یخچال‌های طبیعی، تعیین پارامترهای فیزیکی خاک و مواردی از این قبیل اشاره نمود. یکی از کاربردهای مهم استفاده از ردیاب‌ها، بررسی پتانسیل آب‌بندی سازندها در محل احداث سازه‌های آبی از جمله سدها، کانال‌ها و تونل‌های انتقال آب می‌باشد. خصوصیات ردیاب‌ها و چگونگی انجام عملیات ردیابی شامل نحوه تزریق و نمونه‌برداری به تفکیک در آبرفت و سازندهای سخت به ترتیب در نشریات شماره ۲۶۳-الف و ۲۳۲ دفتر استانداردها و معیارهای فنی ارائه شده است. به همین جهت در این راهنما بیش‌تر به چگونگی کاربرد ردیاب‌ها در بررسی نشت و فرار آب از مخازن و تکیه‌گاه‌های سد پرداخته شده است.

به‌طور خلاصه در بررسی نشت و فرار آب، از تکنیک‌های ردیابی در تعیین نقاط دارای پتانسیل نشت، جهت و مسیرهای احتمالی فرار آب، بررسی نحوه ارتباط هیدرولیکی مخزن سد با منابع آب مجاور تعیین سرعت و الگوی جریان آب، تعیین بده نشت آب و در نهایت ارائه یک مدل مفهومی سامانه جریان آب زیرزمینی استفاده می‌شود که موارد به تفصیل در فصول بعدی ارائه خواهد شد.

۱-۱-۳-۲- استفاده از سایر روش‌ها

۱-۱-۳-۱-۱- بررسی‌های زمین‌شناسی

مطالعات زمین‌شناسی به عنوان مطالعات پایه در بسیاری از پروژه‌های عمرانی کاربرد دارد و بسته به اهداف هر پروژه انتظارات خاصی را برآورده می‌نمایند. مهم‌ترین اهداف کاربرد مطالعات زمین‌شناسی در بررسی نشت و فرار آب از مخازن و تکیه‌گاه‌های سدها عبارتند از:

– تعیین و تفکیک سازندها و مناطق با پتانسیل ذخیره و انتقال آب با توجه به خصوصیات هیدروژئولوژیکی آنها

- بررسی‌های زمین‌شناسی ساختمانی اعم از بررسی گسل‌ها، شکستگی‌ها، چین‌خوردگی‌ها و خطواره‌ها و لایه‌بندی که موارد فوق به تفصیل در فصل چهارم ارائه شده است.

۱-۱-۳-۲- بررسی امور اکتشافی

بررسی امور اکتشافی شامل مطالعات ژئوفیزیکی اعم از سطحی و زیرزمینی احداث گمانه‌های اکتشافی و مطالعات ژئوتکنیکی در محل گمانه‌ها می‌باشد. مهم‌ترین اهدافی که در بررسی امور اکتشافی مورد توجه می‌باشند عبارتند از:

- دقیق نمودن مطالعات زمین‌شناسی زیر سطحی
 - تعیین خصوصیات هیدرودینامیکی لایه‌های زیرین
 - بررسی موقعیت تراز آب زیرزمینی
 - تعیین پتانسیل‌های بالقوه و بالفعل نشت و فرار آب
- که این موارد نیز به تفصیل در فصل پنجم ارائه خواهد شد.

۱-۱-۳-۲-۳- بررسی‌های هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمی

مهم‌ترین اهدافی که در مطالعات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی به منظور بررسی پتانسیل آب‌بندی سازندها مورد توجه قرار می‌گیرد عبارتند از:

- بررسی خصوصیات کمی منابع آب زیرزمینی موجود در منطقه شامل بررسی سطح آب زیرزمینی و نوسانات آن، جهت جریان، بررسی تغییرات آب‌دهی چشمه‌ها و ...
- اندازه‌گیری آب سطحی در فصول خشک و تر در مقاطعی از بالادست و پایین‌دست محور سد به جهت اطمینان از تغذیه تکیه‌گاه‌ها از آب سطحی و یا رودخانه از تکیه‌گاه‌ها
- بررسی خصوصیات کیفی منابع آب موجود در منطقه شامل بررسی تغییرات هدایت الکتریکی، تغییرات آنیون‌ها و کاتیون‌ها، تحلیل کموگراف چشمه‌ها و ...
- نحوه ارتباط هیدرولیکی مخزن و تکیه‌گاه‌ها با منابع آب پایین دست و دره‌های مجاور
- تعیین وضع تراوایی زون‌های ارتباطی
- تهیه مدل مفهومی اولیه

که تمامی موارد به تفصیل در فصل ششم مورد بحث قرار گرفته است.

در پایان نکته‌ای که ذکر آن بسیار حایز اهمیت است آن است که اگرچه روش‌های متعددی در بررسی نشت و فرار آب در سازندهای کارستی ذکر شد، ولی هیچ کدام از این روش‌ها به تنهایی کافی نمی‌باشد. از آنجایی که آبخوان‌های کارستی دارای تنوع و پیچیدگی بسیاری می‌باشد، لذا تعمیم نتایج حاصل از بررسی‌های نقطه‌ای (حفر گمانه، انجام آزمایشات نفوذپذیری و دیگر آزمایشات با مقیاس کوچک) به کل سامانه کارستی منطقی نبوده و صحیح نمی‌باشد. چراکه احتمال برخورد یک گمانه آن هم با قطر و عمق محدود به یک مجرای کارستی بسیار کم بوده در حالی که مجرای به قطر یک متر می‌تواند به راحتی یک مترمکعب در ثانیه آب را از

خود عبور دهد. به همین جهت مطالعات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی در مقیاس ناحیه‌ای و به دنبال آن مطالعات ردیابی در محدوده سد به دلیل تاثیر کل سامانه کارستی، بسیار سودمند بوده و نتایج حاصل از کلیه روش‌ها تصویر کامل‌تری را از منطقه ارائه می‌نماید.

۱-۱-۴- مروری بر تحقیقات و پروژه‌های انجام شده در جهان و ایران

اگرچه نشت و فرار آب هرچند به مقدار ناچیز در اغلب پروژه‌های سدسازی اجتناب‌ناپذیر بوده و تقریباً هیچ سدی را نمی‌توان آب‌بند کامل در نظر گرفت، ولی در بعضی از سدها مقدار فرار آب نسبت به میانگین بده ورودی رودخانه به مقداری بوده است که عملاً کارایی آن سدها بسیار کاهش یافته است. به همین جهت کارشناسان در نقاط مختلف دنیا از روش‌های متعددی به منظور بررسی پتانسیل آب‌بندی سازندها قبل از احداث سد و همچنین بررسی مقدار فرار آب پس از آب‌گیری مخازن استفاده نموده‌اند به نحوی که امروزه بررسی پتانسیل آب‌بندی سدها یکی از مهم‌ترین مراحل مطالعاتی پروژه‌های سدسازی می‌باشد. در ادامه، بعضی از روش‌های متداول بررسی آب‌بندی در تعدادی از پروژه‌های انجام شده در جهان و ایران ارائه می‌شود.

۱-۱-۴-۱- پروژه‌های موجود در کشور هندوستان

در کشور هند طی سال‌های ۱۹۶۶ تا ۲۰۰۱ میلادی در مورد ۱۵ سد مطالعات مختلفی انجام شد. از جمله این مطالعات استفاده از ردیاب‌های ایزوتوپی جهت بررسی نشت و فرار آب می‌باشد. اهداف مورد نظر در این مطالعات شامل تعیین محل ورودی نشت در مخزن، تعیین مسیر نشت در ساختمان سد، بررسی تاثیر فعالیت‌های درمانی به منظور کاهش نشت و بررسی سلامت سنگ بستر می‌باشد. در جدول (۱-۱) به‌طور خلاصه برخی از مشخصات این پروژه‌های و نوع ماده ردیاب مورد استفاده ارائه شده است.

جدول ۱-۱- پروژه‌های سدسازی هند که در آنها از ایزوتوپ‌ها برای ردیابی استفاده شده است

ردیف	نام سد یا پروژه	محل تحقیق	ایزوتوپ مورد استفاده به عنوان ردیاب	سال مطالعه (میلادی)
۱	سد Srisailam	Andra Pradesh	82 Br	1966
۲	سد Aliyar	Tamil Nadu	82 Br	1966
۳	سد Bhadra	Karnataka	82 Br	1968
۴	سد Supa	Karnataka	82 Br	1968
۵	تونل Hazirabaug	—	82 Br	1970
۶	سد Kadana	Gujarat	82 Br	1973
۷	سد Lakhya	Karnataka	82 Br	1979
۸	کانال Chillahydel	Uttar Pradesh	2H and 18O	1985
۹	سد Poip	Maharashtra	82 Br and HTO	1986
۱۰	Dimbhe	Maharashtra	2H and 18 O	1989
۱۱	Borda	Maharashtra	198 Au	1992
۱۲	Shewata and Thakurwadi	Maharashtra	2 H and 18 O	1995
۱۳	Chaskaman	Maharashtra	82 Br	1997
۱۴	دریاچه Naini	Uttar Pradesh	137 Cs and 210 Pb	1998
۱۵	دریاچه Sathmkotta	Kerala	137 Cs and 210 Pb	2001

۱-۱-۴-۲- سدهای احداثی بر روی رودخانه رد کنیون کریک^۱

سدهای کوچک متعددی در طول رودخانه چشم شکل Red Canyon Creek احداث شده است. این منطقه نیمه خشک در رشته کوه‌های ویند ریور^۲ ایالت وایومینگ واقع شده است. بر طبق نظریه‌ای وجود این سدهای کوچک که عمدتاً با هدف کشاورزی احداث شده‌اند، باعث نفوذ آب مخزن آنها بداخل سازندهای اطراف شده و چم‌های شدیدتری را در طول رودخانه ایجاد کرده است. به منظور بررسی این نظریه ماده ردیاب کلراید به‌داخل یکی از این سدها تزریق شد و در مسیر رودخانه نمونه‌برداری به‌عمل آمد. پس از آنالیز نمونه‌ها و تجزیه و تحلیل نتایج حاصله، وجود جریان‌ات جانبی در بخش‌هایی از این رودخانه به اثبات رسید.

۱-۱-۴-۳- سد پیشنهادی وارفورک^۳

در گزارش شناسایی سایت سد پیشنهادی در ایالت کنتاکی آمریکا استفاده از ردیابی رنگی به منظور تعیین حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی منطقه ضروری اعلام شده است. با توجه به محاسبات بیلان و بازدیدهای میدانی چنین نتیجه‌گیری شده که بخشی از آب رودخانه قبل از محل سد پیشنهادی در تماس با سازندهای آهکی منطقه به داخل این سازندها نفوذ کرده و از طریق چشمه‌های پایین دست خارج می‌شود. بنابراین در گزارش شناسایی محل سد، استفاده از ردیابی رنگی جهت ادامه مطالعات اکیدا توصیه شده است.

۱-۱-۴-۴- سد خاکی سندانگ^۴

این سد در جنوب غربی کره جنوبی واقع شده است. مطالعات ردیابی رنگی، ایزوتوپ‌های رادیواکتیو و غیر رادیواکتیو بر روی مخزن و تکیه‌گاه‌ها و بدنه سد توسط Sjostrom و Hotch Kiss در سال ۱۹۹۶ میلادی انجام گردید و الگوی حرکت آب در داخل سازندها و بدنه سد مشخص شد. همچنین با استفاده از مطالعات هیدروژئولوژی و ژئوفیزیک مسیر نشت از بدنه این سد مورد بررسی قرار گرفت.

۱-۱-۴-۵- سد تنگاب

این سد در نزدیکی شهرستان فیروزآباد استان فارس احداث خواهد شد. در مطالعات این سد که توسط دانشگاه شیراز صورت گرفت پس از ۱۷ ماه نمونه‌برداری روزانه از منابع آب مختلف تاقدیس کارستی پودنو، سامانه جریان آب به‌صورت افشان - مجرای تشخیص داده شد. سپس به منظور بررسی دقیق پتانسیل آب‌بندی سد دو مرحله ردیابی رنگی در منطقه صورت گرفت. یکی در تکیه‌گاه راست با استفاده از ماده رنگی اورانین که نتایج حاصل از مطالعات هیدروژئولوژی را تایید کرد و دیگری در تکیه‌گاه چپ با استفاده از ماده رنگی رودامین - بی که وجود سامانه مجرای در محل سد را تشخیص داد.

1- Red Canyon Creek
2- Wind River
3- WAR FORK
4- Sandong

۱-۱-۴-۶- سد سیمره

این سد بر روی رودخانه سیمره یکی از سرشاخه‌های رودخانه کرخه در ۳۰ کیلومتری شهرستان دره‌شهر در استان ایلام احداث شده است. در مطالعات آب‌بندی این سد نیز دو مرحله ردیابی رنگی انجام شد. با توجه به فرارگیری سازند گچساران بر روی سازند آسماری و همچنین رخنمون وسیع سازند گچساران در مخزن سد وضعیت آب‌بندی سد مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی خاصیت آب‌بندی سازند گچساران از ماده رنگی اورانین استفاده گردید و رفتار دوگانه این سازند در سطح و در عمق مورد بررسی قرار گرفت. همچنین با تزریق ماده رنگی رودامین - بی وضعیت هیدروژئولوژی سازند آسماری مورد مطالعه قرار گرفت و مدل حرکت آب در این سازند مورد تحلیل قرار گرفت.

۱-۱-۴-۷- تونل کوه‌رنگ

تونل سوم کوه‌رنگ به طول تقریبی ۲۳ کیلومتر جهت انتقال آب سرشاخه‌های کارون به زاینده‌رود در حال احداث می‌باشد. در مسیر عبور این تونل از سازندهای کارستی منطقه، حجم عظیمی از آب‌های زیرزمینی موجود در این سازندها به داخل تونل نفوذ کرده و امکان هرگونه فعالیتی را مختل نمود. بنابراین به منظور شناخت هیدروژئولوژی کارست منطقه دو مرحله عملیات ردیابی توسط دانشگاه شیراز صورت گرفت. مواد ردیابی رنگی شامل اورانین و رودامین-بی بود که به داخل فروچاله‌های منطقه تزریق شد و با نمونه‌برداری مستمر و تجزیه و تحلیل نتایج حاصله، الگوی هیدروژئولوژی کارست مورد تحلیل قرار گرفت.

با توجه به کاربرد روش‌های مختلف در بررسی نشت و فرار آب در پروژه‌های مختلف موجود در جهان و ایران به نظر می‌رسد که استفاده از ردیاب‌ها خصوصاً ردیاب‌های رنگی نسبت به سایر روش‌ها متداول‌تر بوده و با توجه به خصوصیات مناسب این‌گونه ردیاب‌ها از قبیل قابلیت تشخیص زیاد، سمی نبودن، انحلال بالا در آب و سهولت کاربرد، از آنها پس از انجام مطالعات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی به کرات در پروژه‌های مختلف استفاده شده است. به همین جهت استفاده از روش‌های ردیابی جهت بررسی پتانسیل آب‌بندی، خصوصاً در کشورهایی که پروژه‌های سدسازی آنها به‌طور عمده در مناطق کارستی متمرکز بوده، یک روش پذیرفته شده و مرسوم می‌باشد. در کشور ایران با توجه به تمرکز عمده فعالیت‌های سدسازی در دو رشته‌کوه البرز و زاگرس با رخنمون نسبی سازندهای کارستی، استفاده از روش‌های ردیابی در بررسی پتانسیل آب‌بندی سدها پس از انجام مطالعات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی موفقیت بیشتری داشته است. از این‌رو در این راهنما کاربرد این روش‌ها به تفصیل ارائه شده است.

۱-۱-۴-۸- سد لار

سد مخزنی لار در ۹۷ کیلومتری شمال شرقی تهران واقع شده است. این سد به منظور تامین بخشی از آب شرب تهران احداث شده است. از لحاظ ساختار زمین‌شناسی منطقه با مشکلات متعددی همراه است که مساله فرار آب از دریاچه سد به ویژه در تکیه‌گاه راست و ایجاد فروچاله‌ها یا حفره‌های کارستی در کف دریاچه از بارزترین آنها می‌باشد. با انجام مطالعات در این زمینه مشخص گردید که فرار آب از دریاچه سد عمدتاً از طریق مجاری و حفرات کارستی موجود در سنگ‌های آهکی گستره فوق صورت گرفته که از یک طرف باعث نفوذ آب به بخش‌های زیرزمینی و خارج شدن آن از چشمه‌های گلوگاه در دره هراز شده است و از سویی مشکلاتی را در پایداری سد ایجاد کرده است.

۱-۱-۴-۹- سد میرزای شیرازی (کوار)

سد مخزنی میرزای شیرازی که با ارتفاع ۶۵ متر بر روی رودخانه قره آغاج ساخته خواهد شد، در فاصله ۷۰ کیلومتری جنوب شیراز قرار دارد. نوع سد، سنگریزه‌ای با رویه بتنی است طول تاج ۲۳۲/۸ متر، عرض آن ۷ متر و حجم مخزن ۲۵۰ میلیون متر مکعب می‌باشد. انحلال‌پذیری سنگ‌های کربناته و سولفات‌ها در پی سد سبب توسعه ترک‌ها و شکاف‌ها شده و با افزایش نفوذپذیری پی می‌تواند موجبات نشست و تخریب سازه هیدرولیکی را فراهم کند. مشکل فرار آب از سد لار در شمال شرق تهران که با وجود حدود چهار سال عملیات بهسازی هنوز ادامه دارد، نگرانی‌های موجود در ارتباط با آب بندی سد مارون در شمال بهبهان و موضوع تراوش غیر مجاز آب از بازوی راست سد ۱۵ خرداد در جنوب شرقی هم پس از آب‌گیری مخزن سد در سال ۱۳۷۳ اهمیت موضوع را روشن تر می‌کند. در محل سد کوار توده سنگ‌های آهکی سازند آسماری تکیه‌گاه راست و قسمت عمده پی سد را تشکیل می‌دهند سازند مارنی رازک که به شدت خرد شده و حاوی نهشته‌های گچ است، سازنده تکیه‌گاه چپ و بخشی از پی می‌باشد. نوع کارست با توجه ساختار تکتونیکی منطقه ژئوسکلینالی است. بر اساس نتایج حاصل از حفاری‌های اکتشافی کارستی شدن نسبت به عمق افزایش ندارد. شرایط هیدرودینامیکی نشان می‌دهد که نوع دره کارستی کوار، تراوش بیرونی است. آب بندی پی سد و مخزن عمدتاً از طریق جدا کردن آب دریاچه از بستر نفوذپذیر به وسیله کف پوش سیلتی - رسی و شاتکریت صورت می‌گیرد. یک پرده تزریق با طول محدود و عمق متوسط و یک دیوار آب بند در زیر تکیه‌گاه رویه بتنی به عنوان آب بندهای حمایتی (فرعی) در نظر گرفته شده است. به منظور تامین ایمنی بیش‌تر سازه ایجاد یک ذخیره گچ در بالا دست دیواره آب بند در نهشته‌های سازند رازک با هدف اشباع کردن آب نشستی پیش‌بینی شده تا از تسریع در انحلال گچ موجود جلوگیری به‌عمل آید.

۱-۱-۴-۱۰- سد مارون (بهبهان)

سد مارون بر روی رودخانه مارون در فاصله ۱۹ کیلومتری شمال شرق بهبهان احداث شده است. این سد از نوع سنگریزه‌ای شنی با هسته رسی می‌باشد و هدف از اجرای آن تأمین آب مورد نیاز کشاورزی جهت آبیاری حدود ۵۵۰۰۰ هکتار از طریق تنظیم جریان آب رودخانه مارون و همچنین کنترل سیلاب و بهره‌گیری جهت تولید انرژی برق‌آبی است. مشکل فرار آب از سد لار در شمال شرق تهران که با وجود حدود چهار سال عملیات بهسازی هنوز ادامه دارد، نگرانی‌های موجود در ارتباط با آب بندی سد مارون در شمال بهبهان را زیاده‌تر کرده است.

۱-۱-۴-۱۱- سد پانزده خرداد (دلیجان)

سد پانزده خرداد از نوع خاکی غیرهمگن با هسته رسی با حداکثر ارتفاع از کف رودخانه ۳۰/۵۴ متر در پنج کیلومتر شمال شرقی دلیجان در استان مرکزی ساخته شده است. تراوش غیر مجاز آب از بازوی راست سد ۱۵ خرداد در جنوب شرقی پس از آب‌گیری مخزن سد در سال ۱۳۷۳ نگرانی‌هایی را درخصوص فرار آب از این سد و افزایش آن در آینده ایجاد نموده است. لازم به ذکر است که برای مطالعه بیش‌تر درباره سدهای ایران می‌توان به سایت کمیته ملی سدهای بزرگ ایران مراجعه نمود.

فصل ۲

مطالعات زمین شناسی

۱-۲- بازدید صحرایی و سنجش‌های میدانی

اگرچه زمین‌شناسان امروزی روزبه‌روز به دفترها، آزمایشگاه‌ها و رایانه‌ها وابسته‌تر می‌شوند ولی هنوز هم برای جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات لیتولوژیکی، ساختاری و ریخت‌شناسی کار صحرایی لازم می‌باشد. فقط با بررسی رخنمون‌ها می‌توان به ویژگی‌های سنگ‌ها پی برد، آنها را اندازه‌گیری نمود و تغییراتشان را در سه بعد بررسی و مطالعه نمود و در نهایت از نتایج این مطالعات در تفسیر اطلاعات به دست آمده از روش‌های ژئوفیزیکی و زیرزمینی استفاده نمود. قبل از آغاز هر کار صحرایی، باید موقعیت محل مورد نظر در روی نقشه زمین‌شناسی منطقه تعیین شود. نقشه‌های زمین‌شناسی و عکس‌های هوایی دقیق برای بیش‌تر نواحی در دسترس هستند اما، اگر در منطقه‌ای قرار است مطالعات انجام گیرد که هیچ‌گونه نقشه زمین‌شناسی وجود ندارد باید ابتدا با نقشه‌برداری صحرایی نقشه زمین‌شناسی محل تهیه شود.

در مطالعات روی زمین، مهم‌ترین ویژگی‌هایی که برداشت می‌شوند شامل ویژگی‌های واحدهای سنگی، ویژگی‌های ساختاری، ویژگی‌های ریخت‌شناسی، و ویژگی‌های نهشته‌های آبرفتی می‌باشند که در زیر شرح داده می‌شوند.

۱-۱-۲- ویژگی‌های واحدهای سنگی

به‌طور کلی واحدهای سنگی تشکیل‌دهنده منطقه در سه گروه سنگ‌های رسوبی، آذرین و دگرگونی قرار می‌گیرند که در زیر نحوه بررسی هر یک به‌طور مجزا شرح داده می‌شوند.

الف- بررسی سنگ‌های رسوبی

ویژگی‌هایی که در بررسی‌های سنگ‌های رسوبی در صحرا به آنها توجه می‌شود، عبارتند از:

- اسم سازند و نام سنگ (مانند سازند سروک، سنگ آهک)
- خصوصیات کلی برونزد (مانند توپوگرافی، حالت بیرون‌زدگی، رنگ و نوع خاک)
- تعیین سن واحد سنگی با نمونه‌برداری‌های فسیلی لازم به ویژه در مرز واحدها
- وضعیت لایه‌بندی، در این خصوص لایه‌های تیغه‌ای^۱، خیلی نازک، نازک، ضخیم، خیلی ضخیم و توده‌ای^۲ مشخص می‌شوند. لایه‌های مذکور به ترتیب سنگ‌هایی با ضخامت کم‌تر از ۱ سانتی‌متر، ۱ تا ۵ سانتی‌متر، ۵ تا ۶۰ سانتی‌متر، ۶۰ تا ۱۲۰ سانتی‌متر، بیش از ۱۲۰ سانتی‌متر و بدون لایه‌بندی می‌باشند.
- شکل واحد سنگی شامل شکل‌های ورقه‌ای، تخته‌ای^۳، منشوری^۴ و بندکشی^۵
- جنس سنگ و خواصی از قبیل نوع سیمان و مقدار آن، رنگ اصلی و هوازده، ساخت و بافت، درجه جورشدگی، اندازه دانه‌ها و شکل آنها، دگرشکلی‌های بعد از تشکیل سنگ، مقدار و توسعه منافذ و تراوایی سنگ

1- Laminum

2- Massive

3- Tabular

4- Prism

5- Shoestring

- مرز واحدهای سنگی شامل مرز هم شیب و مرز ناپیوسته و تقسیم‌بندی‌های جزئی‌تر این مرزها

- فسیل‌های موجود، نوع و پراکندگی آنها

درخصوص ویژگی‌های سنگ‌های رسوبی و ارتباط آنها با پتانسیل گذر و فرار آب موارد زیر ارائه می‌شود:

وضعیت لایه‌بندی می‌تواند در پتانسیل فرار آب نقش مهمی ایفا نماید. معمولاً هرچه لایه‌بندی ضخیم‌تر باشد، احتمال وجود بخش‌های تراوا بیش‌تر است. از میان خصوصیات سنگ‌های رسوبی، مهم‌ترین مشخصه‌هایی که می‌توانند پتانسیل فرار آب را افزایش دهند مشخصه‌هایی از قبیل جنس سنگ، نوع سیمان و مقدار آن، دگرشکلی‌های بعد از تشکیل سنگ و از همه مهم‌تر مقدار و توسعه منافذ و تراوایی سنگ (به ویژه منافذ و تراوایی که به صورت ثانویه بعد از تشکیل سنگ ایجاد می‌شود) است که می‌توانند پتانسیل فرار آب آن واحد سنگی را تعیین نمایند. در مورد مرزهای بین واحدهای سنگی، در صورتی که در یک سوی آن واحد سنگی غیرقابل نفوذ و در سوی دیگر واحد سنگی با قابلیت نفوذ وجود داشته باشد، در چنین مرزهایی به علت تمرکز جریان در بین دو واحد سنگی، پتانسیل فرار آب می‌تواند بالا باشد.

ب- بررسی سنگ‌های آذرین

سنگ‌های آذرین به دو گروه کلی تقسیم می‌شوند، سنگ‌های آذرین بیرونی و سنگ‌های آذرین درونی.

- سنگ‌های آذرین بیرونی

مهم‌ترین ویژگی‌هایی که در مطالعه این گروه از سنگ‌ها باید به آنها توجه نمود عبارتند از:

- خصوصیات کلی برونزد شامل توپوگرافی، حالت برونزد، رنگ و نوع خاک
- جنس سنگ، کانی‌ها، ساخت و بافت آنها و ترکیب شیمیایی برای تعیین نام سنگ
- پیوند سنگ‌ها با واحدهای رسوبی دربرگیرنده و یا مجاور آنها و بررسی دقیق همبری آنها
- نحوه تظاهر و چگونگی به وجود آمدن گدازه‌ها و توف‌ها (دهان‌های، شکافی و ...) و محیط تشکیل آنها (دریایی، قاره‌ای و ...)

- سنگ‌های آذرین درونی

نکات قابل توجه در بررسی این گروه از سنگ‌ها به شرح زیر می‌باشد:

- اسم واحد و نام سنگ
- خصوصیات کلی برونزد شامل توپوگرافی، حالت برونزد، سختی، خاک‌ها و ...
- شکل توده از قبیل باتولیت، دایک، سیل و ... و اندازه‌های آن
- تعیین جنس، ساخت، بافت و تعیین ترکیب آن (اسیدی، متوسط، بازیک و اولترابازیک)
- نوع همبری و اثر ماگما با واحدهای مجاور، تعیین وجود اسکارن و شناسایی هاله‌های ایجادی
- بررسی دگرسانی‌های موجود

- بررسی درون‌گرفته‌ها^۱ و شناخت ماهیت آنها

ج- بررسی سنگ‌های دگرگونی

- در بررسی سنگ‌های دگرگونی، مهم‌ترین مواردی که باید به آنها توجه شود عبارتند از:
- تعیین سنگ اصلی که دگرگون شده و نوع سنگی که حاصل شده است.
 - ساخت و بافت سنگ دگرگونی، بیان ویژگی‌های ماکروسکوپی و نمای دیواری آنها مانند گنیس، شیست و ...
 - تعیین و بررسی فازهای دگرگونی و اثر آنها بر یکدیگر و شناخت شیوه دگرشکلی
 - رخساره‌های به وجود آمده و تعیین زون‌های شکل گرفته و در نواحی دگرگونی

۲-۱-۲- ویژگی‌های ساختاری

- در بررسی‌های صحرایی، مهم‌ترین ویژگی‌های ساختاری که باید مورد توجه قرار گیرند به شرح ذیل می‌باشند:
- تشخیص و بررسی عناصر ساختاری مانند چین‌ها، گسل‌ها و سامانه درزه‌ها
 - بررسی روند غالب در ناحیه و تغییرهای محلی آن و همخوانی محور چین‌ها و جهت نشست آنها
 - شناسایی زون‌های فعال، گسلیده، خرد شده و امکان پیوند آنها با دگرسانی‌ها
 - تشخیص خطواره‌ها^۲ و بالآمدگی‌ها^۳
 - اندازه‌گیری شیب و امتداد سازه‌های ساختاری مانند لایه‌ها، گسل‌ها، سطح محورها، رگه‌ها و درزه‌ها
 - تعیین گسل‌های اصلی و فرعی و نوع گسل‌ها (مانند فشارشی، کششی و ...)
 - تعیین مناطق برشی شده و میلونیتیزه شده
 - تعیین سامانه‌های درزه‌های و جهت غالب آنها و اندازه‌گیری تعداد درزه‌ها در واحد سطح

۲-۱-۳- ویژگی‌های ریخت‌شناسی

- در بازدید صحرایی و سنجش‌های میدانی، ریخت‌های فعلی ناحیه مورد مطالعه و چگونگی تشکیل آنها باید مورد بررسی قرار گیرد. مهم‌ترین نکاتی که در این خصوص باید به آنها توجه نمود، عبارتند از:
- ریخت‌های اصلی و چهره‌ساز ناحیه مانند کوه‌ها و دشت‌ها
 - نقش تکتونیک در ایجاد ریخت‌های اصلی و فرعی مانند دره‌ها، فرونشست‌ها، دریاچه‌ها، تپه‌ها، چشمه‌ها و غیره
 - ریخت‌های فرعی درون کوه‌ها و دشت‌ها مانند انواع دره‌ها و دامنه‌ها، آبشار، چم، دیواره، پادگانه، مخروطه‌افکنه، آبراهه، رودخانه و غیره
 - شناسایی زمین‌لغزه‌ها، سنگ‌لغزه‌ها، ریزش‌ها در صورت وجود

1- Xenoliths
2 - Lineaments
3 - Swells

- شناخت الگوی آبراهه‌ها و بررسی نحوه تشکیل آنها بر اساس لیتولوژی و سطح اساس فرسایش

- شناخت ریخت‌های نهشتی مانند تلماسه‌ها و یخرفت‌ها و ریخت‌های مشابه در صورت وجود ویژگی‌های ریخت شناسی نیز می‌توانند در بررسی پتانسیل گذر و فرار آب مفید باشند. معمولاً در امتداد ریخت‌هایی که در اثر فعالیت‌های تکتونیکی ایجاد شده‌اند، بخش‌های تراوا توسعه پیدا کرده‌اند که می‌توانند پتانسیل فرار آب داشته باشند. در ارتباط با زمین لغزه‌ها و سنگ لغزه‌ها، توده‌های خاک یا سنگی که از توده اصلی جدا شده‌اند. معمولاً بخش‌های تراوا قابل ملاحظه‌ای را شامل می‌شوند و به ویژه مرز این توده‌ها با توده اصلی می‌تواند پتانسیل فرار آب بالایی را شامل شود. بعضی از آبراهه‌هایی براساس لیتولوژی‌های خاصی ایجاد شده‌اند برای مثال در سازندهای کربناته، انحلال این قبیل سنگ‌ها باعث توسعه آبراهه‌های بزرگی می‌شود. سنگ بستر این آبراهه‌ها در بخش‌های زیر سطحی می‌تواند پتانسیل فرار آب بالایی را شامل شود.

۲-۱-۴- ویژگی‌های مربوط به نهشته‌های جوان

لازم به ذکر است که بررسی‌های مربوط به نهشته‌های جوان به گستره مخزن و سد محدود می‌شود، زیرا این نهشته‌ها می‌توانند در رابطه با نشت و فرار آب از مخزن و تکیه‌گاه‌های سد نقش ایفا کنند. مهم‌ترین ویژگی‌هایی که در خصوص نهشته‌های جوان باید مورد توجه قرار گیرند در زیر ارائه شده‌اند:

- نوع نهشته‌های جوان و شناخت چینه‌شناسی آنها
- طبقه‌بندی نهشته‌های جوان از دیدگاه خاستگاه آنها مانند نهشته‌های برجاء، نهشته‌های حمل شده، آبرفت‌ها، بادرفت‌ها و یخرفت‌ها
- تعیین ضخامت آبرفت‌ها
- تعیین بافت و ساخت نهشته‌ها و در نتیجه تعیین تراوایی آنها
- جنس سنگ‌ها و لایه‌هایی که در زیر این نهشته‌ها قرار گرفته‌اند (سنگ بستر). در صورتی که در زیر نهشته‌های جوان سنگ‌های با قابلیت انحلال بالا قرار گرفته باشند که دارای مجاری و حفرات انحلالی‌اند بعد از آبیگری مخزن در این نهشته‌ها فروچاله ایجاد خواهد شد.
- نقش گسل‌ها در تشکیل نهشته‌ها و ضخامت آنها

مهم‌ترین ویژگی‌هایی از نهشته‌های جوان که می‌توانند در ارتباط با پتانسیل گذر و فرار آب حائز اهمیت باشند وجود فروچاله در این نهشته‌ها می‌باشد که دلیل آن وجود سنگ‌های با قابلیت انحلال در زیر این نهشته‌ها می‌باشد. چنانچه در زیر نهشته‌های جوان سنگ‌های با قابلیت انحلال قرار گرفته باشند که دارای مجاری و حفرات انحلالی هستند بعد از آبیگری مخزن در این نهشته‌ها به احتمال زیاد فروچاله ایجاد خواهد شد که می‌تواند باعث فرار آب شود. وجود گسل‌های جوان (گسل‌های کواترنری) در این نهشته‌ها و تراوایی بالا آنها نیز می‌تواند پتانسیل گذر و فرار آب آنها را افزایش دهد.

۲-۲- چگونگی تفکیک سازندها و ویژگی‌های آنها

۱-۲-۲- کلیات

سازند واحد اصلی در طبقه‌بندی واحدهای سنگ چینه‌ای^۱ می‌باشد و به ردیفی از سنگ‌ها گفته می‌شود که مشخصات سنگ‌شناسی شبیه به یکدیگر، موقعیت چینه‌شناسی معین، و محیط رسوبی یکسانی داشته باشند. سازند قابل نمایش در نقشه‌های زمین‌شناسی و قابل تعقیب در زیر زمین می‌باشد. هر سازند مشخصات سنگ‌شناسی خاصی دارد که سبب تفکیک آن از سازندهای بالایی و پایینی می‌شود. مشخصات سنگ‌شناسی شامل ترکیب کانی‌شناسی، ساختار، بافت، محتویات دیرینه‌شناسی و ویژگی‌های ریخت‌شناسی می‌باشد. سنگ‌های تشکیل‌دهنده یک سازند ممکن است منحصرآ رسوبی، ولکانیکی، آذرآواری، دگرگونی و در بعضی از موارد ترکیبی از موارد مذکور باشند. لازم به ذکر است که در کلیه موارد فوق‌الذکر ارتباط سنگ‌های تشکیل‌دهنده مشخص و اصل روی هم قرارگیری طبقات^۲ در مورد آنها صادق می‌باشد.

۲-۲-۲- نحوه تعیین مرز و تفکیک سازندها

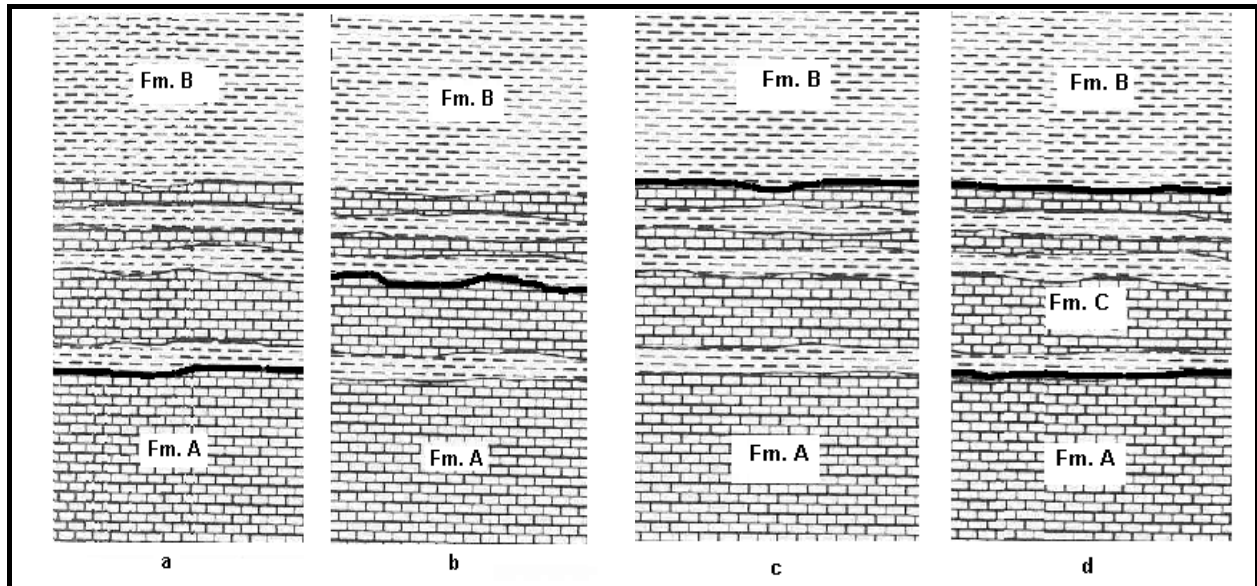
در تعیین مرز سازندها موارد زیر حائز اهمیت می‌باشند:

- هر سازند دارای یک مرز زیرین و یک مرز بالایی است که در محل تغییرات سنگ‌شناسی مشخص واقع می‌شود.
- در مواردی که گذر از یک سازند به سازند دیگر با تغییرات تدریجی همراه باشد (شکل ۲-۱) به عنوان مثال گذر از یک واحد سنگ آهک به واحد شیلی با تناوب شیپ و سنگ آهک همراه باشد، مرز سازند می‌تواند در بالاترین لایه‌های سنگ آهک زون تدریجی قرار گیرد. در بعضی از موارد، زون تدریجی که دارای ضخامت قابل توجهی است که خود می‌تواند به عنوان یک سازند جدید معرفی شود. برخی از زمین‌شناسان ظهور اولین لایه شیلی را در زون تدریجی به عنوان مرز در نظر می‌گیرند. با توجه به موارد فوق‌الذکر، در مواردی که گذر از یک سازند به سازند دیگر با تغییرات تدریجی همراه باشد، تعیین مرز سازندها سلیقه‌ای و اختیاری می‌باشد. البته با عنایت به اینکه در اینجا خواص هیدروژئولوژیکی سازند برای ما حائز اهمیت است، چنانچه زون تدریجی ضخامت قابل توجهی داشته باشد (به عبارت دیگر، در مقیاس مورد نظر قابل نقشه‌برداری باشد) باید آن را به عنوان یک سازند جدید در نظر گرفت. در غیر این صورت باید زون تدریجی (که دارای ضخامت ناچیزی است) را به سازندی نسبت داد که خواص هیدروژئولوژیکی آن با این زون تقریباً مشابه می‌باشد.
- مرزهای یک سازند را نمی‌توان گسل انتخاب نمود و الزاماً با مرزهای زمانی منطبق نمی‌باشند.
- مرزهای سازند را می‌تواند در محل ناپیوستگی‌ها و نبوده‌های چینه‌شناسی انتخاب نمود.
- یک لایه راهنما می‌تواند مرز بالایی و یا زیرین یک سازند باشد. لایه راهنما، لایه‌ای است با ویژگی‌های سنگ‌شناسی مشخص و گسترش جغرافیایی وسیع مانند کوارتزیت راسی در مرز سازندهای لالون و میلا.

1- Lithostratigraphy

2- Superposition Principle

- در صورتی که نبود چینه‌شناسی مشخص و متعلق به یک دور^۱ یا بیش‌تر باشد، این ناپیوستگی به عنوان مرز دو سازند انتخاب می‌شود.



a-d: روش‌های مختلف انتخاب مرزها در یک تغییر انتقالی از یک لیتولوژی (سنگ آهک) به لیتولوژی دیگر (شیل) برای یک توالی عمودی
 a: مرز انتخاب شده در پایین‌ترین رخنمون شیل
 b: مرز انتخاب شده در روی بالاترین واحد آهکی شاخص
 c: مرز انتخاب شده در روی بالاترین واحد آهکی
 d: حذف‌فاصل انتقالی به عنوان یک سازند مجزا تعیین شده است

شکل ۲-۱- تفکیک سازندها در مواردی که گذر از یک سازند به سازند دیگر تدریجی باشد

در بعضی از موارد یک سازند از نظر سنگ‌شناسی قابل تقسیم به بخش‌های مختلف می‌باشد. هر بخش از نظر سنگ‌شناسی دارای ویژگی‌هایی است که آن را از سایر قسمت‌های سازند متمایز می‌سازد، به عنوان مثال سازند میلا در زون البرز بر اساس مشخصات سنگ‌شناسی به بخش‌های مختلف تقسیم شده است. بخش اول آن دولومیتی، بخش دوم آهک و شیل‌های نازک لایه و بخش سوم آن آهک‌های ضخیم لایه درشت بلور، بخش چهارم آن سیلتسئون، ماسه سنگ و سنگ آهک گلوکونیت‌دار دانه درشت و بخش پنجم آن شیل بدون فسیل و ماسه سنگ و آهک‌های نازک لایه می‌باشد.

۲-۲-۳- تفکیک سازندها در شرایط خاص هیدروژئولوژیکی

در بعضی از موارد سازندهایی وجود دارند که از نظر سنگ‌شناسی شبیه به یکدیگر می‌باشند و تفکیک آنها در صحرا به راحتی امکان‌پذیر نمی‌باشد و منحصر با استفاده از شواهد دیرینه‌شناسی از یکدیگر تفکیک می‌شوند. به عنوان مثال آهک‌های کرتاسه و آهک‌های لار (ژوراسیک بالایی) در البرز شرقی را می‌توان ذکر کرد. این دو سازند از نظر سنگ‌شناسی با یکدیگر مشابه می‌باشند به طوری که هر دو از آهک‌های ضخیم لایه روشن رنگ و چرت‌دار تشکیل شده‌اند. مثال دیگر، سازندهای پایده و گورپی در زاگرس

است که هر دو شامل شیل و مارن هستند. در چنین مواردی با توجه به یکسان بودن خواص هیدروژئولوژیکی این قبیل سازندها، نیازی به تفکیک آنها وجود ندارد.

در بعضی از موارد، در یک سازند با خصوصیات سنگ‌شناسی نسبتاً یکنواخت، خصوصیات ساختاری و هیدروژئولوژیکی ممکن است به‌طور قابل توجهی متفاوت باشد. برای مثال در یک سازند با جنس سنگ آهک ممکن است در بخشی از آن تراکم درزه‌ها و یا دیگر شکستگی‌ها (مانند گسل‌ها) بسیار بالا و در بخش‌های دیگر اندک باشد. در چنین موارد خصوصیات هیدروژئولوژیکی بخش‌های فوق‌الذکر به‌طور قابل توجهی با یکدیگر متفاوت می‌باشند. بنابراین اگرچه خصوصیات سنگ‌شناسی سازند یکسان است ولی برای اهداف هیدروژئولوژیکی لازم است که این قسمت‌های مختلف تفکیک شوند.

۲-۲-۴- تفکیک سازندها در جهت عمودی

در مطالعات هیدروژئولوژیکی نه تنها تفکیک سازندها در جهت جانبی مهم است بلکه به لحاظ تفاوت در خصوصیات هیدروژئولوژیکی سازندهای مختلف که بر روی هم قرار گرفته‌اند، تفکیک سازندها در جهت عمودی هم حائز اهمیت می‌باشد. به منظور تفکیک سازندها در جهت عمودی باید از برش‌های زمین‌شناسی (نیمرخ‌های زمین‌شناسی) استفاده نمود. از اهداف اصلی تهیه برش‌های زمین‌شناسی، نمایش رابطه و ضخامت واحدهای سنگی و نمایش اشکال ساختمانی می‌باشد.

۲-۳- بررسی گسل‌ها، شکستگی‌ها، خطواره‌ها و سامانه درزه و شکاف‌ها

خصوصیات ساختاری شامل یک مجموعه‌ای از متغیرهای وابسته به هم می‌باشد. در مقیاس بزرگ، ممکن است سنگ‌ها به صورت مسطح، چین‌خورده، گسل خورده از انواع و درجات متفاوت و بسیاری از الگوهای پیچیده دیگر، باشند. در مقیاس کوچک، تراکم درزه‌ها و شکستگی‌ها، اندازه طولی آنها و جهت‌یابی آنها در تعیین مسیرهای اصلی حرکت آب‌های زیرزمینی و الگوی توسعه غار و کانال‌های زیرزمینی، حایز اهمیت می‌باشد.

به‌طور کلی گسلا، درزه‌ها و خطواره‌ها سه گروه مهم از عناصر ساختاری می‌باشند که به‌طور مختصر توضیح داده می‌شوند.

۲-۳-۱- گسل‌ها

گسل از عناصر ساختاری صفحه‌ای می‌باشد و به هرگونه شکستگی^۱ که در امتداد آن جابه‌جایی صورت گرفته باشد، اطلاق می‌شود. گسل‌ها سطوح ضعف در سنگ‌ها بوده که آب را به آسانی در آنها جریان یافته و انحلال افزایش پیدا می‌کند. در مناطقی که دو یا چند گسل یکدیگر را قطع می‌کنند و یا به یکدیگر می‌رسند، معمولاً فصل مشترک این سطوح گسلی برای انتقال آب بسیار مستعد می‌باشد. در بعضی از موارد این سطوح گسلی توسط رسوبات ثانویه مسدود می‌شوند که این وضعیت نسبتاً نادر است و به شرایط زمین‌شناسی گذشته مربوط می‌شود.

گسل‌های به عنوان سطوح ضعف در سنگ‌ها، از یک سو مکان‌های مناسبی را برای حرکت و انتقال سیالات فراهم نموده و از سوی دیگر در شرایط مناسب از تنش با فعالیت مجدد خطرات تخریب سازه‌های آبی را فراهم می‌آورند از این رو برای جانمایی و طراحی سازه‌های آبی مطالعه کمی و کیفی این ساختار حائز اهمیت است. معمولاً توسعه و فعالیت گسل‌ها در شرایط سطحی منجر به تشکیل زونی شدیداً تغییر ساختاری یافته می‌شود که به زون گسل موسوم است. یک زون گسلی از دو بخش مختلف تشکیل شده است. این بخش‌ها عبارتند از:

– هسته گسل^۱

بخشی از زون گسلی که بیش‌ترین جابه‌جایی در این بخش صورت گرفته است. سطوح آینه گسلی در این بخش قرار دارند. معمولاً در این بخش سنگ‌ها به فرم گوه‌های غنی از رس دیده می‌شوند. این بخش به دلیل اندازه بسیار ریز سنگ‌های گسلی (گوه‌ها) تراوایی اندک داشته و سدی در مقابل جریان سیال هستند.

– منطقه تخریب

در این بخش که در مجاورت هسته قرار دارد سنگ‌ها به شدت خرد شده و شکستگی‌های فراوانی در آنها ایجاد شده است. این زون بخش تراوایی زون گسلی را تشکیل می‌دهد. بنابراین نسبت میان پهنای این دو بخش می‌تواند فاکتوری موثر در تعیین تراوایی زون گسلی باشد. این نسبت که به اندیس معماری زون گسل معروف است از تقسیم پهنای زون تخریب به پهنای کل زون گسلی به دست می‌آید بین صفر و یک تغییر می‌کند. مقدار یک معرف بیش‌ترین تراوایی و مقدار صفر بیانگر عدم وجود تراوایی در زون گسلی است.

۲-۳-۲- درزه‌ها

درزه‌ها از عناصر ساختاری صفحه‌ای هستند و به شکستگی‌هایی اطلاق می‌شوند که در امتداد آنها جابه‌جایی صورت نگرفته باشد. درزه‌ها نیز مشابه گسل‌ها از سطوح وضعی هستند که نتیجه تغییر ساختاری سنگ‌ها در قبال تنش‌های وارده بر آنها هستند. درزه‌ها بر اساس نحوه تشکیل به درزه‌های تکتونیکی (درزه‌های کششی، برشی مزدوج و برشی هیبرید و استیلولیت‌ها) و غیرتکتونیکی (درزه‌های ستونی در گدازه‌ها و درزه‌های اکسفولیشن در توده‌های نفوذی) قابل تقسیم هستند. علاوه بر این، درزه‌ها از نظر هندسی به انواع سیستماتیک و غیر سیستماتیک تقسیم می‌شوند. انواع سیستماتیک قابل تقسیم به دسته‌جات درزه‌ها می‌باشند. هر دسته درزه از درزه‌هایی با ویژگی‌های هندسی مشابه تشکیل شده‌اند. درزه‌ها صرف‌نظر از چگونگی تشکیل و ویژگی‌های ساختاری متفاوت، از این حیث که یک پارچگی سنگ‌ها را تخریب نموده و مکان مناسبی را جهت جریان سیالات در سنگ‌ها فراهم می‌آورند در مطالعات مهندسی مورد توجه هستند. روند عمومی، میزان بازشدگی، نوع مواد پرکننده درزه‌ها و فراوانی درزه‌ها مواردی هستند که در این نوع بررسی‌ها حائز اهمیت هستند.

فرآیند کارستی شدن نتیجه نفوذ آب به داخل توده سنگی تراوا و با قابلیت انحلال می‌باشد. در کنار انحلال‌پذیری، تراوایی نیز عامل مهمی است و عامل اصلی تراوایی در سنگ‌های کربناته، پدیده ترک‌خوردگی است. سنگ‌های آهکی و دولومیتی خیلی شکننده‌اند. به ویژه اگر ضخیم لایه و توده‌ای باشند. فعالیت‌های تکتونیکی شدید، سامانه درزه و شکستگی وسیعی ایجاد می‌کنند. این درزه‌ها باعث انتقال آب به بخش‌های عمیق‌تر توده سنگ می‌شوند. ایجاد درزه‌ها و شکستگی‌ها اعم از افقی و عمودی در سنگ‌های با قابلیت انحلال در اثر عملکرد فرآیندهای تکتونیکی، مهم‌ترین عامل در ایجاد مجاری کوچک و بزرگ انحلالی در این قبیل سنگ‌ها است.

در فرآیند کارستی شدن، درزه‌های کششی که به وسیله تنش‌های کششی ایجاد می‌شوند، مهم‌ترین سامانه درزه‌های را تشکیل می‌دهند. این سامانه درزه‌های در طاق‌دیس‌ها و بخش‌های پایینی ناودیس‌ها تشکیل می‌شوند. در خلال چین‌خوردگی، تحت تاثیر تنش‌های برشی قوی، صفحات لایه‌بندی در برابر تغییر شکل نمی‌توانند مقاومت کنند و در نتیجه درزه‌ها در جهت لایه‌بندی حاصل می‌شوند. این درزه‌ها در فرآیند کارستی شدن نقش مهمی را ایفا می‌کنند. درزه‌هایی رهایی در صفحات عمود بر محور بزرگ‌ترین تنش فشارشی ایجاد می‌شوند و این درزه‌ها نیز در توسعه کارست نقش مهمی دارند. ترک‌های سطحی که نتیجه فرایندهای برون‌زادی^۱ هستند نیز در پدیده کارستی شدن حایز اهمیت هستند. این ترک‌ها به همراه درزه‌های رهایی، یک شبکه وسیعی از بازشدگی‌ها را شامل می‌شوند که آب را به درزه‌های پایینی و از آنجا به بخش‌های عمیق‌تر سنگ کربناته می‌رساند. حرکت آب در داخل همه درزه‌های فوق‌الذکر، به وسیله نیروی ثقل انجام می‌شود. سرعت و مقدار آب جریان یافته به داخل درزه‌ها، به اندازه آنها و درجه اتصالات داخلی آنها وابسته است.

۲-۳-۳- خطواره‌ها

خطواره‌ها سطوحی تقریباً عمودی هستند که هوازدگی، تخلخل و نفوذپذیری آنها در مقایسه با سنگ‌های مجاور بالاتر است. مناطقی که تخلخل و تراوایی آنها ۱۰ تا ۱۰۰۰ بار بزرگ‌تر از سنگ‌های مجاور بوده و محل مناسبی برای فرار آب از زیر سدها، مخازن و لاگون‌ها می‌باشند. در این مناطق تخلخل و نفوذپذیری ثانویه غالب است. از نشانه‌های خطواره‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

افتادگی و فرورفتگی‌های خطی در سطح زمین، قطع‌شدگی ستیغ‌ها، تغییرات رنگ خاک که بیانگر تغییرات در رطوبت خاک است، چشمه‌ها، نواحی تراوشی و آبگیرهای خطی، پوشش‌های گیاهی ردیف شده در یک خط، تغییرات ناگهانی در راستای دره‌ها و توسعه دره‌های خندقی شکل، این ریخت‌های سطحی به آشکارسازی زون‌های تمرکز درزه‌ها و شکستگی‌ها در توده‌های سنگی کمک می‌کنند حتی هنگامی که به وسیله مواد هوازده و خاک‌های با ضخامت نسبتاً زیاد تا حدود ۱۰۰ متر پوشیده شده باشند.

خطواره‌های بر اساس طولشان به دو گروه تقسیم می‌شوند. گروه اول، خطواره‌هایی هستند که طول آنها کم‌تر از ۱/۵ کیلومتر است. این خطواره‌ها در روی عکس‌های هوایی قابل رؤیت هستند و عمدتاً مربوط به زون‌های تقریباً عمودی تمرکز درزه‌ها و شکستگی‌ها هستند. گروه دوم، خطواره‌هایی هستند که طول آنها از ۱/۵ کیلومتر تا حدود ۱۵۰ کیلومتر می‌باشد. این خطواره‌ها غالباً

در نقشه‌های پلان مستقیم هستند و تحت تاثیر توپوگرافی قرار نگرفته‌اند و از این رو به عنوان نشانه‌هایی از زون‌های تجمع درزه‌ها و شکستگی‌ها عمودی و تقریباً عمودی قلمداد می‌شوند.

۲-۴- نحوه تحلیل سامانه درزه‌ها و گسل‌ها در گستره مخزن و سد

اگرچه بررسی درزه‌ها و گسل‌ها هم در گستره مخزن سد (محدوده‌ای که غرقابی می‌شود) و هم در خارج از گستره مخزن (بالا تر از محدوده‌ای که غرقابی می‌شود) ممکن است انجام شود، اما ذکر این نکته ضروری است که به لحاظ بررسی نشت و فرار آب از مخزن و تکیه‌گاه‌های سد که موضوع اصلی تهیه این راهنما می‌باشد، بررسی درزه‌ها و گسل‌ها در گستره مخزن و سد از حساسیت بالایی برخوردار است و درخصوص محدوده بالاتر از منطقه غرقابی، بررسی جزئیات مربوط به درزه‌ها و گسل‌ها ضروری نیست. به منظور بررسی درزه‌ها و گسل‌ها در محدوده غرقابی، مطالعات و اندازه‌گیری‌های زیر انجام خواهد شد.

۲-۴-۱- تحلیل گسل‌ها

به منظور تحلیل گسل‌های منطقه در محدوده‌ای که غرقابی می‌شود، انجام مراحل زیر ضروری است.

الف- شناسایی گسل‌ها

در این مرحله ابتدا با مطالعه عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای و به‌کارگیری فاکتورهای شناسایی نظیر رلیف پایین، جابه‌جایی عوارض، پرتگاه‌های گسلی و خط گسلی، رویش‌های خطی و مواردی از این قبیل گسل‌ها شناسایی و با مطالعه صحرایی نوع آنها تعیین می‌شوند.

ب- تعیین روند عمومی

برای تعیین روند عمومی گسل‌ها می‌توان با رده‌بندی امتداد گسل‌ها و رسم فراوانی هر دسته در مقابل امتداد آن به فرم دیاگرام گل سرخی و یا هیستوگرام روند غالب گسل‌ها را تعیین نمود. ذکر این نکته لازم است که استفاده از روش‌های فوق مشروط است به این‌که مقدار شیب گسل‌ها بیش از ۸۰ درجه باشد، در غیر این صورت باید از رسم استریوگرام و کنتورزنی داده‌ها استفاده نمود.

ج- تعیین روند گسل‌ها با طول‌های مختلف

تعیین روند طویل‌ترین گسل‌ها از نکات مهمی است که باید به آن توجه نمود. از این رو با اندازه‌گیری طول و امتداد گسل‌ها برروی عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای با مقیاس مشخص، ابتدا گسل‌ها را به دسته‌جات طولی متفاوت (برای مثال ۵۰-۱۰۰، ۱۰۰-۱۵۰، ۱۵۰-۲۰۰ متر و به همین ترتیب) تقسیم و برای هر دسته یک هیستوگرام یا استریوگرام و یا نمودار گل سرخی ترسیم می‌شود. تحلیل نمودارها موقعیت عام گسل‌ها را با طول‌های مشخص نشان می‌دهند.

د- بررسی زون‌های گسلی

در این مرحله جهت تعیین میزان تراوایی زون گسلی به بررسی سنگ‌های گسلی در هسته گسل و زون تخریب پرداخته و با تعیین پهنای هسته و زون تخریب و اندیس معماری زون گسل، می‌توان میزان تراوایی را برای هر یک از گسل‌ها و با تعیین میانگین مقادیر برای گسل‌های یک منطقه تراوایی ناشی از گسل را در یک منطقه ارزیابی نمود.

ه- تحلیل اطلاعات

در این مرحله با بررسی روند عمومی گسل‌ها و نیز ویژگی زون‌های گسلی می‌توان میزان تراوایی و نیز جهتی که سیالات به صورت متمرکز حرکت می‌کنند را تعیین نمود.

۲-۴-۲- تحلیل سامانه درزه‌ها

به منظور تحلیل سامانه درزه‌ها در محدوده‌ای که غرقایی می‌شود، انجام مراحل زیر ضروری است.

الف- تعیین ایستگاه مطالعه

معمولا درزه‌ها در یک منطقه را در چندین مکان مورد مطالعه قرار می‌دهند به هر یک از این مکان‌ها یک ایستگاه مطالعه گفته می‌شود. برای هر ایستگاه یک شعاع مطالعه در نظر گرفته می‌شود. تعداد ایستگاه‌ها و نیز وسعت آنها وابسته به تعداد، فراوانی و فاصله درزه‌ها دارد.

ب- اندازه‌گیری‌های مورد نیاز

در هر ایستگاه دسته‌جات درزه‌ها مشخص شده و برای هر دسته درزه مواردی نظیر امتداد شیب درزه‌ها، فاصله تکرار درزه‌ها در هر دسته درزه، نوع درزه‌ها، میزان بازشدگی و نوع مواد پرکننده درزه‌ها تعیین و ثبت می‌شوند. علاوه بر این میزان فراوانی درزه‌ها را با نسبت مجموع طول درزه‌ها در هر ایستگاه به مساحت آن تعیین می‌نمایند از بعد فرکتال آرایش درزه‌ها در هر ایستگاه که به روش Box counting قابل اندازه‌گیری است به عنوان نشانگر میزان گسترش سطحی درزه‌ها کمک گرفت.

ج- تعیین روند دسته‌جات درزه

با رسم نمودار گل سرخی یا هیستوگرام (در صورتی که شیب درزه‌ها بیش از ۸۰ درجه باشد) و یا رسم استریوگرام روند دسته‌جات درزه تعیین می‌شود.

د- تحلیل داده‌ها

با تحلیل داده‌ها می‌توان دسته‌جات موثر در نشست و انتقال آب را مشخص نمود. علاوه بر این با اندازه‌گیری‌های بیش‌تر در نقاط مختلف تعیین پارامترهای کمی نظیر بعد فرکتال و یا فراوانی درزه‌ها مقادیر حاصل را به منظور تعیین مناطق خطر بر روی نقشه ثبت و یا کنتور زنی نمود (نقشه تغییرات بعد فرکتال و یا تغییرات فراوانی درزه‌ها).

فصل ۳

بررسی امور اکتشافی

۳-۱- بررسی اکتشافات ژئوفیزیکی

۳-۱-۱- مقدمه

پس از به کارگیری روش‌های سنجش از دور، کارهای اکتشافی جزئی‌تر در مناطق مختلف امکان‌پذیر می‌باشد. روش‌های ژئوفیزیکی سطحی و زیرسطحی می‌توانند خصوصیات متفاوت بافت سازندهای سخت را تعیین کنند و در بسیاری از موارد در تعیین محل حفاری‌ها کمک فراوانی نمایند. همچنین در بررسی فرار آب از سدها استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی در تعیین عمق سنگ کف، بررسی زون‌های خرد شده، بررسی سطح آب در سازندها و آبرفت و تعیین مناطق با پتانسیل فرار آب جهت حفاری‌های اکتشافی بسیار سودمند می‌باشد.

۳-۱-۲- ماتریکس سازندهای سخت

به‌طور کلی ماتریکس سازندهای سخت شکسته نشده از نظر الکتریکی از کانی‌های غیررسانا از قبیل کوارتز و فلدسپات تشکیل شده است. اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های چنین سنگ‌های آتشفشانی مقاومت‌های چندین هزار اهم متر را نشان می‌دهد. حضور مقدار کمی رس یا شکستگی‌های پر از آب به جریان الکتریکی اجازه عبور می‌دهد و باعث کاهش شدید مقاومت خواهد شد. سرعت امواج لرزه‌ای نیز در سنگ بسترهای شکسته نشده بالا می‌باشد و معمولاً در حدود ۴۰۰۰ تا ۷۰۰۰ متر بر ثانیه می‌باشد. این خواص به‌طور واضحی در زون‌های هوازده متفاوت خواهد بود به‌طوری‌که با استفاده از تکنیک‌های ژئوفیزیکی به راحتی می‌توان عمق و وضعیت سنگ بستر را مشخص نمود.

۳-۱-۳- شکستگی‌ها

یک شکستگی بزرگ اشباع از آب در یک ماتریکس سازند سخت را می‌توان به راحتی از روی مقاومت پایین، دانسیته کم و سرعت امواج لرزه‌ای پایین‌تر شناسایی نمود. اگر چه در صورت قرارگیری چنین شکستگی در یک بستر هوازده با ضخامت چندین برابر آن شکستگی، اکثر تکنیک‌های ژئوفیزیکی قابلیت تفکیک بالایی نخواهند داشت. در حالی‌که اگر شکستگی در دانسیته کافی و در یک حجم وسیع قرار بگیرد، باعث تغییر خواص سنگ‌ها خواهد شد و با استفاده از تکنیک‌های ژئوفیزیکی می‌توان ابعاد و خواص مواد شکستگی را اندازه‌گیری نمود. خواص سنگ بستر شکسته به ندرت متغیر می‌باشد به‌طوری‌که از محدوده سنگ بستر غیرشکسته تا منطقه هوازده متغیر خواهد بود.

۳-۱-۴- منطقه هوازده

یکی از خصوصیت‌های برجسته هوازدهی سنگ‌ها، کانی‌های رسی هستند که آثار ژئوفیزیکی بارز و مشخصی از خود نشان می‌دهند. در شکستگی‌های پر از آب خواص الکتریکی زون‌های هوازده به شدت تحت تاثیر وجود رس می‌باشد به‌طوری‌که محدوده مقاومت‌ها از حدود کم‌تر از ۵۰ اهم متر (غنی از رس) تا چند صد اهم متر متفاوت می‌باشد. در واقع مقدار مقاومت هیچ حد مشخصی ندارد و تابعی از درجه هوازدهی است. تغییرات سرعت امواج لرزه‌ای و دانسته زون‌های هوازده نیز بیش‌تر به تراکم مواد بستگی دارد که خود وابسته به درجه هوازدهی است و تاکنون مقادیر مختلفی گزارش شده است.

معمولا تغییرات شرایط از اشباع به غیراشباع در اعماق تاثیر مشخصی بر روی خواص زیرسطحی می‌گذارند زون‌های هوازده غیراشباع دارای مقاومت بالا، دانستیه کم و سرعت لرزه‌ای کم می‌باشد. هنگامی که سطح ایستایی به‌طور واضحی مشخص شد، تفاوت در خواص فیزیکی ممکن است به قدری قوی باشد که اثر دیگر لایه‌های عمیق‌تر را بپوشاند.

۳-۱-۵- فلسفه اکتشافات ژئوفیزیکی

اکتشافات ژئوفیزیکی باید بخشی از اکتشافات آب‌های زیرزمینی یا خط‌مشی مدیریت آن باشد. ابتدا باید هیدروژئولوژی عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای به دقت مطالعه شود سپس مناسب‌ترین روش ژئوفیزیکی به کار گرفته شود. ممکن است استفاده از یک روش برای برآورده کردن منظور خاصی مناسب باشد در حالی که استفاده از همان روش اهداف دیگر را برآورده ننماید.

روش‌های ژئوفیزیکی متعددی در مطالعه آب‌های زیرزمینی سازندهای سخت به کار گرفته می‌شوند. این روش‌ها شامل امواج انکساری، مغناطیسی‌سنجی، الکترومغناطیس، ثقل‌سنجی و مقاومت می‌شوند. به هر حال روش‌های الکتریکی به ویژه مقاومت سنجی از جمله مفیدترین روش‌ها هستند به دلیل اینکه نخست این روش اغلب پاسخ قوی در شرایط زیر سطحی می‌دهد و همچنین در به‌کارگیری روشی مقرون به صرفه محسوب می‌شوند. امروزه به‌کارگیری ترکیبی از روش‌های مختلف مثل سونداژهای مقاومت‌سنجی با الکترومغناطیس نیز کاربرد وسیعی پیدا کرده و مفید می‌باشد.

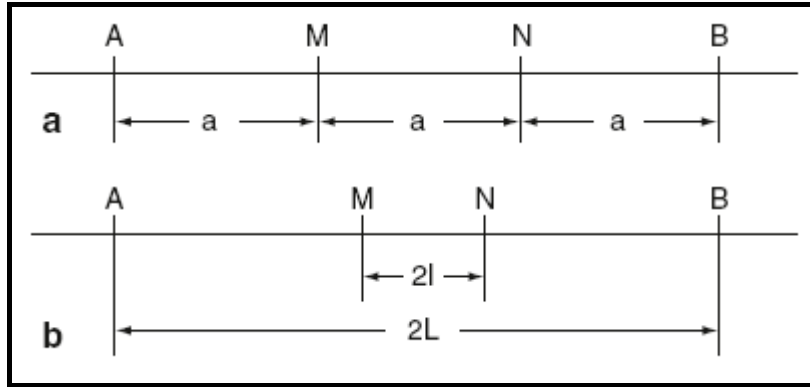
در این بخش اصول پایه‌ای تکنیک‌های مختلف و به ویژه استفاده از آنها در مطالعات هیدروژئولوژی ارائه شده است. برخی از روش‌ها از قبیل ژئورادار و امواج انعکاسی که در مطالعات آب‌های زیرزمینی در مناطق سازند سخت ژئوترمال به کار گرفته می‌شوند و در مطالعات سازندهای سخت در مناطق خشک و نیمه خشک کاربرد چندانی ندارند، توصیف نشده‌اند. روش‌های لوگ‌برداری گمانه‌ها که شامل اندازه‌گیری خواص فیزیکی در اعماق می‌باشند به‌طور خلاصه ارائه شده است. با استفاده از این روش‌ها اطلاعات دقیق‌تری در مورد اعماق به دست می‌آید.

۳-۱-۶- روش مقاومت الکتریکی

۳-۱-۶-۱- مقدمه

اصول این روش بر مبنای اندازه‌گیری مقاومت مواد زیر سطحی می‌باشد. سنگ‌های مختلف مقاومت‌های مختلفی از خود نشان می‌دهند. با استفاده از اندازه‌گیری مقاومت می‌توان انواع سنگ‌ها، گسترش هوازدگی یا اشباع بودن از آب را تشخیص داد. مبنای روش پیمایش مقاومت، اندازه‌گیری مقاومت با عبور جریان I با فرکانس پایین با استفاده از دو الکتروود فلزی و اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل V مابین دو الکتروود است، اندازه‌گیری مقاومت به تنهایی اطلاعات کمی از خواص زیرسطحی به ما می‌دهد. نسبت ولتاژ به جریان به کار رفته، مقاومت اندازه‌گیری شده نامیده می‌شود. اندازه‌گیری مقاومت به تنهایی اطلاعات زیادی به ما نمی‌دهد به دلیل اینکه مقدار آن به شدت به هندسه الکتروودها بستگی دارد. به منظور به دست آوردن مقاومت زیرسطحی در محدوده الکتروودها،

مقاومت باید در ضریب هندسه که به ترتیب الکترودها بستگی دارد ضرب شود. ترتیب قرارگیری الکترودها آرایش نامیده می‌شود. دو نوع آرایش ونر^۱ و شلومبرژه^۲ معمول‌ترین آرایش‌ها هستند (شکل ۱-۳).



شکل ۱-۳- نمودار شماتیک آرایشهای ژئوفیزیکی (a) آرایش ونر و (b) آرایش شلومبرژه

الف- آرایش ونر

در این آرایش فاصله الکترودها مساوی است و مقاومت از فرمول زیر دست می‌آید:

$$\rho_a = 2\pi a R \quad (1-3)$$

$2\pi a$ فاکتور هندسه است و a فاصله بین الکترودهای هم جوار است به هر حال در حالت واقعی مقاومت اندازه‌گیری شده میانگین وزنی از مقاومت مواد زمین است بنابراین مقاومت ظاهری نامیده می‌شود (ρ_a).

ب- آرایش شلومبرژه

در این آرایش فاصله بین الکترودهای پتانسیل در مقایسه با الکترودهای جریان بسیار کم‌تر است و مقاومت ظاهری در این روش از فرمول زیر محاسبه می‌شود.

$$\rho_a = \pi R.L \frac{2}{4} b \quad (2-3)$$

L فاصله بین الکترودهای جریان، b فاصله الکترودهای پتانسیل است.

۱-۳-۲-۶-۲- عمق پیمایش

مقاومت اندازه‌گیری شده تحت تاثیر مواد مختلف در یک محدوده‌ای از عمق است. اگر چه نمی‌توان عمق واحدی را به مقاومت اندازه‌گیری شده نسبت داد، تجربیات نشان می‌دهد که عمق میانه یک عمق بهینه است. به هر حال اطلاعات بیش‌تری از اعماق بیش‌تر به دست خواهد آمد و گاهی اوقات هنگامی که تنها ۱۰٪ از سیگنال‌ها تولید شده‌اند در نظر گرفتن مقدار حداکثر عمق موثر، مفید خواهد بود. به بیان دیگر این محدودیت عملی، عمق مطالعه ما را تعریف می‌کند. این مقادیر برای دو آرایش مذکور در جدول (۱-۳) ارائه شده است (AB فاصله دو الکترودها است).

1- Wenner

2- Schlumberger

جدول ۳-۱- مقادیر حداکثر عمق موثر پیمایش و عمق میانه پیمایش برای دو آرایش

عمق میانه پیمایش	حداکثر عمق موثر پیمایش	آرایش
0.17 AB	0.44 AB	ونر
0.19 AB	0.46 AB	شلومبرژه

۳-۱-۶-۳- سونداژ عمودی ژئوالکترونیک

با افزایش فاصله الکترودها عمق نفوذ جریان بیش‌تر شده و اطلاعاتی از ساختمان زمین‌شناسی منطقه به ما می‌دهد.

- سونداژ ونر

این روش یک تکنیک مفید و آسان محسوب می‌شود که تمام ۴ الکترودها بعد از هر اندازه‌گیری مقاومت حرکت داده می‌شوند. یکی از معایب این روش این است که الکترودها نسبت به تغییرات مقاومت نزدیک سطحی (حضور تخته سنگ، بلوک‌های لاتریتی، خندق‌های نزدیک به الکترودها) به ندرت حساس هستند و اطلاعات دچار خطا می‌شوند. بارکر^۱ در سال ۱۹۸۱ این مشکل را با اندازه‌گیری ۵ الکترودها حل کرد. به طوری که یک‌بار با استفاده از ۴ الکترودها سمت چپ و بار دیگر با استفاده از ۴ الکترودها سمت راست اندازه‌گیری را انجام داد سپس از این دو مقدار متوسط گرفت که نتایج قابل قبولی به دست آمد. در عمل به کارگیری یک الکترودها اضافی، چندان مشکل نخواهد بود به طوری که می‌توان این الکترودها اضافی را در مرکز ۴ الکترودها دیگر قرار داد.

- سونداژ شلومبرژه

از این آرایش نیز به طور گسترده‌ای در سراسر جهان برای اندازه‌گیری مقاومت استفاده می‌شود. اگرچه در اصول تفاوت‌های اندکی با روش ونر دارد در عمل کاملاً متفاوت است. در روش شلومبرژه الکترودهای جریان، دایم در حال جابجایی هستند در حالیکه الکترودهای پتانسیل این‌چنین نیستند. مقاومت‌های اندازه‌گیری شده معمولاً در مقابل فاصله $AB/2$ بر روی کاغذ تمام لگاریتمی ترسیم می‌شود. به منظور تفسیر، یک منحنی ملایم از بین نقاط دو قطعه منحنی عبور داده می‌شود. به منظور کاهش اختلاف‌های بین خطوط موجود و منحنی‌های داده شده به کم‌تر از ۵٪، فاصله MN باید کم‌تر از $AB/5$ شود. به طور کلی با استفاده از این روش می‌توان تاثیر تغییرات مقاومت ظاهری جانبی را حذف نمود.

۳-۱-۶-۴- نکات عملی به کارگیری سونداژها

- مقاومت کنتاکت‌ها

یکی از مهم‌ترین نکاتی که اغلب در به دست آوردن داده‌های ضعیف نادیده گرفته می‌شود، تماس ضعیف در الکترودهاست. ولتاژی که به کار گرفته می‌شود بین مقاومت‌های مختلفی به شرح زیر توزیع می‌شود:

- مقاومت کابل‌ها
- مقاومت زمین

• مقاومت بین هر الکتروود با زمین

به منظور کاهش این نوع مقاومت‌ها اغلب به کارگیری مقداری آب توصیه می‌شود. حتی در شرایط سخت‌تر آب شور و گاهی چندین الکتروود در کنار هم مورد استفاده قرار می‌گیرد. البته باید پذیرفت که در برخی از موارد در شرایط صحرائی به کارگیری آب شور اطراف یک الکتروود، به سادگی یک الکتروود بسیار بزرگی را در زیر سطح زمین تداعی می‌کند که در زمین مواردی استفاده از روش‌های دیگر نیز کمک خواهد کرد.

- عمق الکتروودها

در الکتروودهای با فاصله کم باید به خاطر داشت که قراردادن الکتروودها در اعماق زیاد داده‌های نامعتبری را به دست می‌دهند. از نظر تئوری الکتروودها باید کنتاکت نقطه‌ای داشته باشند. در صورتی که عمق الکتروودها کم‌تر از ۱۰ درصد فاصله AB باشد، خطای این منبع حداقل خواهد بود.

- بازبینی صحرائی

گاهی اوقات باید کل سامانه مورد بازبینی قرار گیرد. یک بازبینی صحرائی ساده، آزمون متقابل نامیده می‌شود. هنگام استفاده از مجموعه ۴ الکتروودی این ممکن است که الکتروودهای جریان و پتانسیل جابجا شود و همان مقاومت اندازه‌گیری شود. بنابراین در آرایش ونر یا شلومبرژه مقاومت اندازه‌گیری شده با آرایش AMNB، با یک خطای مشاهده‌ای مساوی با مقاومت اندازه‌گیری شده با آرایش MABN خواهد بود. قانون متقابل برای هر شرایط زمین‌شناسی و هر فاصله‌ای یکسان است.

۳-۱-۶-۵- تفسیر منحنی‌های سونداژ

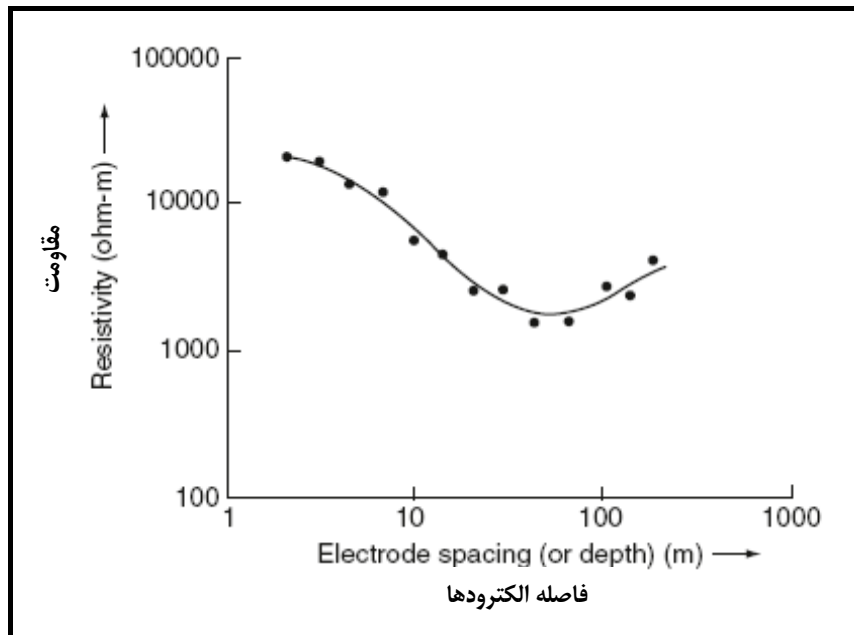
ساده‌ترین روش صحیح تفسیر منحنی‌های سونداژ، انطباق مجموع منحنی‌ها است. منحنی اندازه‌گیری شده در صحرا با یک سری منحنی‌های تئوری مقایسه می‌شود تا اینکه یکی از آنها بیش‌ترین انطباق را داشته باشد. بدین ترتیب اعماق و مقاومت‌ها را می‌توان از روی منحنی تئوری قرائت نمود. این روش در مسایل دو، سه و یا چهار لایه قابل کاربرد است. از جمله معایب این روش، زمان‌بر بودن آن است. به هر حال این روش خطاهای خاص خود را دارد. امروزه نرم‌افزارهای کامپیوتری جدید و ارزانی در دسترس هستند که به ما اجازه می‌دهند با استفاده از آنها با یک راندمان بسیار خوبی منحنی‌ها را تفسیر نماییم. اگرچه بزرگ‌ترین خطری که ما را در این راه تهدید می‌کند، پذیرش بی‌چون و چرای نتایج حاصله است. هر کجا که این روش‌ها به کار گرفته می‌شود مشکلاتی از قبیل معادل گرفتن^۱ و ناپدید شدن^۲ دیده می‌شود.

- معادل‌گیری

به‌طور کلی هر منحنی را می‌توان با محدوده وسیعی از مدل‌ها معادل گرفت که در آن مقاومت و ضخامت لایه‌های با مقاومت پایین می‌تواند به شدت تغییر کند. شکل (۳-۲) یک منحنی سونداژ ثبت شده بر روی یک منطقه نمونه سازند سخت را نشان می‌دهد.

1- Equivalence

2- Suppression



شکل ۳-۲- منحنی سونداژ یک منطقه نمونه سازند سخت و احتمال خطای معادل‌گیری

در این منطقه سنگ کف بلوری با یک منطقه هوازده پوشیده شده که در قسمت پایین‌تر آن قسمت اشباع از آب قرار گرفته است. این منحنی به‌طور نمونه از سه قسمت تشکیل شده است و بدین‌گونه تفسیر می‌شود که ۳ متر رگولیت غیراشباع ($LPI = 400\text{cm}$) که بر روی ۲۰ متر رگولیت اشباع قرار گرفته ($\rho_2 = 70 \Omega\text{m}$) که همه این لایه‌ها بر روی سنگ کف با مقاومت بسیار بالا ($\rho_3 \gg 1000 \Omega\text{m}$) قرار گرفته است. در این مورد، ممکن است که در تفسیر کردن لایه با مقاومت پایین با یک لایه با ضخامت متفاوت اشتباه گرفته شود. این می‌تواند اتفاق بیافتد در صورتی که نسبت ضخامت لایه به مقاومتش ثابت باشد. در مثال فوق، تفسیر دیگر ممکن است شامل یک لایه دوم با ضخامت ۱۰ متر و مقاومت ۳۵ اهم متر باشد. مسایل معادل‌گیری مهم‌ترین منشا ابهام در منحنی‌های سونداژ سازندهای سخت هستند و می‌توانند محدودیت‌های جدی را برای تفسیر کمی نتایج ایجاد کنند. به هر حال باید این نکته را در نظر گرفت که نسبت h^2/ρ_2 می‌تواند دقیقاً مشخص شود و این اغلب به‌طور مستقیم با مقاومت آبخوان اشباع ارتباط دارد.

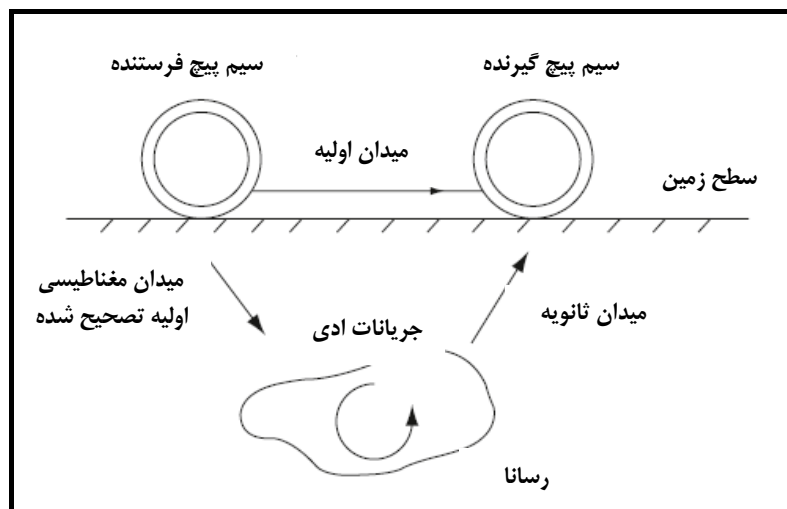
نرم افزارهای جدید کامپیوتری مدل‌های متنوعی از مقاومت‌های معادل را ارائه می‌کند که با پذیرش محدوده‌ای از خطا قابل قبول خواهد بود.

- ناپدید شدن

تشخیص وجود لایه با مقاومت معین در بین لایه‌های بالا و پایین از روی شکل منحنی سونداژ واضح نیست، حتی اگر آن لایه ضخامت قابل توجهی داشته باشد. در سونداژهای مناطق سازند سخت، زون شکسته در زیر زون هوازده و بالای سنگ بستر سالم دارای مقاومت بینابین دیگر لایه‌ها هستند که در منحنی سونداژ نشان داده نمی‌شوند بنابراین قابل تشخیص نیستند، به این حالت ناپدید شدن گفته می‌شود.

۳-۱-۸-۱-۳ اسلینگرام^۱

در این روش یک سیم پیچ فرستنده که با یک جریان متناوب تغذیه می‌شود، روی سطح زمین قرار می‌گیرد و یک سیم پیچ گیرنده در فاصله کمی دورتر قرار داده می‌شود. میدان مغناطیسی حاصل از جریان متناوب سیم پیچ فرستنده، جریانی را در زمین ایجاد می‌کند (شکل ۳-۳). این جریانات یک میدان مغناطیسی ثانویه را تولید می‌کند که با استفاده از سیم پیچ گیرنده دریافت می‌شود. شکل پاسخ دریافت شده تابعی از هندسه سامانه و طبیعت زمین است. پیمایش با این روش با حرکت تجهیزات با هندسه ثابت در طول یک خط و اندازه‌گیری در فواصل مساوی و نامناسب انجام می‌شود. سیم پیچ‌ها با یک کابل به طول مخصوصی به هم متصل می‌شوند. سیم پیچ گیرنده، میدان مغناطیسی حاصله را در دو مولفه عمود بر هم اندازه‌گیری می‌کند.



شکل ۳-۳- نمودار شماتیک روش اسلینگرام

- عمق بررسی‌ها

عمق بررسی‌ها با استفاده از فاصله بین سیم پیچ‌ها تعیین می‌شود که می‌تواند در حدود ۱/۲ این فاصله باشد که از چندین ده متر تا صدها متر متغیر خواهد بود. محدودیتی که برای عمق نفوذ در این روش وجود دارد تمایل انرژی با فرکانس بالا به ایجاد اعوجاج در نزدیکی سطح زمین است. فرکانس‌های بالاتر، اثر قوی‌تری دارند، درحالی‌که نفوذ به اعماق بیش‌تر با استفاده از فرکانس‌های پایین‌تر میسر خواهد بود. عمق اکتشاف تقریباً دو سوم عمق Skin است که تابعی از مقاومت زیرسطحی است (جدول ۳-۲).

جدول ۳-۲- عمق اکتشاف SEM در HZ ۵۰۰۰

عمق اکتشاف (m)	مقاومت (اهم متر)
۱۵	۱۰
۲۶	۳۰
۴۷	۱۰۰
۸۲	۳۰۰
۱۵۰	۱۰۰۰
۲۶۰	۳۰۰۰

$$\text{Skin عمق} = 500 \sqrt{\frac{R}{F}} \quad (۳-۳)$$

جایی که R مقاومت (برحسب اهم متر) و F فرکانس برحسب اهم متر) می باشد.

۳-۱-۸-۲- پیمایش هدایت الکتریکی زمین

اگر روش‌های اسلینگرام در اکتشافات معدنی کاربرد وسیعی دارد ولی این گونه روش‌های چندان مورد استقبال هیدروژئوموژیت‌ها قرار نگرفته‌اند. به هر حال توسعه این روش به منظور فراهم کردن یک اندازه‌گیری مستقیم از هدایت زمین اخیراً متداول شده است. سنجیده‌های هدایت الکترومغناطیس زمین، سامانه‌های اسلینگرام هستند. که در فرکانس پایین کار می‌کنند. هدایت‌سنج‌های زمین می‌توانند هم به صورت افقی و هم به صورت عمودی (دایپل) به کار بروند و هر کدام با عمق پاسخ متفاوتی می‌دهند.

الف- حالت سیم‌پیچ افقی

در اندازه‌گیری‌ها با سیم‌پیچ‌های افقی ممکن است، اغتشاش قابل توجهی دیده شود مگر اینکه توجه ویژه به آن داشت. در این حالت اندازه‌گیری‌ها به خطاهای قرارگیری بسیار حساس هستند. به هر حال در حالت سیم‌پیچ افقی پاسخ به لایه‌های بسیار نزدیک به سطح زمین کاهش پیدا می‌کند و نسبت به ساختارهای عمیق شیب‌دار پاسخ می‌دهند. این حالت ممکن است برای تشخیص گسل‌ها و زون‌های شکسته در زیر لایه‌ها به کار رود.

ب- حالت سیم‌پیچ عمودی

در اندازه‌گیری با سیم‌پیچ عمودی بیش‌تر، داده‌های بدون اغتشاش تولید می‌شود. قرار دادن سیم‌پیچ‌ها ساده‌تر است این روش به نحوه قرارگیری چندان حساس نیست. این اندازه‌گیری‌ها به تغییرات نزدیک سطح حساس‌تر و نسبت به تغییرات عمودی کم‌تر حساس هستند. این حالت ممکن است در فراهم کردن مقادیر صحیح هدایت برای اندازه‌گیری تغییرات ضخامت در یک منطقه به خصوص استفاده شود.

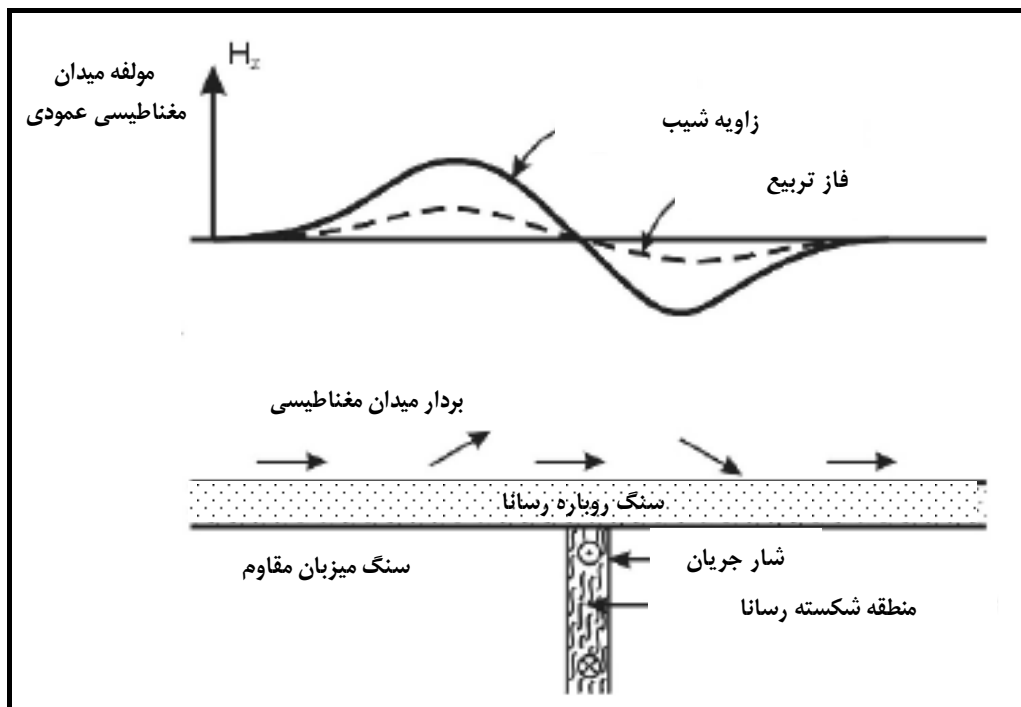
اندازه‌گیری‌های هدایت زمین به‌طور گسترده‌ای در مطالعات آب‌های زیرزمینی به کار می‌رود. در مناطق کریستالیزه به منظور پیمایش سریع و با هدف تعیین محل زون‌های گسلی یا زون‌های هوازده ضخیم‌تر از اندازه‌گیری‌های هدایت زمین استفاده می‌شود. در صورتی که پیمایش مشابهی با بیش از یک سیم‌پیچ در جهت‌های مختلف انجام شود، اطلاعاتی از لایه‌ها و شیب زون‌های شکسته به دست می‌آید.

روش‌های الکترومغناطیسی در ترکیب با سونداژهای مقاومت در گمانه‌های مناطق سازند سخت به کار گرفته می‌شود. پیمایش‌های الکترومغناطیسی با یک سیم‌پیچ جداگانه برای تعیین محل سریع و موثر زون‌های شکسته متغیر است در صورتی که سونداژهای مقاومت اطلاعاتی از مقادیر کمی از لایه‌ها را در اختیار ما می‌گذارد، بنابراین بدین ترتیب بسیاری از ابهامات ناشی از وجود رس‌های سطحی و زون‌های ضخیم هوازده را می‌توان برطرف نمود. داده‌های الکترومغناطیسی را می‌توان با استفاده از نرم‌افزارها یا مدل‌های جدید لایه‌بندی مقاومت نیز تفسیر کرد.

۳-۱-۹- سامانه‌های VLF

این سامانه‌ها از یک فرستنده رادیویی راه دور برای ایجاد میدان الکتریکی و مغناطیسی استفاده می‌کنند. بنابراین به منظور اندازه‌گیری پاسخ‌های حاصل از تغییرات زمین‌شناسی حمل کردن یک سیم پیچ دریافت کننده کوچک ضروری است. معمولاً تجهیزات در دسترس در باند ۱۵ تا ۲۵ (فرکانس بسیار پایین) عمل می‌کنند. در برخی از فواصل از فرستنده، میدان القایی ایجاد شده به نحوی عمل می‌کند که یک مولفه میدان الکتریکی عمودی و یک مولفه میدان مغناطیسی افقی خواهد داشت و هر کدام عمود بر جهت القا هستند. مولفه میدان الکتریکی افقی کوچکی موازی با جهت القا نیز وجود خواهد داشت.

همین‌طور که انرژی در زون‌های رسانا القا می‌شود، تغییرات میدان مغناطیسی محلی از نظر بزرگی و شیب تغییر می‌کند. در واقع مولفه میدان مغناطیسی عمودی محلی چیزی است که معمولاً در پیمایش‌های VLF اندازه‌گیری می‌شود. در شکل (۳-۴) یک نمونه از پاسخ در زون‌های شکسته دیده می‌شود. ثبت و اندازه‌گیری داده‌ها با استفاده از کامپیوتر در سامانه‌های تجاری این روش را تبدیل به یک روش آسان و ارزان نموده است.



شکل ۳-۴- بررسی اثر گسل با استفاده از روش VLF

این سامانه در سطوح با مقاومت بالا به خوبی کار می‌کند اما در محیط‌های با مقاومت پایین روش VLF عمق نفوذ کمی دارد زیرا اندازه‌گیری‌ها در فرکانس‌های نسبتاً بالا انجام می‌شود، بنابراین عمق نفوذ کمی خواهد داشت. پاسخ تجهیزات به مقدار زیادی به جهت فرستنده وابسته است و قوی‌ترین پاسخ زمانی اتفاق می‌افتد که جهت امتداد زون شکسته به طرف فرستنده باشد و پروفیل عمود بر این جهت اندازه‌گیری می‌شود. روش VLF ممکن است با پیمایش‌های هوایی نیز انجام شود. اگر چه ممکن است کمی گران‌تر باشد ولی در مقیاس وسیع مقرون به صرفه خواهد بود.

۳-۱-۱۰- روش مقاومت VLF

اندازه‌گیری میدان الکتریکی افقی می‌تواند با قرار دادن مقداری از طول کابل در داخل زمین در جهت فرستنده انجام شود. همچنین فاصله بین میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی اندازه‌گیری شود. مقاومت ظاهری از این روش با استفاده از فرمول زیر قابل محاسبه است:

$$\rho_a = \frac{1}{\mu_w} (IEI/1H1)^2 \quad (۳-۴)$$

$$E1 \text{ \textbackslash} = \text{مقدار بزرگی میدان الکتریکی افقی}$$

$$H1 \text{ \textbackslash} = \text{مقدار بزرگی میدان مغناطیسی افقی}$$

$$\mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \text{ نفوذپذیری فضای آزاد}$$

$$w = 2\pi f, \text{ و } f \text{ فرکانس بر حسب هرتز}$$

این روش برای سنجش سریع مقاومت با استفاده از دو نفر مفید است. این روش به تغییرات نزدیک سطح زمین حساس است و باید در نقاطی به کار گرفته شود که سیگنال فرستنده قوی باشد.

۳-۱-۱۱- سامانه‌های الکترومغناطیس تدریجی^۱ (TEM)

در این گونه سامانه‌ها یک حلقه انعطاف‌پذیر سیمی بر روی سطح زمین قرار داده می‌شود و برای چند ثانیه با استفاده از یک جریان ثابت مستقیم به آن انرژی داده می‌شود. هنگامی که جریان قطع می‌شود، جریان‌های ادی^۲ در داخل زمین القا می‌شود. میدان مغناطیسی حاصله در سیم‌پیچ ثانویه روی سطح زمین قابل ثبت است. نتایج این بررسی‌ها در، اعماق چند ۱۰۰ متر تا کم‌تر از ۲۰ متر قابل بررسی است. مزایای استفاده از این روش این است که عمق بررسی‌ها با اندازه حلقه نسبت دارد (بر خلاف روش‌های دیگر مقاومت سنجی که طول کابل ممکن است چند برابر عمق بررسی‌ها باشد). در این روش، مشکلاتی از قبیل مقدار دقت و مشابهت‌هایی که ممکن است به وجود آید نیز مشابه دیگر روش‌های مقاومت سنجی دیده می‌شود. تجهیزات تجاری این روش بسیار گران است و به همین دلیل چندان متداول نیست.

۳-۱-۱۲- روش‌های لرزه‌ای

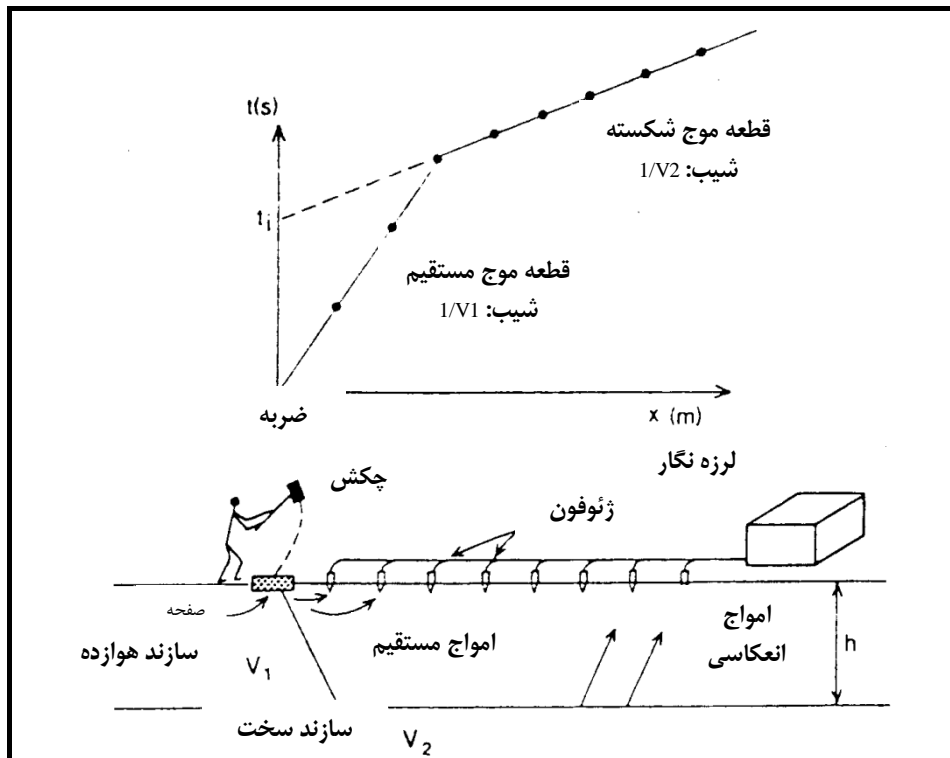
۳-۱-۱۲-۱- مقدمه

در روش لرزه‌ای انکساری یک پالس الاستیک^۳ در سطح زمین ایجاد می‌شود (شکل ۳-۵). مقداری از انرژی ساطع شده در طول مرزها شکسته شده و به سطح زمین بازگشت می‌نماید و با یک ردیف ردیاب (لرزه‌نگار یا ژئوفون) ثبت می‌شود. زمان طی شده بین ضربه و دریافت اولین امواج انرژی شکسته شده دریافتی توسط ژئوفون‌ها بر روی یک نمودار فاصله - زمان ترسیم می‌شود و بدین ترتیب اطلاعاتی از اعماق افق شکسته شده و سرعت امواج در لایه‌های زیرین به دست می‌آید.

1- Transient

2- Eddy

3- Shot



شکل ۳-۵- روش لرزه نگاری انکساری و نمودار زمان-فاصله

در پیمایش‌های مقیاس کوچک ممکن است از یک چکش یا وزنه استفاده شود اما محدوده عملکرد آنها به خصوص در شرایط خشک و ناپیوسته سطح زمین محدود است. اعماق بیش از ۱۵ متر باید با منبع انفجاری مورد بررسی قرار گیرد. لرزه‌نگارها به یک کابل چند کاناله متصل می‌شود و سیگنال‌ها را به تجهیزات ثابت منتقل می‌کنند. انرژی وارد شده می‌تواند به دو شکل در داخل توده سنگ حرکت کند. یکی امواج تراکمی P که با حرکت ذرات در جهت حرکت موج ضربه موازی است و دیگری امواج برشی S که در جهت عمود بر لرزش ذرات و در جهت القا حرکت می‌کنند. اگر چه تجهیزات لرزه‌نگاری جدید قادر است به اندازه‌گیری صحیح زمان حرکت امواج برشی هستند، ولی هنوز استفاده از این امکان در هیدروژئولوژی کم است و این امواج تراکمی هستند که معمولاً در پیمایش‌های لرزه‌ای انکساری اندازه‌گیری می‌شوند. به‌طور کلی هر چه سنگ‌ها متراکم‌تر باشند، سرعت امواج لرزه‌ای در آنها بیش‌تر است. معمولاً سرعت امواج تراکمی سنگ‌ها با افزایش عواملی چون عمق، سن زمین‌شناسی، تراکم، اشباع شدن و سیمانی شدن زیاد می‌شود. مقدار سرعت امواج لرزه‌ای P در گرانیت هوازده بین ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ متر بر ثانیه است در حالی‌که در گرانیت غیر هوازده سرعت امواج در حدود ۴۰۰۰ تا ۶۰۰۰ متر بر ثانیه است.

۳-۱-۲- نمودارهای زمان عبور امواج

در یک محیط همگن t زمان اولین رسیدن موج به یک ژئوفن G در فاصله X از منبع S است که به سادگی از فرمول $t=x/v$ به دست می‌آید. v سرعت موج تراکمی است بنابراین ترسیم t در مقابل X برای یک سری ژئوفن در طول سطح خطی است و با یک شیب $v/1$ از منبع عبور می‌کند. جدول (۳-۳) محدوده امواج لرزه‌ای را برای سازندهای مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۳-۳- محدوده امواج لرزه‌ای برای سازندهای مختلف

جنس مواد	سرعت (m/s)
خاک خشک	۳۰۰-۴۰۰
سازندهای هوازده غیراشباع	۴۰۰-۱۶۰۰
سازندهای هوازده اشباع	۱۶۰۰-۳۰۰۰
سازندهای سخت شکسته	۳۰۰۰-۵۰۰۰
سازندهای سخت غیر شکسته	۵۰۰۰-۶۰۰۰

استفاده از روش لرزه‌ای انکساری در ردیابی شکستگی‌های جدا و منفرد بندرت موفق است در سازندهای سخت پیمایش‌های لرزه‌ای انکساری ممکن است برای تعیین شکستگی‌ها و درزه‌های مهم به کار گرفته شود. جهت سرعت حداکثر، جهت شکستگی را نشان می‌دهد. متاسفانه با توجه به معایب این روش شامل هزینه زیاد، راندمان پایین و مشکلات استفاده از مواد منفجره استفاده از آن چندان متداول نیست.

۳-۱-۱۳- مغناطیس سنجی

در این روش تغییرات میدان مغناطیس زمین حاصل از حضور سنگ‌های مغناطیسی در نزدیکی سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود. تغییرات خواص مغناطیس سازندهای زمین‌شناسی به مقدار زیادی به حضور کانی‌های مغناطیسی وابسته است. با توجه به عدم وجود کانی‌های مغناطیسی در سنگ‌های آذرین و سنگ‌های گرانیتی این روش ابزار قدرتمندی جهت تشخیص توده‌های نفوذی محسوب می‌شود. اندازه‌گیری‌های دقیق میدان مغناطیسی زمین با استفاده از تجهیزات قابل حمل از قبیل پروتون یا مغناطیس سنج انجام می‌شود. با توجه به تغییرات روزانه میدان مغناطیسی زمین به مقدار O نانو تسلا مغناطیس سنج‌های جدید با دقت یک نانو تسلا قادر به اندازه‌گیری میدان مغناطیسی هستند، که شامل مقدار اندازه‌گیری‌ها در یک ایستگاه مبنا و نقاط مرجع پراکنده که به عنوان نقاط تصحیح در نظر گرفته می‌شود می‌باشد. ایستگاه مبنا در ابتدا و انتها هر پیمایش اندازه‌گیری می‌شود و برای هر نقطه در طول پیمایش اختلافات اندازه‌گیری می‌شود. به منظور افزایش دقت داده‌ها، اندازه‌گیری‌های ایستگاه مبنا باید در زمان‌های معینی مثلاً هر یک ساعت یکبار انجام شود. شکل ناهنجاری مشاهده شده به دو عامل عرض جغرافیایی و تجهیزات مورد استفاده بستگی دارد که ممکن است مجموع میدان مغناطیسی یا مولفه عمودی آن را اندازه‌گیری نماید. با توجه به این که به‌طور کلی سنگ‌های رسوبی فاقد خاصیت مغناطیسی هستند، در بررسی‌های هیدروژئولوژی استفاده از مغناطیس سنجی کاربرد چندانی ندارد. همچنین اکثر آبخوان‌های موجود در سازندهای سخت گرانیتی نیز فاقد خاصیت مغناطیسی هستند. تغییرات مغناطیسی مورد استفاده در اکتشافات بسیار ناچیز هستند. تنها استثنا در مواردی است که سنگ‌ها و توده‌های نفوذی حاوی مقدار زیادی آهن باشند. در آبخوان‌های سازند سخت دایک‌های نفوذی عمدتاً به سه دلیل مورد توجه هستند:

- اغلب در زون‌های شکسته وارد شده‌اند بنابراین چاه‌های موجود در این مناطق آب‌دهی خوبی دارند.
- آنها ممکن است در مرز بین زون‌های شکسته قرار داشته باشند که چاه‌های نزدیک آنها آب‌دهی خوبی خواهند داشت.
- دایک‌های نفوذی ممکن است به عنوان سد هیدروژئولوژی عمل کند، بنابراین در تعیین محل چاه‌ها در این مناطق باید دقت بیش‌تری نمود.

۳-۱-۱۴- ثقل‌سنجی

در این روش مقدار تغییرات جاذبه ثقلی زمین اندازه‌گیری می‌شود که در اثر چگالی سازندهای نزدیک سطح تغییر می‌کند. در ثقل‌سنجی از یک دستگاه که فنر بسیار حساسی دارد، استفاده می‌شود. معمولاً اندازه‌گیری‌ها باید نسبت به یک ایستگاه مبنا انجام شود و برای هر اندازه‌گیری ارتفاع نقطه و عرض جغرافیایی به دقت تعیین شود. نیروی جاذبه ثقل در هر نقطه از سطح زمین بستگی به عوامل متعددی دارد و اثرات زمین‌شناسی یکی از آنهاست. به منظور بررسی‌های زمین‌شناسی باید اثرات سایر عوامل تصحیح شود. استفاده از روش ثقل‌سنجی در مناطقی که سنگ کف بسیار عمیق است و از سایر روش‌ها نمی‌توان استفاده کرد بسیار مفید است. این روش هزینه زیادی دارد به دلیل این که باید با نقشه‌برداری توپوگرافی و یا حتی نقشه‌برداری GPS در مقیاس منطقه‌ای همراه باشد. به هر حال این روش در اندازه‌گیری ضخامت رسوبات در مقیاس وسیع به کار می‌رود. با استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری جدید می‌توان فرضیات درباره چگالی و تغییرات زیرسطحی آن را بهتر تفسیر نمود.

۳-۱-۱۵- روش‌های بررسی لوگ گمانه‌ها

بررسی لوگ گمانه‌ها شامل اندازه‌گیری پیوسته برخی از خواص فیزیکی در عمق گمانه است که به منظور فراهم کردن اطلاعات جزئی در نقاط حفاری انجام می‌شود و اهداف زیر را دنبال می‌کند:

- تعیین خواص آبخوان‌های مختلف
- طراحی و توسعه دقیق گمانه
- کنترل کردن تفسیرهای حاصل از اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی سطحی

لوگ‌برداری گمانه‌ها در فهم دقیق وضعیت آبخوان بسیار مهم هستند. لوگ گمانه‌ها می‌تواند موثر بودن روش‌های تعیین محل ژئوفیزیکی را ارزیابی کند.

لوگ‌های سازندی به نحوی طراحی شده‌اند که بتواند خواص سازندهایی را که حفاری آنها را قطع می‌کند، اندازه‌گیری کنند. در حالی که لوگ‌های مایع طوری طراحی شده‌اند که خواص آب‌های زیرزمینی و منشا آنها را مطالعه کنند. از این قبیل لوگ‌ها می‌توان لوگ کالیبر را مثال زد که اطلاعاتی مفیدی درباره طبیعت و ساختار گمانه و لوله جدار آن ارائه می‌دهد. کیز^۱ ۱۹۸۹ جزئیات کاربرد بسیاری از لوگ‌ها را ارائه کرده ولی در اینجا فقط روش‌هایی که کاربرد بیشتری در هیدروژئولوژی دارند ارائه می‌شود.

۳-۱-۱۵-۱- اندازه‌گیری‌های الکتریکی (لوگ نرمال)

برخی از لوگ‌های الکتریکی ساده‌ترین و ارزان‌ترین ابزارهای لوگ برداری هستند و برخی دیگر جز پیچیده‌ترین و گران‌ترین روش‌ها هستند. یکی از ساده‌ترین آنها لوگ دو الکترودی یا نرمال است. این لوگ شبیه سونداژهای الکتریکی جهت اندازه‌گیری مقاومت زمین به کار می‌رود. در این روش دو الکتروود به فاصله مساوی در درون گمانه ثابت می‌شوند. فاصله داخل کردن الکتروودها باید به قدری بزرگ باشد تا عمق کافی جهت بررسی سازندهای احاطه کننده گمانه‌ها را تامین نماید. چندین الکتروود ممکن است به یک سامانه چند کابله متصل شوند و با اندازه‌گیری در فواصل مختلف بهترین نتایج استخراج شود. در این لوگ‌ها مقاومت سطحی

افزایش می‌یابد و شکستگی‌های سنگ بستر از نظر مقاومت نقاط اوج کم‌تری را نشان می‌دهند. به‌طور کلی لوگ‌های مقاومت نسبت به سونداژهای سطحی تغییرات بیش‌تری را نشان می‌دهند و این به دلیل اشتباه بودن سونداژها نیست، بلکه به خاطر دقت بیش‌تر لوگ‌هاست. یکی از مشکلاتی که ژئوفیزیسیان با آن روبرو هستند، چگونگی استفاده بهینه از اطلاعات محدود حاصل از پیمایش‌های سطحی است. نکته قابل اهمیت این است که همیشه باید لوگ‌های ژئوفیزیکی را به بررسی‌های صحرایی ترقیق نمود. یکی از معایب لوگ‌های نرمال این است که پاسخ دریافتی از سنگ بستر با ضخامت‌های متفاوت، مختلف خواهد بود. یک لایه ضخیم با مقاومت بالا (ضخامت لایه بزرگ‌تر از فاصله الکترودها باشد) یک نقطه اوج با مقاومت بالا در روی لوگ نشان می‌دهد. در حالی که یک لایه با ضخامت کوچک‌تر از فاصله الکترودها ناهنجاری مقاومت کمی را نشان می‌دهد. این مشکل را می‌توان با به‌کاربردن چندین آرایش الکترودی پیچیده سه الکترودی جانبی یا لوگ متمرکز حل نمود. به هر حال پیچیدگی بیش‌تر آرایش الکترودها هزینه بیش‌تری را به همراه خواهد داشت که یکی از معایب آن به شمار می‌رود. لوگ‌های متمرکز با دقت بالا بیش‌تر در صنایع نفت و به ندرت در صنعت آب کاربرد دارند.

۳-۱-۱۵-۲- لوگ‌های خود القایی (SP)

این لوگ یکی از ساده‌ترین لوگ‌هاست که با استفاده از اندازه‌گیری ولتاژ بین یک الکتروود سطحی و یک الکتروود درون گمانه انجام می‌شود. به منظور حصول نتیجه بهتر و تماس بیش‌تر الکتروود سطحی معمولاً داخل گل حفاری نصب می‌شود. اختلافات ولتاژ مشاهده‌ای الکتروود داخل گمانه به دلیل عدم تعادل الکتروشیمیایی است. معمولاً آنها طوری اتفاق می‌افتند که ماسه‌ها از رس‌ها به‌طور واقعی قابل تشخیص هستند. بزرگی پاسخ ممکن است آب شور سازندی تخمین زده شود اگرچه این باید توجه شود که این لوگ در مواردی که آب سازندی بسیار شور باشد، قابل کاربرد است. لوگ SP نباید به عنوان وسیله دقیقی برای تعیین مقاومت آب سازندی در نظر گرفته شود و نباید جایگزین لوگ مایع شود.

۳-۱-۱۵-۳- لوگ رادیومتری (لوگ گاما طبیعی)

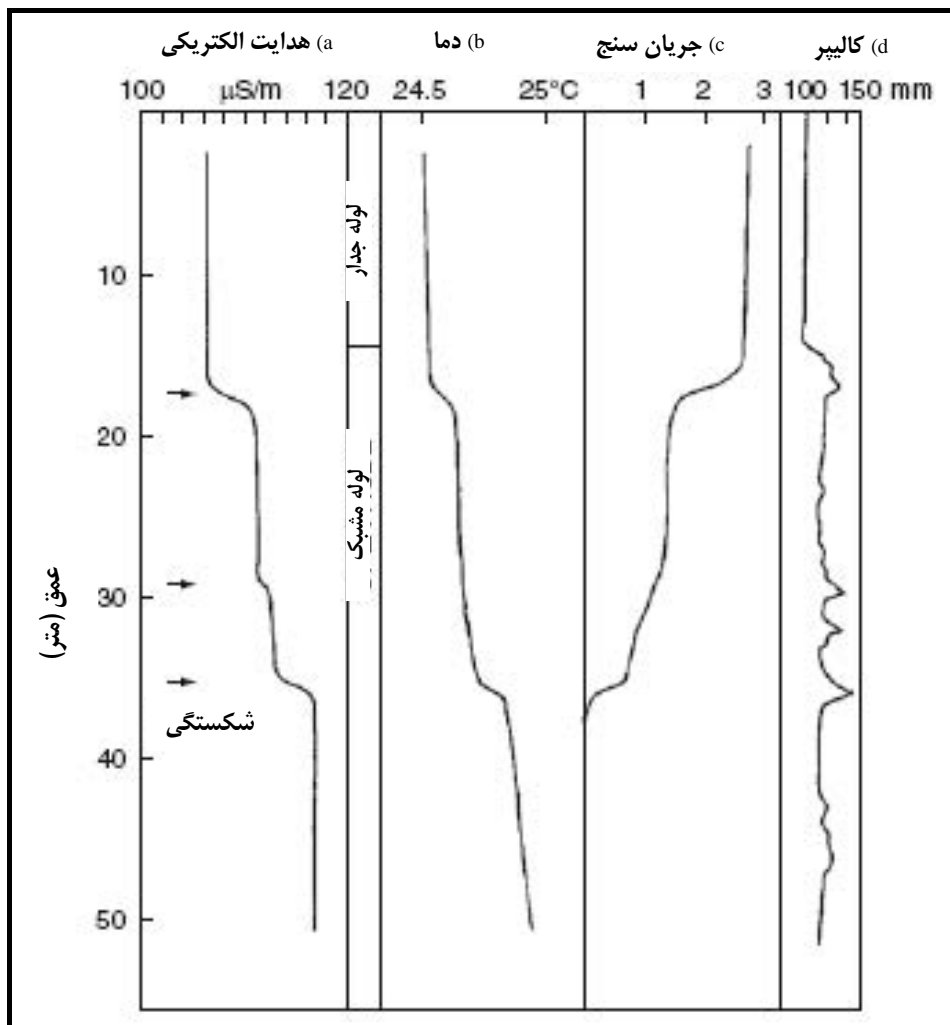
در این لوگ تشعشعات طبیعی ساطع شده از سازندهای در برگیرنده گمانه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. یک شمارش‌گر مخصوص به آرامی داخل گمانه فرستاده می‌شود و با استفاده از بمباران اشعه‌های گاما تولید شده حاصل از ایزوتوپ‌های طبیعی اطراف گمانه به فاصله ۳۰ سانتی‌متر لوگ‌برداری می‌شود. این لوگ متوسط آماری تعدادی اشعه گامای ثبت شده در فاصله زمانی کوتاه می‌باشد. تنها تغییرات گامایی که بیش‌تر از مقدار زمینه هستند باید مورد توجه قرار گیرند.

لوگ‌های گاما در گمانه‌های دارای لوله جدار نیز قابل کاربرد است. به منظور تقویت پاسخ‌ها در گمانه‌های با قطر زیاد و یا چاه‌های دستی سنجنده باید طوری به پایین فرستاده شود که بیش‌تر به جدار گمانه نزدیک باشد. در توالی‌های رسوبی معمولاً سازندهای غنی از رس با توجه به غلظت بیش‌تر ایزوتوپ‌های پتاسیم، اورانیم و توریم جذب شده در طول رسوبگذاری، دارای فعالیت گاما طبیعی بیش‌تری هستند. بنابراین بیش‌ترین کاربرد لوگ‌های گاما در مناطق سازند سخت که با مواد هوازده پوشیده شده، می‌باشد. این‌گونه لوگ‌ها به دلیل وجود کانی‌های مشابه سنگ بستر در مناطق هوازده چندان مفید نخواهند بود. شکل (۳-۶) لوگ گاما طبیعی اندازه‌گیری شده در یک گمانه موجود در آهک‌های دگرگون شده هوازده در زمبابوه را نشان می‌دهد. براساس این شکل سنگ بستر فعالیت گاما بسیار کمی را نشان می‌دهد. از دیگر لوگ‌های رادیومتری، می‌توان لوگ نوترون، گاما - گاما و لوگ چگالی را نام برد. در این لوگ‌ها سازندهای اطراف گمانه با اشعه گاما بمباران می‌شود و تعداد اشعه گاما بازگشتی ثبت می‌شود. با استفاده از

این لوگ نوع لیتولوژی قابل تفکیک خواهد بود. در لوگ نوترون جداره گمانه با نوترون‌های پارانرژی بمباران می‌شود که پاسخ دریافتی به چگالی هسته‌های هیدروژن موجود در سازندها بستگی دارد بنابراین در این لوگ مستقیماً مقدار آب لایه‌های زمین مشخص می‌شود. لوگ‌های گاما - گاما و نوترون به غیر از پروژه‌های مهم مدیریت منابع آب به ندرت مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۳-۱-۱-۴- لوگ‌های مایع (لوگ‌های درجه حرارت و هدایت)

معمولاً لوگ‌های درجه حرارت و هدایت به‌طور هم‌زمان با یک سنجنده مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرند. این لوگ‌ها با استفاده از یک استوانه حاوی دو، سه یا چهار الکتروود که از بالا و پایین باز است. مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرند. همین‌طور که این استوانه در طول گمانه پایین فرستاده می‌شود، الکتروودها هدایت و درجه حرارت آب داخل گمانه را اندازه‌گیری می‌کنند. قرارگیری الکتروودها داخل استوانه باعث جلوگیری از تاثیرگذاری مستقیم سازندها بر روی مقدار هدایت اندازه‌گیری شود. لوگ‌هایی که در شکل (۳-۶) نشان داده شده است به نحوی ثبت شده‌اند که چندین شکستگی جداگانه که در حال آب‌دهی به چاه هستند را نشان می‌دهند. این لوگ‌ها حضور شکستگی‌ها را نشان می‌دهند، ولی امکان اندازه‌گیری کمی آب ورودی به گمانه وجود ندارد. همچنین تخمین مقدار دقیق هدایت آب ورودی از طریق شکاف‌ها نیز وجود ندارد. ولی با این لوگ‌ها می‌توان عمق شکستگی‌ها را نشان داد.



شکل ۳-۶- انواع لوگ‌های مورد بررسی در گمانه‌ها

۳-۱-۱۵-۵- لوگ مایع (لوگ جریان سنج)

لوگ‌های جریان از این جهت اهمیت دارند که تنها وسیله تخمین دقیق مقدار آب ورودی از طریق شکاف‌ها در اعماق مختلف گمانه هستند. در این جریان سنجی پروانه‌های چرخنده‌ای به آهستگی به داخل گمانه فرستاده می‌شود و تعداد گردش پروانه‌ها در هر دقیقه ثبت می‌شود. این سنجنده باید با سرعت ثابت به داخل گمانه فرستاده شود و اگر این روش امکان نداشت باید آن را در فواصل عمقی مساوی ثابت کرد و اندازه‌گیری را انجام داد. براساس شکل (۳-۶)، ۳۰٪ از آب‌دهی گمانه از طریق درزه و شکاف عمق ۳۶ متر اتفاق می‌افتد، سپس در عمق بین ۳۶ تا ۳۹ متر مقدار کمی جریان آب به داخل گمانه وجود دارد. سپس در ۱۷/۵ متر یک شکاف بزرگ در گمانه مشاهده می‌شود که ۵۰٪ از آب داخل گمانه از این طریق تامین می‌شود. متأسفانه سنجنده‌ها قادر به اندازه‌گیری سرعت‌های کمتر از ۳۰ میلی‌متر در ثانیه نیستند. در تمامی لوگ‌های جریان باید تغییرات قطر گمانه به خصوص اگر در مقاطع مختلف و در قطرهای متفاوت حفاری شده باشد، در نظر گرفته و تصحیح شود.

۳-۱-۱۵-۶- لوگ کالیپر

لوگ کالیپر^۱، اندازه‌گیری پیوسته قطر گمانه با استفاده از بازوهای فنری است که از انتهای گمانه تا سطح حرکت می‌کند. حرکت بازوها سیگنال‌های الکتریکی ایجاد می‌کند که با قطر گمانه کالیپر شده و قابل ثبت است. تغییرات قطر گمانه در سه مورد قابل کاربرد است:

- تشخیص تغییرات لیتولوژی
- تعیین مکان شکاف‌ها و دیگر فضاها باز داخل گمانه
- تصحیح اطلاعات سایر لوگ‌ها که تحت تاثیر تغییرات قطر گمانه هستند.

۳-۱-۱۶- نتیجه‌گیری

پیمایش‌های ژئوفیزیکی در بررسی‌های هیدروژئولوژی بسیار مفید هستند و در تعیین محل گمانه‌ها کاربرد فراوانی دارند. کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی به منظور صرفه‌جویی اقتصادی باید قبل از تعیین محل حفاری گمانه‌ها انجام شود. روش‌های الکترومغناطیسی و یا دیگر روش‌ها با سرعت زیادی در سطح منطقه به کار گرفته شوند و مناطق بدون پتانسیل آب زیرزمینی جهت ادامه مطالعات حذف شوند. سپس سونداژهای الکتریکی و دیگر روش‌های کمی در مناطق با پتانسیل بالا متمرکز شود.

در مناطق با عمق کم هوازدگی (کم‌تر از ۲۰ متر)، جایی که ضخامت رگولیت متغیر است و رخنمون‌های سنگی فراوانی دیده می‌شود، استفاده از سونداژهای مقاومت و پیمایش‌های الکترومغناطیس می‌تواند موفقیت را افزایش دهد. به خصوص اگر آب‌دهی زیادی مدنظر باشد. در مناطقی که عمق هوازدگی زیاد است، به منظور به دست آوردن تصویری از ساختار زیرسطحی، استفاده از سونداژهای عمودی ضروری است.

پیمایش‌های ژئوفیزیکی تنها بخشی از اطلاعات قابل دسترس هیدروژئولوژیست‌ها هستند و نباید بیش‌ترین اهمیت به آنها داده شود. نتایج این پیمایش‌ها نیز نباید به صورت جدا از اطلاعات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی مورد استفاده قرار گیرد. به منظور تدقیق تفسیرها، نتایج پیمایش‌های ژئوفیزیکی باید با استفاده از آخرین اطلاعات حاصل از حفاری مورد بازبینی قرار گیرد. ذکر این نکته ضروری است که

ممکن است کاربرد یک روش در یک منطقه کاملاً موفق باشد، ولی ممکن است همین روش در منطقه‌ای دیگر با شرایط زمین‌شناسی و متفاوت پاسخ مناسبی ندهد. در نهایت باید به خاطر داشت که در به‌کارگیری پیمایش‌های ژئوفیزیکی باید انعطاف‌پذیر بود. به منظور دستیابی به اهداف مختلف تلفیقی از روش‌های متفاوت می‌تواند، مناسب باشد بنابراین هیچ قانون مشخصی ندارد. صرف‌نظر از اینها اغلب پیمایش‌های ژئوفیزیکی، ابزار قدرتمندی را برای فهم بهتر از شرایط زیر سطحی در اختیار ما قرار می‌دهد.

۳-۲- بررسی نتایج حفاری‌های اکتشافی (گمانه‌ها) و مطالعات ژئوتکنیک

در بررسی نتایج حفاری‌های اکتشافی و مطالعات ژئوتکنیکی به منظور بررسی فرار آب، عمدتاً نفوذپذیری لایه‌های مختلف زمین مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. از آنجا که روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری نفوذپذیری وجود دارد، متداول‌ترین آنها در مطالعات ژئوتکنیک ارائه شده است. در مطالعات ژئوتکنیکی که در ساختگاه سازه‌های آبی انجام می‌شود، عموماً برای اندازه‌گیری نفوذپذیری از دو روش استفاده می‌شود: آزمایش لوژن (آزمایش آب با فشار) و آزمایش لوفران (آزمایش آب بدون فشار). این آزمایشات به ترتیب برای تعیین میزان نفوذپذیری سنگ و خاک به کار می‌روند.

منظور از سنگ توده‌ای از خاکدانه‌های بهم چسبیده است که با سطوح گسستگی طبیعی (درزه، شکاف، سطوح لایه‌بندی، گسل و غیره) به قطعاتی با ابعاد مختلف تقسیم شده است و آزمایشات نفوذپذیری، به منظور سنجش نفوذپذیری این سطوح انجام می‌گیرد. در بعضی نواحی ممکن است توده سنگ فاقد گسستگی باشد که در این صورت سنگ دارای نفوذپذیری بسیار کم و یا غیر قابل نفوذ خواهد بود. در برخی نواحی دیگر مانند زون‌های خرد شده گسلی، تعداد سطوح گسستگی بسیار زیاد بوده و لذا میزان نفوذپذیری به دست آمده نیز بسیار بالا خواهد بود. منظور از «خاک» توده‌ای از خاکدانه‌های مجزا است که بدون چسبیدن به یکدیگر در کنارهم قرار گرفته‌اند.

آزمایش نفوذپذیری در خاک برای تعیین سرعت نفوذ یا عبور آب از میان این ذرات انجام می‌گیرد. بعضی از خاک‌ها مانند رس‌های ترکار نفوذپذیری بیش‌تر از معمول نشان می‌دهند که ناشی از هدایت آب در سطح ترک‌ها می‌باشد. انجام آزمایشات لوژن و لوفران موجب می‌شود، پارامترهای کیفی مربوط به نفوذپذیری سنگ و خاک، به صورت اعداد قابل تصمیم‌گیری بیان شوند. علیرغم دقت در انجام آزمایش، به لحاظ پیچیدگی طبیعت و امکان نفوذ آب به خارج از قطعه مورد آزمایش و آب‌بندی نشدن قطعه آزمایشی، نمی‌توان صددرصد بر روی نتایج هر یک از آزمایشات اتکا نمود. بنابراین در تحلیل داده‌های آزمایشات نفوذپذیری، همیشه سهمی برای نظر کارشناسی انجام‌دهندگان آزمایش باقی می‌ماند و این ویژگی مشترک انواع آزمایش‌های صحرایی می‌باشد.

۳-۲-۱- آزمایش لوژن

هدف از انجام آزمایش لوژن تعیین میزان نفوذپذیری سنگ کف یا توده‌های سنگی مورد آزمایش می‌باشد. به دست آوردن میزان نفوذپذیری، تصویر صحیحی از میزان آب‌گذری و مقدار سیمان مورد نیاز برای ایجاد پرده تزریق در سدها، تونل‌ها و بندها را نشان می‌دهد. به دست آوردن عدد لوژن به دو طریق امکان‌پذیر می‌باشد، استفاده از تعریف واحد لوژن و استفاده از روش هولزی. با توجه به متداول بودن روش هولزی در ادامه این روش مختصراً ارائه شده است. این روش مبتنی بر تحلیل آزمایشات لوژن می‌باشد. کلیه این آزمایشات به پنج حالت قابل تقسیم می‌باشند که در هر یک از این حالات عدد لوژن مورد انتخاب و نام جریان تعیین شده است.

- تمام اعداد لوژن به دست آمده به ازای فشارهای مختلف، یکسان یا نزدیک به هم هستند: جریان خطی^۱ عدد لوژن میانگین این اعداد است.
 - بالاترین فشار، کمترین عدد لوژن را نشان میدهد. عدد لوژن مربوط به بالاترین فشار انتخاب می‌شود (جریان متلاطم^۲).
 - بالاترین فشار، بالاترین لوژن را نشان می‌دهد. عدد لوژن مربوط به کمترین فشار انتخاب می‌شود: انبساط شکافها^۳.
 - از ابتدا تا انتهای آزمایش مقدار لوژن به تدریج افزایش می‌یابد. عدد لوژن مربوط به بیشترین فشار انتخاب می‌شود: شکسته شدن شکافها^۴.
 - از ابتدا تا انتهای آزمایش مقدار لوژن به تدریج کاهش می‌یابد. عدد لوژن مربوط به کمترین فشار انتخاب می‌شود: پرشدن شکافها^۵.
- در آزمایشات ممکن است دقیقاً به یکی از پنج حالت فوق ترسیم در این صورت شبیه‌ترین حالت برای انتخاب عدد لوژن در نظر گرفته می‌شود.

۳-۲-۲- آزمایش نفوذپذیری لوفران

- آزمایش لوفران در مواد گوناگون غیر چسبنده و تشکیلات سنگی خرد شده، در شرایط هیدروژئولوژیکی مختلف به کار می‌رود. این آزمایش در خاک‌های چسبنده نیز به کار می‌رود، ولی نتایج آن کم‌تر قابل اتکا می‌باشد. با توجه به روش حفاری اندازه قطعه مورد آزمایش و روش آزمایش، آزمایش لوفران به دو صورت اساسی به کار می‌رود:
- از ابتدای گمانه تا کف، لوله جدار گذاشته می‌شود. نفوذ آب فقط در جهت عمودی و در جهت کف گمانه صورت می‌گیرد. معمولاً از این روش به دلیل مسدود شدن منافذ کف گمانه در اثر رسوب، کم‌تر استفاده می‌شود. بنابراین نتایج به دست آمده از این روش کاملاً تقریبی می‌باشد. لذا به منظور به دست آوردن ارزیابی قابل اعتماد از نفوذپذیری خاک، تعداد نسبتاً زیادی آزمایش باید انجام شود.
 - قسمتی از لوله جدار در فاصله ۳۰ الی ۱۰۰ سانتی‌متری کف گمانه برداشته می‌شود و آزمایش نفوذ آب در این قطعه انجام می‌شود. برای جلوگیری از ریزش لایه‌های سست میتوان از یک لوله مشبک با نفوذپذیری بیش از لایه‌های مورد آزمایش استفاده نمود و یا قطعه آزمایش را با شن دانه درشت پر نمود. در این حالت نفوذ آب افقی است اما با افزایش زمان آزمایش، می‌توان نتایج حاصله را به هر دو جهت نسبت داد. گاهی اوقات نتیجه نفوذپذیری افقی با نتیجه به دست آمده از روش بالا تلفیق می‌شود.

1- Laminar Flow
 2 -Turbulent Flow
 3 - Dilation
 4- Wash Out
 5- Void Filling

فصل ۴

بررسی مطالعات هیدروژنولوژی

۴-۱- بررسی نتایج کمی

۴-۱-۱- سطح آب زیرزمینی و نوسانات آن

سطح آب زیرزمینی اعم از سطح ایستایی در آبخوان‌های آزاد یا سطح پیزومتری در آبخوان‌های محبوس بیانگر ارتفاع فشار اتمسفری در آبخوان است. ارتفاع فشار اتمسفری در نقطه‌ای معین از آبخوان عبارت است از ارتفاع آبی که در یک لوله عمودی در داخل آبخوان می‌باشد، چنین لوله‌ای پیزومتر نامیده می‌شود. در آبخوان‌های آزاد، ارتفاع فشار اتمسفری در هر نقطه از آبخوان برابر با فاصله عمودی نقطه تا سطح آب می‌باشد. در آبخوان‌های محبوس، ارتفاع فشار اتمسفری در نقطه معینی از آبخوان برابر با فشار عمودی نقطه تا سطح پیزومتری آبخوان است.

هر پدیده‌ای که باعث تغییر فشار بر روی آب‌های زیرزمینی شود، باعث تغییر سطح آب زیرزمینی خواهد شد. مهم‌ترین پدیده‌هایی که باعث تغییر سطح آب زیرزمینی و ایجاد نوسان در آن می‌شوند عبارتند از: اختلاف بین جریان ورودی و خروجی آب‌های زیرزمینی، تغییرات فشار اتمسفری، جزر و مد، زلزله، بارهای خارجی و تبخیر و تعرق. تغییرات سطح آب زیرزمینی را می‌توان به سه گروه کلی تقسیم نمود: تغییرات دراز مدت^۱، تغییرات فصلی^۲ و تغییرات کوتاه مدت^۳.

- تغییرات دراز مدت

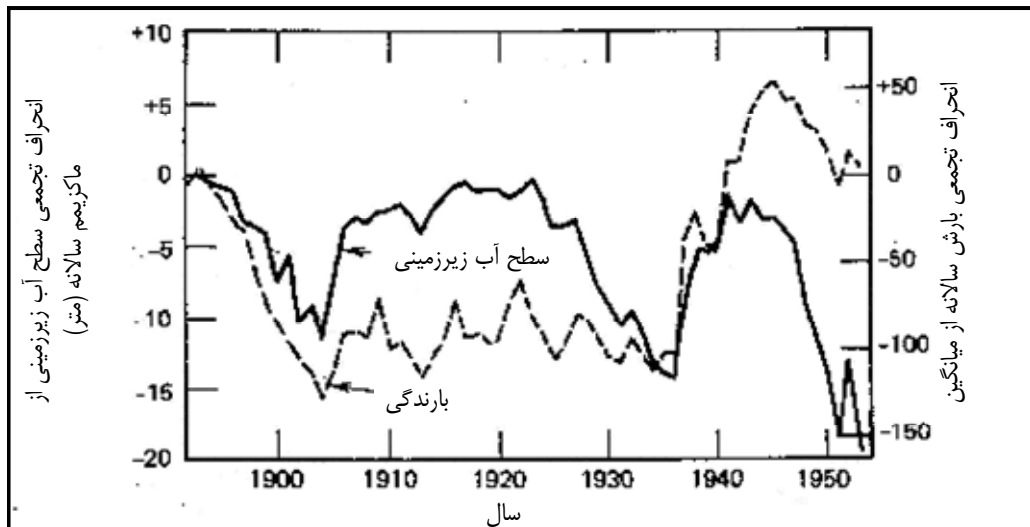
تغییراتی هستند که در چندین سال رخ می‌دهند. دوره‌های ترسالی و خشکسالی نوسانات طولانی مدتی را بر روی سطح آب زیرزمینی ایجاد می‌کنند. شکل (۴-۱) نوسانات مقدار بارندگی و تغییرات سطح آب زیرزمینی را در یک دوره طولانی مدت در آبخوانی در کالیفرنیا نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل (۴-۱) نشان می‌دهد، تغییرات سطح آب زیرزمینی با تغییرات بارندگی همخوانی کامل ندارد و به عواملی از قبیل شدت بارندگی و توزیع آن، میزان نفوذپذیری زمین و مقدار برداشت از آبخوان وابسته است.

- تغییرات فصلی

در بسیاری از آبخوان‌ها، سطح آب زیرزمینی نوسانات فصلی را نشان می‌دهد. علت این نوسانات به اثرات بارندگی و پمپاژ آب برای مصارف کشاورزی مربوط می‌شود. از آنجایی که بارندگی و مصارف کشاورزی در فصول مختلف سال متفاوت می‌باشند این نوسانات فصلی ایجاد می‌شوند.

- تغییرات کوتاه مدت

سطوح آب زیرزمینی اغلب نوسانات کوتاه مدت مشخصی را نشان می‌دهد که عمدتاً به پمپاژ محلی آب مربوط می‌شود. این قبیل پمپاژها ممکن است برای مصارف مختلف از قبیل مصارف شهری و صنعتی انجام شود.



شکل ۴-۱- نوسانات مقدار بارندگی و تغییرات سطح آب زیرزمینی را در یک دوره طولانی مدت در آبخوانی در کالیفرنیا

بررسی سطح آب زیرزمینی و تغییرات آن برای بررسی وضعیت هیدروژئولوژیکی آبخوان‌ها بسیار ضروری است. این چنین بررسی‌ها برای شناخت شرایط هیدروژئولوژیکی آبخوان‌ها به ویژه در سازندهای سخت که ناهمگن هستند، بسیار مفید می‌باشند. به‌طور کلی این بررسی‌ها در شناخت موارد ذیل ضروری می‌باشند:

- نوسانات سطح آب و ارتباط آن با سامانه ورودی آب به داخل آبخوان
- نوسانات سطح آب و ارتباط آن با آب‌دهی چشمه‌های منطقه
- حداقل و حداکثر ارتفاع سطح آب زیرزمینی می‌تواند در بحث مربوط به فرار آب از مخازن سدها بسیار مفید باشد.
- بالا و پایین رفتن سطح آب در رودخانه‌های مجاور آبخوان‌ها می‌تواند باعث تغییر جهت جریان آب زیرزمینی شود.
- اطلاعات مربوط به سطح آب زیرزمینی برای تهیه نقشه هم‌پتانسیل ضروری می‌باشد.

در بیش‌تر مطالعات هیدروژئولوژی، بررسی نوسانات سطح آب‌های زیرزمینی به منظور بررسی اثرات ناشی از تغذیه آبخوان و پمپاژ آبخوان انجام می‌شود که این بررسی‌ها برای اعمال مدیریت در بهره‌برداری از آبخوان‌ها صورت می‌گیرد. به منظور بررسی اثرات تغذیه و تخلیه آبخوان، تاثیر عوامل دیگر باید بررسی و اصلاح شوند. به غیر از تغذیه و تخلیه آبخوان، مهم‌ترین عواملی که تاثیرگذار هستند و باید تاثیر آنها در نظر گرفته شود، فشار هوا^۱، بارهای خارجی^۲، جزر و مد^۳ و تبخیر و تعرق^۴ می‌باشند.

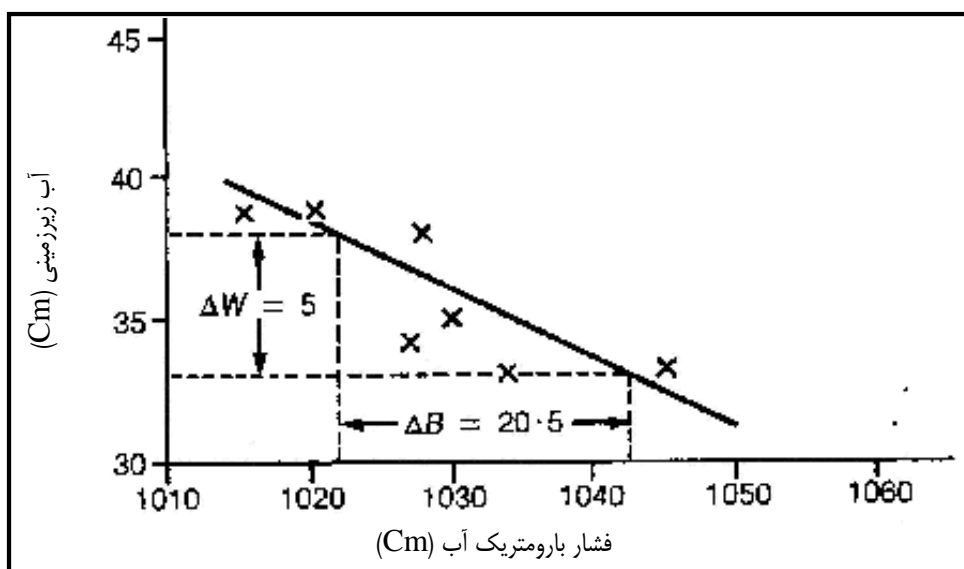
- فشار هوا

تغییر فشار هوا باعث ایجاد نوسانات زیادی در چاه‌های موجود در آبخوان‌های محبوس می‌شود. سطح آب در چنین چاه‌هایی در تماس با اتمسفر است و در آنها بین فشار هیدرواستاتیکی در آبخوان و فشار بارومتري توازن ایجاد می‌شود. بنابراین تغییرات فشار اتمسفری، تغییرات مشابهی را در سطح آب این چاه‌ها به وجود می‌آورد. به این ترتیب که با افزایش فشار بارومتري سطح آب در

- 1- Barometric Pressure
- 2- External Loads
- 3- Tide
- 4- Evapotranspiration

داخل چاه پایین می‌رود و با کاهش فشار بارومتري، سطح آب در داخل چاه بالا می‌آید. در آبخوان‌های آزاد، تغییرات فشار اتمسفری به‌طور یکسانی به سطح ایستایی در آبخوان و چاه‌های موجود در این آبخوان‌ها منتقل می‌شود. در نتیجه سطح آب در داخل چاه هماهنگ با سطح آب در آبخوان بالا و پایین می‌رود.

وقتی که داده‌های سطح آب زیرزمینی در آبخوان‌های محبوس را بررسی می‌کنیم باید تاثیر تغییرات فشار اتمسفری اصلاح شوند، تا تاثیر عوامل دیگری که باعث تغییر سطح آب زیرزمینی می‌شوند، میسر شود. برای اصلاح تاثیر فشار هوا بر روی تغییرات سطح آب زیرزمینی باید ابتدا بازده بارومتري^۱ آبخوان محاسبه شود. برای هر چاه باید بازده بارومتري محاسبه شود، چون شرایط زمین‌شناسی برای محدوده چاه‌های مختلف یکسان نیست. بازده بارومتري، از تقسیم تغییر فشار آب بر تغییر فشار بارومتري به دست می‌آید که بر حسب درصد یا اعشاری بیان می‌شود. شکل (۲-۴) نحوه محاسبه بازده بارومتري را در یک چاه نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴ - نحوه محاسبه بازده بارومتري

همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، تغییر فشار آب (ΔW) برابر با ۵ سانتی‌متر و تغییر فشار بارومتري (ΔP) برابر با ۲۰/۵ سانتی‌متر است، بنابراین بازده بارومتري به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{بازده بارومتري} = \frac{\Delta W}{\Delta P} = \frac{5 \text{ cm}}{20.5 \text{ cm}} = 0.244 \quad (1-4)$$

درخصوص ترسیم شکل (۲-۴) باید توجه کرد که فشار بارومتري در روی محور افقی و سطح آب در روی محور عمودی ترسیم شوند تا شیب خط به عنوان بازده بارومتري قلمداد شود. تجربه نشان داده است که بازده بارومتري در محدوده ۲۰ تا ۸۰ درصد متغیر است و این ارقام اهمیت محاسبه بازده بارومتري و اصلاح تاثیر فشار هوا را در بررسی‌های مربوط به داده‌های سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد. باید دقت نمود که واحد فشار بارومتري باید بر حسب سانتی‌متر نوشته شود. به این ترتیب که ۱۰۰۰ میلی‌بار برابر با ۱۰۲۰ سانتی‌متر آب می‌شود.

- بارهای خارجی

وقتی که یک بار سنگین بر آبخوان وارد می‌شود، می‌تواند باعث تغییر فشار آب در درون آبخوان محبوس شود. برای مثال عبور قطار از مجاورت چاهی که در آبخوان محبوس حفر شده است، می‌تواند باعث ایجاد اغتشاش در سطح آب زیرزمینی شود. معمولاً مقدار نوسانات ناشی از این قبیل بارهای خارجی در محدوده چند میلی‌متر است و به صورت اغتشاش ظاهر می‌شود و به همین دلیل از اهمیت چندانی برخوردار نیست.

- جزر و مد

جزر و مد آب دریا می‌تواند باعث ایجاد فشار در آبخوان‌های محبوس ساحلی شود. بنابراین جزر و مد باعث ایجاد نوسان در سطح آب زیرزمینی می‌شود و این نوسانات به صورت مستقیم عمل می‌کند. به این ترتیب که وقتی سطح آب در دریا بالا می‌آید، سطح آب زیرزمینی در آبخوان بالا می‌آید و وقتی سطح آب دریا پایین می‌رود، سطح آب زیرزمینی در آبخوان پایین می‌رود. لازم به ذکر است که مقدار نوسانات ناشی از جزر و مد همانند تاثیر بارهای خارجی در محدوده چند میلی‌متر است و خاص آبخوان‌های ساحلی است.

- تبخیر و تعرق

در آبخوان‌های آزاد که عمق سطح ایستابی آنها نسبتاً اندک است، تبخیر و تعرق می‌تواند باعث ایجاد نوساناتی در سطح آب زیرزمینی شود. به ویژه در مناطقی که گیاهان آبدوست^۱ وجود دارد، در طول روز سطح آب زیرزمینی به‌طور قابل توجهی پایین می‌آید و در طول شب سطح آب به تدریج به حالت اول خود برمی‌گردد.

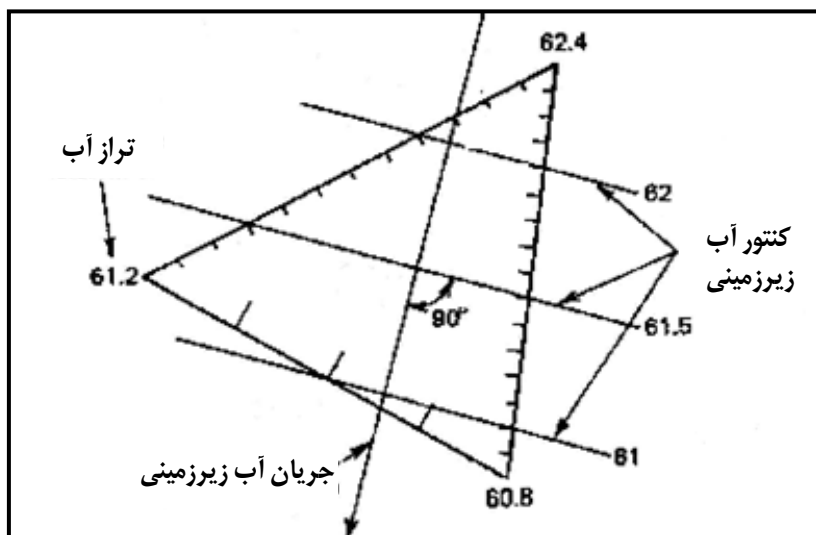
۴-۱-۲- جهت جریان و الگوی آن

اندازه‌گیری‌های مربوط به ارتفاع سطح آب در پیژومترها به عنوان اساس تعیین جهت جریان آب زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای این منظور باید نقشه‌های هم‌پتانسیل^۲ یا ایزوپیز تهیه شود. برای تهیه نقشه‌های هم‌پتانسیل آب زیرزمینی تعدادی پیژومتر در آبخوان حفر می‌شود که باید توزیع نسبتاً یکنواختی در منطقه مورد نظر داشته باشند. با داشتن حداقل سه پیژومتر در هر منطقه می‌توان خطوط تراز آب زیرزمینی را ترسیم نمود. به منظور تهیه نقشه هم‌پتانسیل، محل پیژومترها بر روی نقشه‌ای با مقیاس مناسب ترسیم می‌شود (برای مثال در دشت‌ها مقیاس مناسب اغلب یک به ۵۰.۰۰۰ می‌باشد). سپس محل پیژومترهای مجاور هم با خطوطی مستقیم، به گونه‌ای به یکدیگر وصل می‌شوند تا یک مثلث بلندی مناسب در منطقه ایجاد شود. به این صورت که اضلاع مثلث‌ها حتی‌الامکان با هم همخوانی داشته باشند و این اضلاع از روی لایه‌های غیرقابل نفوذ، رودخانه‌ها و یا تالاب‌ها و دریاچه‌ها عبور نکنند. سپس نقاط هم‌ارتفاع با استفاده از روش درون‌یابی محاسبه می‌شوند و با اتصال آنها به یکدیگر خط تراز آب زیرزمینی یا خط هم‌پتانسیل آب زیرزمینی به دست می‌آید. برای ترسیم خطوط تراز آب زیرزمینی (نقشه هم‌پتانسیل آب زیرزمینی) می‌توان از نرم‌افزارهای کامپیوتری (برای مثال، Surfur) استفاده نمود. شکل (۳-۴) چگونگی تهیه نقشه هم‌پتانسیل آب زیرزمینی را با استفاده

1- Phreatophyte

2- Isopotential Maps

از ارتفاع سطح آب زیرزمینی در سه پیزومتر نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، در صورتی که آبخوان همسوی^۱ باشد، جهت جریان آب زیرزمینی عمود بر خطوط تراز آب زیرزمینی است.



شکل ۴-۳- چگونگی تهیه نقشه هم پتانسیل آب زیرزمینی را با استفاده از ارتفاع سطح آب زیرزمینی در سه پیزومتر

برای آبخوان‌های محبوس نیز همانند آبخوان‌های آزاد، نقشه‌های هم پتانسیل آب زیرزمینی تهیه می‌شود و در این خصوص از اطلاعات سطح آب در پیزومترهایی که در آبخوان محبوس حفر شده‌اند، استفاده می‌شود. در تهیه نقشه‌های هم پتانسیل علاوه بر درون‌یابی ساده بین ارتفاع سطح آب در پیزومتر، باید از اطلاعات زمین‌شناسی شامل موقعیت گسل‌ها، مرزهای انتقال‌دهنده آب^۲ و مرزهای مانع انتقال آب^۳، تغییرات ضخامت آبخوان، تغییرات ضریب آب‌گذری و مناطق تغذیه و تخلیه آبخوان نیز استفاده شود. فاصله خطوط تراز آب زیرزمینی، نشان‌دهنده تفاوت نفوذپذیری در آبخوان است. وقتی که خطوط تراز آب زیرزمینی نزدیک به هم باشند، نشان‌دهنده نفوذپذیری کم آنها خواهد بود. به علت این که شیب هیدرولیکی زیادی لازم است تا آب را در آبخوان به جلو منتقل نماید. وقتی که خطوط تراز آب زیرزمینی دارای فاصله زیادی باشند، عکس حالت قبل است و نشانگر نفوذپذیری بیش‌تر آبخوان است. در تجزیه و تحلیل مسایل مربوط به جریان آب زیرزمینی، ترسیم الگوی جریان^۴ ممکن است به‌طور قابل ملاحظه‌ای مفید باشد و راه‌حلی را ارائه کند که به سادگی به وسیله راه‌حل‌های ریاضی به دست نمی‌آید. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، یک شبکه جریان^۵ که عبارت است از نمایش تصویری الگوی جریان، از دو نوع خط یا منحنی تشکیل می‌شود. یک نوع آن، خطوط هم پتانسیل نامیده می‌شود که تمام نقاط این خطوط دارای بار پتانسیل یکسانی هستند. نوع دوم، خطوطی هستند که عمود بر خطوط گروه اول ترسیم می‌شوند (با فرض ایزوتروپ بودن آبخوان)، این خطوط، خطوط جریان نامیده می‌شوند.

- 1- Isotropic
- 2- Carrier Boundries
- 3- Barrier Boundries
- 4- Flow Pattern
- 5- Flow Net

۴-۱-۳- خصوصیات هیدرودینامیکی لایه‌ها

خصوصیات هیدرودینامیکی لایه‌ها شامل هدایت آبی^۱، ضریب انتقال^۲، ضریب ذخیره^۳ یا آب‌دهی ویژه می‌شوند. خصوصیات هیدرودینامیکی لایه‌ها که پارامترهای هیدرولیکی آبخوان نیز نامیده می‌شوند، بیانگر چگونگی جریان آب زیرزمینی در لایه‌ها و همچنین تغییرات سطح ایستابی و سطح پیزومتري به ترتیب در آبخوان‌های آزاد و محبوس می‌باشند. در حقیقت این پارامترها مهم‌ترین ویژگی‌های آبخوان‌ها هستند که برآورد دقیق آنها در حل مسایل مختلف هیدروژئولوژیکی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. روش‌های مختلفی برای برآورد این ضرایب وجود دارد که از جمله می‌توان به استفاده از فرمول‌ها، روش‌های آزمایشگاهی، روش ردیابی، روش چاهک آزمایش^۴، و روش آزمایش پمپاژ می‌باشد. دقیق‌ترین و رایج‌ترین روش تعیین خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان‌ها استفاده از روش آزمایش پمپاژ است.

برآورد دقیق خصوصیات هیدرودینامیکی در آبخوان‌های آبرفتی با استفاده از داده‌های آزمایش پمپاژ کار دشواری نیست. درخصوص آبخوان‌های تشکیل شده در سازندهای سخت به علت ناهمگنی‌های موجود در آنها برآورد خصوصیات هیدرودینامیکی آنها کم و بیش دشوار است. امروزه برآورد خصوصیات هیدرودینامیکی در سازندهای سخت به دلایل متعددی حائز اهمیت قرار گرفته است، از مهم‌ترین این موارد می‌توان به وجود منابع عظیم آب زیرزمینی در آنها، وجود سوخت‌های فسیلی در این سازندها، استفاده از این سازندها به عنوان محل مناسب برای دفن زباله‌های اتمی، احداث مخازن سدها و مساله نشت آب در آنها و بسیاری موارد دیگر اشاره نمود.

برای برآورد خصوصیات هیدرودینامیکی در آبخوان‌های آبرفتی با استفاده از داده‌های آزمایش پمپاژ، برای شرایط مختلف روش‌های متفاوتی ارائه شده است. انتخاب روش مناسب به شرایط آبخوان و شرایط آزمایش پمپاژ وابسته می‌باشد. روش‌های مختلف آزمایش پمپاژ توسط کروزمین و دریدر به‌طور جامعی ارائه شده‌اند. درخصوص آبخوان‌هایی که در سازندهای سخت تشکیل شده‌اند، برای آنالیز داده‌های آزمایش پمپاژ، تقریباً در تمام موارد از روش‌های مرسوم که برای آبخوان‌های آبرفتی ارائه شده‌اند، استفاده می‌شود. دلیل این امر از این قرار است که رفتار عمومی اکثریت آبخوان‌ها در سازندهای سخت کم و بیش شبیه به رفتار آبخوان‌های آبرفتی می‌باشد و نتایج حاصله به وسیله استعمال روش‌های مرسوم، در محدوده قابل قبولی واقع می‌شوند. در بعضی از موارد، منحنی افت - زمان در سازندهای سخت بر منحنی‌های مرجع روش‌های مرسوم منطبق نمی‌شود که در چنین موارد استفاده از روش‌های مرسوم آبخوان‌های آبرفتی، خطای قابل توجهی را ایجاد خواهد نمود. در سازندهای سخت، منحنی افت - زمان در بعضی از موارد شامل سه بخش می‌شود. بخش‌های اول و سوم با منحنی مرجع تاپس منطبق می‌شوند ولی در بخش دوم یک کاهش شیب (انحراف از منحنی مرجع تاپس) را نشان می‌دهد که دلیل آن افزوده شدن جریان از توده سنگ به داخل درزه‌ها و شکاف‌ها می‌باشد. در شرایطی که داده‌های آزمایش پمپاژ رفتار سه قسمتی را نشان می‌دهند، بیانگر تاثیرگذاری تخلخل دوگانه^۵ در این آبخوان‌ها می‌باشد. کاربرد روش‌های مرسوم آبخوان‌های آبرفتی برای آنالیز داده‌های آزمایش پمپاژ در مواردی که منحنی افت - زمان الگو سه قسمتی

- 1- Hydraulic Conductivity
- 2- Transmissivity
- 3- Storage Coefficient
- 4- Augur Hole Test
- 5 - Double Porosity Model

تخلخل دوگانه را ارائه می‌دهند، خطای قابل توجهی را ایجاد خواهد نمود. برای چنین داده‌هایی، منج روشی را ارائه نموده است که اساس آن تئوری تخلخل دوگانه است و شامل تعداد زیاد منحنی مرجع می‌شود.

هدایت آبی و ضریب انتقال خصوصیات هیدرودینامیکی هستند که قابلیت انتقال آب در لایه‌های زمین‌شناسی را نشان می‌دهند. ضریب انتقال بر طبق تعریف برابر است با حاصل ضرب هدایت آبی آبخوان و ضخامت اشباع آبخوان. بنابراین اگر ضخامت اشباع آبخوان مشخص باشد، مقدار هدایت آبی می‌تواند تعیین شود و در غیر این صورت ضریب انتقال آبخوان محاسبه می‌شود. ضریب ذخیره و آب‌دهی ویژه خصوصیات هیدرودینامیکی هستند که قابلیت ذخیره‌سازی آب را به ترتیب در آبخوان‌های محبوس و آزاد نشان می‌دهند. ضریب ذخیره و آب‌دهی ویژه در مقایسه با ضریب انتقال، به خصوص در آبخوان‌های ناهمگن، تغییرپذیری بالایی را شامل می‌شوند. علاوه بر این، در هر آزمایش پمپاژ برای برآورد ضریب ذخیره یا آب‌دهی ویژه، نیاز به چاه مشاهده‌ای^۱ می‌باشد که در اغلب موارد موجود نیست. بنابراین دسترسی به اطلاعات مربوط به ضریب ذخیره یا آب‌دهی ویژه در مقایسه با ضریب انتقال به‌طور قابل توجهی کم‌تر است، با توجه به مطالب فوق‌الذکر، اهمیت اطلاعات مربوط به ضریب انتقال یا هدایت آبی و تجزیه و تحلیل آنها کاملاً مشهود است.

رابطه بین خصوصیات هیدرولیکی و زمین‌شناسی را می‌توان برای تقسیم‌بندی سنگ‌های مختلف در منطقه مورد نظر به کار گرفت. به منظور برآورد خصوصیات هیدرولیکی لایه‌های گوناگون، اطلاعات خوبی از لیتولوژی و ساخت‌های محلی ضروری می‌باشد. اطلاعاتی از قبیل اندازه دانه‌ها و میزان جورشدگی رسوبات و سنگ‌های رسوبی در برآورد خواص هیدرولیکی آنها بسیار مفید و ضروری می‌باشد. در خصوص سنگ‌های سخت، اطلاعاتی از قبیل درزه‌ها و شکستگی‌ها و در صورت امکان بررسی مغزه‌های به دست آمده از گمانه‌های حفاری جهت بررسی تغییرات خواص هیدرولیکی لایه‌ها با عمق، ضروری می‌باشد. در خصوص خواص هیدرولیکی مربوط به قابلیت انتقال که در مساله فرار و نشت آب بسیار حایز اهمیت هستند، امتداد و جهت دسته‌جات درزه‌ها^۲ از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند. به منظور برآورد تقریبی هدایت هیدرولیکی رسوبات و لایه‌های زمین‌شناسی، هدایت هیدرولیکی انواع مختلف سنگ‌ها در جدول (۴-۱) ارائه شده است.

جدول ۴-۱ - هدایت هیدرولیکی رسوبات و لایه‌های زمین‌شناسی

هدایت هیدرولیکی بر حسب متر بر روز				
۱۰۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰	۱۰	۱
۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۱
هدایت هیدرولیکی نسبی				
خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
رس متراکم	سیلت، رس و مخلوط ماسه، سیلت و ماسه	ماسه دانه ریز	ماسه تمیز و مخلوط ماسه و گراول	گراول تمیز
سنگ‌های آذرین و دگرگونی متراکم	ماسه سنگ، شیل و گل سنگ	ماسه سنگ یک‌دست و سنگ‌های آذرین و دگرگونی درزه و شکافدار	بازالت حفره‌ای، دولومیت و آهک حفره‌ای	

1- Observation Borehole

2- Joint Sets

۴-۱-۴- آبدهی چشمه‌ها و تغییرات آن

- آبدهی چشمه‌ها

آبدهی چشمه‌ها در آبخوان‌های مختلف بسیار متفاوت می‌باشد. به این ترتیب که مقدار آبدهی چشمه‌ها از کم‌تر از ۰/۰۰۱ لیتر در ثانیه تا بیش‌تر از ۱۰۰۰۰ لیتر در ثانیه متغیر است. بر همین اساس چشمه‌ها را به هشت رده طبقه‌بندی نموده است. جدول (۲-۴) طبقه‌بندی چشمه‌ها را بر اساس آبدهی آنها نشان می‌دهد.

جدول ۲-۴- طبقه‌بندی چشمه‌ها بر اساس آبدهی آنها

رده چشمه	متوسط آبدهی
۱	$< 10 \text{ m}^3/\text{s}$
۲	$1 - 10 \text{ m}^3/\text{s}$
۳	$0.1 - 1 \text{ m}^3/\text{s}$
۴	$10 - 100 \text{ l/s}$
۵	$1 - 10 \text{ l/s}$
۶	$0.1 - 1 \text{ l/s}$
۷	$10 - 100 \text{ ml/s}$
۸	$> 10 \text{ ml/s}$

آبدهی چشمه‌ها عمدتاً به وسعت حوضه آبریز چشمه، تغذیه سالانه در حوضه آبریز و تراوایی آبخوان وابسته می‌باشد. بزرگ‌ترین چشمه‌های دنیا در آبخوان‌های کارستی واقع شده‌اند. بزرگ‌ترین چشمه کارستی دنیا، چشمه^۱ در یوگسلاوی است که آبدهی حداکثر آن به ۲۰۰ مترمکعب در ثانیه می‌رسد. در کشور ایران نیز بزرگ‌ترین چشمه‌ها از آبخوان‌های کارستی در کوه‌های زاگرس تخلیه می‌شوند. مانند چشمه شش پیر که آبدهی حداکثر آن به ۷۲۰۰ لیتر در ثانیه می‌رسد. علاوه بر چشمه‌های کارستی در برخی از نقاط دنیا چشمه‌های بزرگی از سنگ‌های ولکانیکی خارج می‌شوند. چشمه‌هایی که از آبخوان‌های آبرفتی تخلیه می‌شوند، آبدهی آنها در مقایسه با آبدهی چشمه‌های کارستی و ولکانیکی به مراتب کم‌تر است.

- تغییرات آبدهی چشمه‌ها

تغییرات آبدهی چشمه‌ها در آبخوان‌های مختلف بسیار متفاوت است. تغییرات آبدهی چشمه‌ها در آبخوان‌های آبرفتی، آبخوان‌های کارستی و سایر سازندهای سخت به ترتیب ارائه خواهد شد.

• تغییرات آبدهی چشمه‌ها در آبخوان‌های آبرفتی

بیش‌تر چشمه‌های آبرفتی تغییراتی را در آبدهی خود شامل می‌شوند. مقدار این تغییرات عمدتاً به وسعت و شکل آبخوان چشمه و تراوایی مواد تشکیل‌دهنده آبخوان وابسته است. در چشمه‌های دائمی هرچه وسعت آبخوان بزرگ‌تر باشد تغییرات آبدهی چشمه

کمتر خواهد بود و بالعکس. همچنین هرچه شکل آبخوان مربوط به چشمه کشیده‌تر باشد، تغییرات چشمه کم‌تر خواهد بود و بالعکس برای آبخوان‌هایی که شکل آنها گرد می‌باشد. درخصوص ارتباط تراوایی مواد تشکیل‌دهنده آبخوان و تغییرات آب‌دهی چشمه‌ها می‌توان این چنین اظهارنظر نمود که هرچه تراوایی مواد بیشتر باشد، تغییرات آب‌دهی چشمه نیز بیشتر خواهد بود. در بعضی از چشمه‌های مربوط به آبخوان‌های آزاد که عمق سطح ایستابی در این آبخوان‌ها اندک است یک نوسانات نسبتاً منظم در آب‌دهی چشمه‌ها دیده می‌شود که این نوسانات عمدتاً به تغییرات تعرق^۱ توسط گیاهان آبدوست^۲ و تغییرات فشار اتمسفری وابسته می‌باشد.

• تغییرات آب‌دهی چشمه‌های کارستی

تغییرات آب‌دهی چشمه‌های کارستی همانند با تغییرات درجه حرارت آب در این چشمه‌ها به‌طور بی‌شماری مورد بررسی قرار گرفته است. تغییرات آب‌دهی چشمه‌های کارستی بسیار متفاوت است و از آن به عنوان یکی از پارامترهای مهم درخصوص شناخت نوع سامانه جریان در آبخوان‌های کارستی استفاده می‌شود. اگر چه تغییرات آب‌دهی چشمه‌های کارستی همانند با چشمه‌های آبرفتی به اندازه و شکل آبخوان کارستی و تراوایی آن وابسته می‌باشد. در میان پارامترهای مذکور مهم‌ترین پارامتری که تغییرات آب‌دهی چشمه‌های کارستی را تحت تاثیر قرار می‌دهد، تراوایی آبخوان کارستی است. به این ترتیب که هرچه تراوایی آبخوان کارستی، که از نوع تراوایی ثانویه است، بزرگ‌تر باشد تغییرات آب‌دهی چشمه بیشتر و هرچه تراوایی آن کم‌تر باشد، تغییرات آب‌دهی چشمه کم‌تر خواهد بود. در حقیقت تغییرات آب‌دهی چشمه‌های کارستی به عنوان یک معیار مهم برای تفکیک آبخوان‌های کارستی با سامانه غالب مجرایی از آبخوان‌های کارستی با سامانه غالب افشان است. به این ترتیب که در آبخوان‌های کارستی با سامانه غالب مجرایی، تغییرات آب‌دهی چشمه‌ها بسیار زیاد می‌باشد در حالی که تغییرات آب‌دهی در آبخوان‌های کارستی با سامانه غالب افشان بسیار اندک می‌باشد. تغییرات آب‌دهی چشمه‌های کارستی در نقاط مختلف دنیا به‌طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است (برای مثال: Shuster and White 1971, Newson 1973, Jacobson and Langmuir 1974, Scanlon and Thrailkill 1987, Raeisi and Karami 1996, Raeisi and Karami 1997).

در زیر دو مثال ذکر می‌شود:

جاکوبسن و لانگمویر^۱ (۱۹۷۷) ضریب تغییرات آب‌دهی را برای چشمه‌های کارستی دره^۲ محاسبه نموده‌اند. بر اساس مطالعات آنها ضریب تغییرات چشمه‌های با سامانه مجرایی بزرگ‌تر از ۱۵۰ درصد و برای چشمه‌های مجرایی - افشان بزرگ‌تر از ۴۰ درصد و برای چشمه‌های افشان کم‌تر از ۳۰ درصد برآورد نموده است. کرمی ضریب تغییرات آب‌دهی را برای چشمه علی دامغان، که یک چشمه با سامانه کاملاً افشان می‌باشد، ۳/۹ درصد برآورد نموده است.

• تغییرات آب‌دهی چشمه‌ها در سایر سازندهای سخت

درخصوص تغییرات آب‌دهی چشمه‌ها در سایر سازندهای سخت اگرچه تحقیقات زیادی نشده است ولی به خاطر این که آب‌دهی چشمه‌های موجود در سازندهای سخت از طریق درزه و شکستگی‌های مجاری و فضاهای خالی صورت می‌گیرد، تغییرات آب‌دهی آنها همانند با چشمه‌های کارستی می‌باشد.

1- Transpiration
2- Phreatophyte
1- Jacobson and Langmuir
2- Nittany

۴-۱-۵- مقایسه آبنمود چشمه‌ها و هیستوگراف

آبنمود^۱ نموداری است که تغییرات زمانی سطح آب یا دبی جریان را نشان می‌دهد. آبنمود چشمه‌ها، که در حقیقت تغییرات زمانی دبی چشمه را نشان می‌دهد، می‌تواند اطلاعات مفیدی در خصوص وضعیت هیدروژئولوژیکی آبخوان ارائه نماید. با استفاده از آبنمود چشمه‌ها می‌توان وضعیت تغذیه و تخلیه آبخوان، تراوایی آبخوان و ظرفیت ذخیره‌سازی آبخوان را به ویژه در سازندهای سخت ارزیابی نمود. بررسی آبنمود چشمه‌ها در چشمه‌های کارستی توسط محققین بی‌شماری انجام شده است (برای مثال: Shuster and White 1997, Raеisi and Karami 1996, Raеisi and Karami 1997, Atkinson 1973, Jacobson and Langmuir 1974).

در اکثریت این مطالعات منحنی فرود^۲ چشمه با استفاده از داده‌های مربوط به هیدروگراف چشمه تهیه می‌شود. به این ترتیب که شاخه نزولی هیدروگراف (از دبی اوج به بعد) انتخاب شده و این داده‌ها در مقابل زمان در یک دستگاه مختصات نیمه لگاریتمی ترسیم می‌شوند (دبی در روی محور عمودی که لگاریتمی می‌باشد و زمان بر روی محور افقی که خطی می‌باشد). چنین نموداری به صورت یک خط مستقیم و یا یک خط شکسته با شیب‌های مختلف ظاهر می‌شود. شیب خط و یا خطوط شکسته ایجاد شده به عنوان ضریب یا ضرایب دبی در نظر گرفته می‌شوند. ضریب دبی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\alpha = \frac{\log Q_0 - \log Q_t}{0.4343(t - t_0)} \quad (۲-۴)$$

که در این رابطه، α ضریب دبی، Q_0 و Q_t دبی‌های چشمه بر حسب مترمکعب بر ثانیه به ترتیب در زمان‌های t_0 و t_1 می‌باشد. ضریب دبی میزان توانایی سفره آب زیرزمینی در ذخیره‌سازی آب را نشان می‌دهد و تابع تخلخل موثر و قابلیت انتقال سفره آب زیرزمینی می‌باشد. در سفره‌های کارستی توسعه یافته، منحنی فرود چشمه عمدتاً از سه رژیم با ضرایب بده متفاوت تشکیل می‌شود. در رژیم اول، تخلیه آب زیرزمینی از غارها و مجاری بزرگ صورت می‌گیرد و در این حالت جریان متلاطم غالب است و حجم زیادی از آب از طریق این مجاری با سرعت زیاد تخلیه می‌شود. در رژیم دوم، تامین آب چشمه از طریق شکاف‌های مرتبط که به‌طور نسبتاً کم‌تری کارستی شده‌اند، صورت می‌گیرد. در رژیم سوم، آب چشمه از داخل خلل و فرج ریزتر و درزه و شکاف‌های با بازشدگی اندک تخلیه می‌شود. هیستوگراف چشمه‌ها، در حقیقت بیانگر دبی متوسط چشمه می‌باشد. یکی از رایج‌ترین هیستوگراف‌ها، هیستوگرافی است که دبی متوسط ماهانه چشمه را نشان می‌دهد. هیستوگراف چشمه‌ها در مقایسه با منحنی فرود و هیدروگراف چشمه‌ها بندرت مورد استفاده قرار می‌گیرد، دلیل آن این است که هیدروگراف لحظه‌ای^۳ در ارزیابی وضعیت هیدروژئولوژیکی آبخوان کارایی بیش‌تری دارد.

۴-۱-۶- بررسی تغییرات دما و هدایت الکتریکی چشمه‌ها

- بررسی تغییرات دما

برآورد دقیق درجه حرارت آب زیرزمینی در بسیاری از تحقیقات آب‌های زیرزمینی حائز اهمیت است. بررسی تغییرات درجه حرارت آب زیرزمینی در چشمه‌ها و چاه‌ها برای اهداف مختلفی به‌کار گرفته شده است که مهم‌ترین آنها بررسی جهت جریان آب زیرزمینی می‌باشد.

- 1- Hydrograph
- 2- Recesion Curve
- 3- Instantaneous Hydrograph

درجه حرارت آب زیرزمینی با توجه به عمق آب زیرزمینی تغییراتی را در طول فصول مختلف ممکن است، شامل شود. معمولاً نوسانات فصلی درجه حرارت آب زیرزمینی تا عمق حدود ۱۰ الی ۲۰ متر ممکن است، تاثیر بگذارد و پایین تر از این اعماق، درجه حرارت آب زیرزمینی معمولاً ثابت بوده و برابر با درجه حرارت متوسط سالانه هوای منطقه می باشد. به علت شیب زمین گرمایی، درجه حرارت آب های زیرزمینی با افزایش عمق زیاد می شود. به این ترتیب که به ازای هر صد متر افزایش عمق آب های زیرزمینی، درجه حرارت آب حدود ۱ تا ۵ درجه سانتی گراد افزایش پیدا می کند.

تغییرات درجه حرارت آب در چشمه های کارستی زیاد مورد بررسی قرار گرفته است. به این ترتیب که در تمام بررسی های فیزیکی و شیمیایی آب های خروجی از چشمه های کارستی، یکی از پارامترهای اساسی که مورد اندازه گیری و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است، درجه حرارت آب می باشد. به منظور بررسی تغییرات درجه حرارت آب باید از دماسنج های دقیق استفاده نمود، زیرا این تغییرات نسبتاً اندک بوده و حدود چند دهم درجه سانتی گراد است. کوماتینا^۱ ذکر کرده است که تغییرات درجه حرارت آب چشمه ها در گستره های کارستی به سه عامل بستگی دارد: ۱- درجه حرارت آب زیرزمینی، ۲- عمق و اندازه جریان آب زیرزمینی، ۳- درجه کارستی شدن آبخوان بین گستره سطحی و جریان آب زیرزمینی.

درجه حرارت یک کمیت ابقایی در آب های زیرزمینی است و به همین دلیل بررسی تغییرات آن می تواند به عنوان یک ردیاب ساختار کلی سامانه جریان آب زیرزمینی را آشکار سازد، ضمن این که این پارامتر به سادگی و با دقت مناسبی قابل اندازه گیری است. بر اساس مطالعات انجام شده مقدار درجه حرارت چشمه های کارستی از حداقل ۴/۹ تا ۱۷/۸ درجه سانتی گراد متغیر می باشد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که حدود درجه حرارت آب چشمه های کارستی از حدود ۴ تا ۲۰ درجه سانتی گراد متغیر است. مهم ترین عاملی که بر تغییرات درجه حرارت آب در آبخوان های کارستی و تغییرات آن تاثیر گذار است، نوع سامانه جریان در آبخوان کارستی است. کول^۲ و فرد^۳ در مطالعاتشان در منطقه انتاریو^۴ کانادا به این نتیجه رسیدند که تغییرات درجه حرارت آب در چشمه های با سامانه مجرای برابر با ۵/۹ و در چشمه های با سامانه افشان برابر با ۱/۳۲ درجه سانتی گراد بوده است. اد^۵ با اندازه گیری درجه حرارت آب در سات ویلز^۶ انگلستان در طول یک سال، ملاحظه نمود که درجه حرارت آب در چشمه های با سامانه مجرای از ۶/۵ تا ۱۱ و در سامانه های افشان از ۱۰/۲ تا ۱۰/۹ درجه سانتی گراد متغیر بوده است. جاکوبسن^۷ و لانگمویر^۸ ضریب تغییرات را برای بعضی از پارامترهای اصلی در چشمه های با سامانه های مختلف جریان محاسبه نموده اند. آنها ذکر کرده اند که ضریب تغییرات درجه حرارت آب برای تشخیص نوع سامانه کارستی بهترین شناساگر است. آنها ملاحظه نمودند که ضریب تغییرات در چشمه های با سامانه کارستی مجرای در منطقه مورد مطالعه ۲۶/۹ و در چشمه های افشان ۱/۴ درصد می باشد. کرمی در بررسی خواص فیزیکی و شیمیایی چشمه کارستی چشمه علی دامغان که از نوع کاملاً افشان است، ضریب تغییرات درجه حرارت آب را برای این چشمه ۱/۳۸ درصد به دست آورده است. به طور کلی بر اساس مطالعات فوق الذکر و مطالعات بسیار

1- Komatina

2- Cowell

3- Ford

4- Ontario

5- Ede

6- South Wales

7- Jacobson

8- Langmuir

زیادی که در این زمینه انجام شده است، ملاحظه می‌شود که در چشمه‌های کارستی با سامانه افشان، ضریب تغییرات درجه حرارت آب کم‌تر از ۵ درصد و در سامانه‌های کارستی مجرای بزرگ‌تر از ۵ درصد است.

– بررسی تغییرات هدایت الکتریکی

هدایت الکتریکی آب عبارت است از قابلیت هدایت جریان الکتریکی توسط حجم واحدی از آب به ابعاد واحد که معمولاً واحد سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود و به همین دلیل واحد هدایت الکتریکی را معمولاً میکروموس بر سانتی‌متر ذکر می‌کنند. هدایت الکتریکی آب با کل املاح محلول^۱ در آب رابطه مستقیمی دارد به این ترتیب که هرچه مقدار کل املاح محلول در آب بیش‌تر باشد، مقدار هدایت الکتریکی نیز بیش‌تر خواهد بود و بالعکس. از آنجایی که این پارامتر به عنوان نماینده مناسبی از کل املاح محلول آب می‌باشد، علاوه بر این به آسانی توسط یک هدایت‌سنج الکتریکی با دقت بسیار بالا قابل اندازه‌گیری است، یکی از مهم‌ترین پارامترهای کیفی در مطالعات منابع آب به شمار می‌رود. علاوه بر موارد فوق‌الذکر باید به این نکته بسیار مهم اشاره نمود که تفسیر مقدار و تغییرات غلظت تک‌تک یون‌های موجود در آب کار بسیار مشکلی است و در اغلب موارد امکان‌پذیر نمی‌باشد، در حالی که مقدار و تغییرات هدایت الکتریکی تقریباً در تمام محیط‌ها با خصوصیات جریان و آبخوان از جمله مقدار جریان، جهت جریان و قابلیت انتقال آبخوان به راحتی قابل تفسیر می‌باشد. مقادیر هدایت الکتریکی در آبخوان‌های آبرفتی و کارستی به‌طور بی‌شماری مورد مطالعه قرار گرفته است. در آبخوان‌هایی که در سازندهای سخت تشکیل شده‌اند نیز این مطالعات انجام شده است ولی به علت اهمیت کم‌تر این قبیل آبخوان‌ها تعداد این مطالعات در مقایسه با آبخوان‌های آبرفتی و کارستی بسیار اندک می‌باشد. در این بخش مقادیر و تغییرات هدایت الکتریکی در آبخوان‌های فوق‌الذکر به‌طور جداگانه ارائه می‌شود.

• هدایت الکتریکی در آبخوان‌های آبرفتی

مقدار هدایت الکتریکی آب زیرزمینی در مناطق آبرفتی در یک منطقه تحت تاثیر عوامل مختلفی است که مهم‌ترین آنها، کیفیت آب‌های تغذیه‌کننده آبخوان آبرفتی، تراوایی آبخوان، جنس مواد تشکیل‌دهنده آبخوان، وضعیت زمین‌شناسی حاکم، طول مسیر جریان آب زیرزمینی و مقدار جریان آب زیرزمینی می‌باشد. محدوده تغییرات هدایت الکتریکی در آبخوان‌های آبرفتی بسیار وسیع بوده و از چند صد تا چند هزار و حتی چند ده هزار میکروموس بر سانتی‌متر متغیر می‌باشد. مقدار هدایت الکتریکی آب چشمه‌ها باید به صورت خاص در هر منطقه مورد بررسی قرار گیرد. در حقیقت تغییرات هدایت الکتریکی در یک منطقه می‌تواند، اطلاعات مفیدی در خصوص عوامل تاثیرگذار ارائه دهد. به این ترتیب که بررسی تغییرات هدایت الکتریکی در یک منطقه می‌تواند مطالب مفیدی در خصوص تراوایی آبرفت‌ها، سرعت حرکت آب زیرزمینی، وجود یا عدم وجود مواد مخرب کیفیت آب (مواد با قابلیت انحلال زیاد)، وجود یا عدم وجود جریان‌های متمرکز آب زیرزمینی و مواردی از این قبیل ارائه نماید.

• هدایت الکتریکی در آبخوان‌های کارستی

اندازه‌گیری‌های مربوط به هدایت الکتریکی در آبخوان‌های کارستی در چهار دهه اخیر در سراسر دنیا به‌طور گسترده‌ای انجام شده است و نتایج حاصله برای شناخت دقیق‌تر آبخوان کارستی مورد استفاده قرار گرفته است (برای مثال:

1- Total Dissolved Solid

Shuster and White 1971, Newson 1973, Jacobson and Langmuir 1974, Scanlon and Thrailkill 1987, Raeis and Karami 1996, Raeisi and Karami 1997.

بر اساس نتایج حاصله از اندازه‌گیری‌های هدایت الکتریکی در آبخوان‌های کارستی می‌توان اظهار نظر نمود که محدوده تغییرات این پارامتر در مقایسه با آبخوان‌های آبرفتی به‌طور قابل توجهی کم‌تر است و مقدار آن معمولاً از حدود ۲۰۰ تا چند صد میکروموس بر سانتی‌متر متغیر است. مقدار هدایت الکتریکی در آبخوان‌های کارستی اساساً تحت تاثیر خصوصیات سامانه ورودی و آبخوان کارستی می‌باشد.

خصوصیات سامانه ورودی عمدتاً شامل، وجود یا عدم وجود فروچاله‌ها^۱ و گودی‌های مسدود^۲، درصد پوشش خاک و ضخامت آن، گسترش درزه‌ها و شکستگی‌های ساختاری و توسعه حفرات و مجاری انحلالی می‌شود. خصوصیات آبخوان عمدتاً شامل لیتولوژی آبخوان کارستی، شکل و اندازه آبخوان و سامانه غالب جریان در آبخوان می‌باشد. بررسی تغییرات هدایت الکتریکی در آبخوان‌های کارستی یکی از مهم‌ترین مطالعاتی است که برای تشخیص نوع سامانه غالب جریان در این آبخوان‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعات انجام شده، بیانگر این است که ضریب تغییرات این پارامتر در آبخوان‌های کارستی که سامانه غالب جریان از نوع مجرای^۳ است در مقایسه با آبخوان‌هایی که سامانه غالب جریان از نوع افشان^۴ است به مراتب بیشتر است (برای مثال: Shuster and White 1971, Newson 1973, Jacobson and Langmuir 1974, Scanlon and Thrailkill 1987, Raeisi and Karami 1996, Raeisi and Karami 1997).

به این ترتیب که ضریب تغییرات هدایت الکتریکی در آبخوان‌های کارستی با جریان مجرای معمولاً بیش‌تر از ۱۰٪ و در آبخوان‌های کارستی با جریان افشان کم‌تر از ۱۰ درصد می‌باشد.

• هدایت الکتریکی در سایر سازندهای سخت

از آنجایی که در اغلب سازندهای سخت آبخوان‌های عمده‌ای توسعه نیافته است، مطالعات کیفی و از جمله اندازه‌گیری هدایت الکتریکی در این قبیل آبخوان‌ها نسبتاً محدود است. در این آبخوان‌ها مقادیر هدایت الکتریکی عمدتاً تابع جنس مواد تشکیل‌دهنده آبخوان، تراوایی، شکل و اندازه آبخوان می‌باشد. به دلیل تنوعی که در لیتولوژی سازندهای سخت وجود دارد، در بین عوامل فوق‌الذکر، مهم‌ترین عامل تاثیرگذار بر مقدار هدایت الکتریکی جنس مواد تشکیل‌دهنده آبخوان می‌باشد و بقیه پارامترها عمدتاً در تغییرات هدایت الکتریکی نقش ایفا می‌کنند. مقادیر هدایت الکتریکی در این آبخوان‌ها از چند صد تا چند هزار و حتی چند ده هزار میکروموس بر سانتی‌متر متغیر است. برای مثال در چشمه‌های موجود در گرانیته شیرکوه یزد مقدار هدایت الکتریکی حدود ۳۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر است.

1- Sinkhole
2- Closed Depression
3- Conduit
4- Diffuse

۴-۲- بررسی نتایج کیفی

۴-۲-۱- کیفیت آب زیرزمینی و تغییرات آن

کیفیت آب زیرزمینی نتیجه کلیه فرآیندها و واکنش‌هایی است که از زمان تشکیل آن در ابر تا زمانی که به سطح زمین راه پیدا کند، بر روی آن عمل کرده است. کیفیت آب زیرزمینی می‌تواند بیانگر منشا آن، جنس لایه‌های زمین، تراوایی لایه‌ها، فاصله محل‌های تغذیه و تخلیه و اطلاعات مفید دیگری باشد.

در سنگ‌های آذرین بلورین غلظت املاح محلول در آب زیرزمینی معمولاً کم‌تر از ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد و به ندرت از ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر تجاوز می‌کند. در این سنگ‌ها نسبت منیزیم به کلسیم نسبتاً بالا بوده و مقدار سیلیس زیادی را شامل می‌شوند. در سنگ‌های ولکانیکی، املاح محلول همانند با سنگ‌های آذرین بلورین نسبتاً کم است. در این سنگ‌ها مقدار بی‌کربنات نسبتاً زیاد است. در ماسه سنگ‌ها و آهک‌ها نیز مقدار املاح محلول در آب زیرزمینی معمولاً پایین است. در این سنگ‌ها نیز مقدار بی‌کربنات زیاد می‌باشد. در سنگ‌های تبخیری مقدار املاح محلول بسیار زیاد است. در رسوبات آبرفتی، کیفیت آب زیرزمینی به پارامترهای مختلفی از قبیل منشا آب، تراوایی آبرفت و اختلاط آن با آب‌هایی که دارای منسایهای متفاوتی هستند، وابسته می‌باشد.

یون‌های عمده محلول در آب زیرزمینی شامل کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، کلر، بی‌کربنات، کربنات، سولفات و نترات می‌باشند. این یون‌ها با توجه به عوامل مختلفی از قبیل تغییرات سطح آب زیرزمینی و در نتیجه تغییرات دبی جریان آب زیرزمینی، تغذیه آبخوان و وجود یا عدم وجود جریان‌های زیرزمینی با منسایهای دیگر، می‌توانند تغییراتی را شامل شوند. بررسی تغییرات تک‌تک یون‌ها و تجزیه و تحلیل آنها تقریباً غیرممکن است. درخصوص بررسی تغییرات کیفیت آب زیرزمینی در اغلب مطالعات به تغییرات هدایت الکتریکی متوسل می‌شوند. درخصوص بررسی تغییرات هدایت الکتریکی آب زیرزمینی در آبخوان‌های مختلف در بخش (۳-۱-۶) به‌طور مفصل توضیح داده شده است.

۴-۲-۲- تغییرات کیفی آب‌های سطحی

کیفیت آب‌های سطحی عمدتاً به شرایط اقلیمی و زمین‌شناسی حوضه آبرگیر رودخانه وابسته می‌باشد. این دو پارامتر نقش عمده‌ای در تعیین مقدار دبی رودخانه‌ها و کیفیت آب آنها بازی می‌کند. به‌طوری که در اقلیم‌های مختلف و لیتولوژی‌های مختلف، مقدار آب جاری شده در رودخانه‌ها و کیفیت آب آنها متفاوت خواهد بود. در بیش‌تر رودخانه‌ها در شرایط عادی، جریان رودخانه همان جریان پایه^۱ می‌باشد. جریان پایه رودخانه از تراوش آب‌های زیرزمینی و یا ذوب برف‌ها و یخچال‌ها تشکیل می‌شود. در مواردی که بخش عمده جریان پایه رودخانه‌ها را تراوش آب‌های زیرزمینی تشکیل می‌دهد، کیفیت آب رودخانه‌ها از کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه تبعیت می‌کند و مقدار املاح محلول در آب در مقایسه با مواردی که بخش اعظم جریان پایه را آب ناشی از ذوب برف‌ها و یا یخچال‌ها تشکیل می‌دهد به مراتب بیش‌تر است. مقدار آب جریان پایه در حقیقت بخش کوچکی از کل جریان رودخانه می‌باشد و عمده جریان یک رودخانه به دوره‌های سیلابی^۲ آن مربوط می‌شود. در دوره‌های سیلابی اغلب رودخانه‌ها کیفیت بسیار مناسبی را شامل می‌شوند، به این

1- Base Flow

2- Flood Periods

معنا که مقدار املاح محلول آنها ناچیز می‌باشد. مقدار املاح محلول در دوره‌های سیلابی تقریباً در تمام رودخانه‌ها در مقایسه با جریان پایه آنها به مراتب کم‌تر می‌باشد. اندازه‌گیری‌های انجام شده در رودخانه‌های مختلف نشان می‌دهد که مقدار کل املاح محلول با دبی جریان رابطه معکوسی را نشان می‌دهد. کاتیون‌های غالب در آب تقریباً تمام رودخانه‌ها به ترتیب شامل کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم می‌باشند و آنیون‌های غالب به ترتیب شامل کلراید، سولفات، بی‌کربنات و کربنات می‌باشد. غلظت نیترات معمولاً در آب رودخانه‌ها ناچیز است، مگر اینکه آلاینده‌های با منشأ آلی به رودخانه‌ها وارد شوند. درجه حرارت آب رودخانه‌ها معمولاً از میانگین درجه حرارت هوای منطقه تبعیت می‌کند. رودخانه‌های با جریان اندک، سریع و کم عمق به سرعت به تغییرات درجه حرارت هوا پاسخ می‌دهند در حالی که رودخانه‌های با جریان زیاد، آرام و عمیق به آرامی به تغییرات درجه حرارت هوا پاسخ می‌دهند. مقدار pH رودخانه‌ها معمولاً ۷ و اندکی بالاتر از ۷ می‌باشد. مقادیر خیلی کم pH (۵ یا کم‌تر از آن) مربوط به رودخانه‌هایی می‌شود که از معادن زغال‌سنگ و نواحی مشابه سرچشمه می‌گیرند. اسیدهای آلی ناشی از تجزیه گیاهان نیز باعث کاهش pH آب رودخانه‌ها می‌شوند. بسیاری از پساب‌های صنعتی می‌توانند باعث بالا و یا پایین بردن مقدار pH آب رودخانه‌ها از حالت طبیعی گردند.

۴-۲-۳- تحلیل کموگراف چشمه‌ها

تجزیه و تحلیل کموگراف چشمه‌ها به‌طور قابل توجهی در آبخوان‌های کارستی انجام شده است و با توجه به این تجزیه و تحلیل‌ها اطلاعات بسیار مفیدی در خصوص شرایط هیدروژئولوژیکی آبخوان به دست آمده است. در چهار دهه گذشته به منظور شناخت رفتار هیدروژئولوژیکی آبخوان‌های کارستی در نقاط مختلف دنیا، مطالعات گسترده‌ای در خصوص تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌ها انجام گرفته است. این مطالعات عمدتاً با کار گزل^۱ و کریس^۲ آغاز شده است که جریان زیرزمینی در سنگ‌های کربناته را به جریان‌های باز و بسته تقسیم نمودند. در جریان‌های باز میزان گاز دی‌اکسید کربن مورد نیاز جهت انحلال کربنات کلسیم محدودیتی ندارد، در حالی که در جریان‌های بسته این طور نیست. وایت^۳ و اسمیت^۴ براساس رفتار فیزیکی و شیمیایی چشمه‌ها جریان‌های کارستی را به دو نوع مجرای^۵ و افشان^۶ تقسیم نموده‌اند. شاخص‌ترین تحلیل کموگراف چشمه‌ها مربوط به کار شاستر^۷ و وایت می‌شود. آنها تغییرات درجه حرارت، هدایت الکتریکی، یون‌های کلسیم، منیزیم، بی‌کربنات و بده را یک‌سال اندازه‌گیری کرده و سپس تغییرات فصلی را مورد بررسی قرار داده و چشمه‌های منطقه مورد مطالعه را بر اساس زمین‌شناسی، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی جریان، پستی و بلندی، وجود یا عدم وجود فروچاله^۸، غار و سایر پدیده‌های ژئومورفولوژیکی کارست به جریان‌های مجرای^۹ و افشان تقسیم نموده‌اند.

در تقسیم‌بندی شاستر و وایت تعاریف دقیق‌تری از دو جریان افشان و مجرای ارائه می‌شود. جریان افشان به صورت خطی^۹ از خلال شکستگی‌های بهم پیوسته کوچک‌تر از ۱ سانتی‌متر حرکت نموده است و در این نوع جریان عمدتاً چشمه‌ها متعدد، پراکنده و با بده کم می‌باشند. ضریب هدایت هیدرولیکی این جریان‌ها تقریباً در کل توده به صورت یکنواخت بوده و تغییرات خصوصیات فیزیکی

- 1- Garrels
- 2- Christ
- 3- White
- 4- Schmidt
- 5- Conduit
- 6- Diffuse
- 7- Shuster
- 8- Sinkhole
- 9- Laminar

و شیمیایی زیادی در چشمه‌ها مشاهده نمی‌شود. تغذیه این سامانه عمدتاً به‌طور مستقیم از طریق سنگ‌های کربناته و توده‌های خاک روی آنها صورت می‌گیرد. ضریب تغییرات سختی کل در این جریان‌ها، کم‌تر از ۵ درصد می‌باشد و در حوضه آبرگیر این چشمه‌ها، هیچ نوع پدیده ژئومورفولوژیکی کارستی مشاهده نمی‌شود. جریان‌های مجرای به صورت متلاطم^۱، از درون مجاری بزرگ با اندازه ۱ سانتی‌متر تا ۱ متر و گاهی بیش‌تر به صورت متمرکز حرکت نموده و عمدتاً در یک چشمه بزرگ تخلیه می‌شوند. ضریب هدایت هیدرولیکی این نوع جریان یکنواخت نمی‌باشد. تغذیه این جریان‌ها از طریق چاهک‌ها و درزه‌های موجود در سنگ‌های برهنه صورت گرفته و جریان آب داخل مجاری، در بعضی نقاط از روی رسوبات حمل شده در بستر کانال صورت می‌گیرد که در نتیجه سطح تماس آب با دیواره را کاهش می‌دهد. ضریب تغییرات سختی کل برای جریان‌های مجرای در محدوده ۱۰ تا ۲۴ درصد متغیر است. در جریان‌های افشان تغییرات مقدار مواد محلول نسبت به زمان به علت تماس بیش‌تر در مقایسه با جریان‌های مجرای کم‌تر بوده، ولیکن کل مواد جامد محلول در آنها بیش‌تر می‌باشد. ترنن^۲، اد و نیوسن^۳ تقسیم‌بندی شاستر و وایت را مورد تأیید قرار داده‌اند.

جاکوبسن^۴ و لانگ مویر^۵ به منظور تعیین نوع جریان در دو چشمه افشان و مجرای منطقه پنسیلوانیای آمریکا روابط زیر را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند:

الف- رابطه بین بارندگی و بده چشمه‌ها

ب- منبع و محل تغذیه آب‌های زیرزمینی، زمان اقامت آب در لایه آبدار و تغییرات کیفیت شیمیایی چشمه‌ها نسبت به زمان

ج- زمان تغییرات بده و کیفیت چشمه‌ها پس از هر بارندگی

با توجه به بده چشمه‌ها قبل و بعد از بارش و میزان بارندگی، محدوده حوضه آبرگیر چشمه‌ها را مشخص نموده و تأثیر بارش بر بده چشمه‌ها را نسبت به زمان در هیدروگراف چشمه‌ها نشان می‌دهد که جریان‌های افشان و مجرای سریعاً به بده حداکثر می‌رسد. در چشمه مجرای بده بعد از قله سیلابی سریعاً کاهش یافته، حال آنکه در چشمه افشان این کاهش تدریجی است. کاهش سریع بده در سامانه مجرای ناشی از وجود مجاری بزرگ بوده که آب به سرعت در آنها عبور می‌کند. تغییرات کیفی آب چشمه‌ها از قبل تا بعد از یک بارش مورد مطالعه واقع شده و علت آن را منابع مختلف تغذیه ذکر کرده‌اند. این منابع شامل آب زیرزمینی اولیه، آب‌های تغذیه شده از خلال خاک‌های نازک لایه‌ای اطراف چشمه، آب‌های فرو رو به درون چاهک‌ها و درزه‌های سنگ‌های کربناته برهنه و آب‌های تغذیه شده از خاک‌های ضخیم در فواصل دور نسبت به مظهر چشمه می‌باشد. با توجه به تفاوت موجود در تغذیه جریان‌های مجرای و افشان، رفتار کیفیت آب چشمه‌های این دو جریان در طی افزایش بده، متفاوت است. در مدت کوتاهی بعد از هر بارندگی، بده هر دو چشمه افشان و مجرای رو به افزایش می‌گذارد و همراه با آن میزان فشار جزئی دی‌اکسیدکربن و هدایت الکتریکی در هر دو چشمه زیاد می‌شود. علت این افزایش نفوذ آب بارندگی به داخل خاک‌های نازک لایه اطراف چشمه‌ها بوده که با عبور از این لایه‌ها، دی‌اکسیدکربن حاصل از فعالیت‌های زیستی و نمک‌های حاصل از تبخیر را در خود حل می‌نماید. با رسیدن این آب‌ها به سفره آب زیرزمینی و مظهر خروجی آن، میزان دی‌اکسیدکربن و هدایت الکتریکی در آب‌های خروجی افزایش می‌یابد. اما در حداکثر بده در چشمه مجرای مقدار

1- Turbulent

2- Ternan

3- Newson

4- Jacobsen

5- Longmuir

هدایت الکتریکی و فشار جری دی‌اکسیدکربن کاهش می‌یابد. علت این کاهش به خاطر آب دریافتی از مجاری بزرگ می‌باشد که از چاهک‌ها تغذیه شده و در نتیجه غلظت آن را کاهش می‌دهد. در حالیکه در چشمه افشان به علت عدم دریافت آب قابل ملاحظه از مجاری بزرگ، همچنان از هدایت الکتریکی و فشار جزیی دی‌اکسیدکربن بالا برخوردار می‌باشد. در مرحله کاهش بده در چشمه مجرای هدایت الکتریکی و فشار جزیی دی‌اکسیدکربن تدریجاً به حالت قبل از بارندگی صعود می‌کنند. این تغییر به علت کاهش میزان آب دریافتی از مجاری بزرگ و کاهش شیب هیدرولیکی بوده که باعث افزایش زمان اقامت و تماس آب در لایه آبدار و در نتیجه افزایش این دو پارامتر شده است. ولی در چشمه افشان بعد از حداکثر بده میزان هدایت الکتریکی و فشار جزئی دی‌اکسیدکربن کاهش می‌یابد. علت این کاهش تامین آب خروجی از نقاط دورتر از چشمه بوده است. در نهایت چشمه‌های مورد مطالعه به چهار دسته مجرای، مجرای - افشان، افشان و افشان نوع گیتزبرگ^۱ تقسیم‌بندی نموده که مشخصات آنها در جدول (۳-۴) خلاصه شده است. همچنین در این مطالعه تغییرات شیمیایی آب چشمه‌ها بر حسب ضریب تغییرات محاسبه شده است و نتایج آن در جدول (۴-۴) ارائه شده است.

جدول ۴-۳- تقسیم‌بندی اجمالی چشمه‌ها بر اساس نوع جریان

نوع چشمه	منبع تغذیه	مشخصات
مجرای	رودخانه‌های فرو رو (Sinking Stream)	هدایت الکتریکی کم‌تر از ۳۰۰ میکروموس با ضریب تغییرات کم‌تر از ۲۰۰ درصد و ضریب تغییرات بده بیش از ۱۵۰ درصد
مجرای افشان	چاهک‌ها و سامانه درزه‌ها و شکاف	هدایت الکتریکی بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ میکروموس با ضریب تغییرات بین ۱۰ تا ۲۰ درصد و ضریب تغییرات بده بیش از ۴۰ درصد
افشان	بستر دره‌ها و آب‌های زیرزمینی عمیق	هدایت الکتریکی بین ۴۰۰ تا ۶۰۰ میکروموس با ضریب تغییرات کم‌تر از ۱۰ درصد و ضریب تغییرات بده کم‌تر از ۳۰ درصد
افشان نوع گیتزبرگ	--	هدایت الکتریکی بین ۲۶۰ تا ۳۰۰ میکروموس با تغییرات کم و PH کم‌تر از ۷/۸

جدول ۴-۴- ضریب تغییرات پارامترهای فیزیکی و شیمیایی در چشمه‌های مجرای و افشان

متغیر	نوع افشان	نوع مجرای
Temp.	۱/۴	۲۶/۹
Ca	۶/۴	۲۵/۵
Ca	۲/۰	۲۷/۶
Mg	۴/۸	۲۶/۰
Total Hardness	۲۴/۳	۲۵/۹
Total Hardness	۹/۸	۲۵/۹
Na	۲/۷	۱۶/۰
Na	۱۷/۸	۲۸/۶
K	۱۷/۸	۱۲/۷
K	۲۹/۰	۱۷/۷
HCO ₃	۱۹/۹	۳۲/۰
HCO ₃	۶/۲	۲۳/۰
SO ₄	۰/۶	۱/۷
Cl	۲۶/۳	۱۷۵
NO ₃	۱۶/۱	۱۸/۴
Specific Conductance	۲/۴	۸/۷
PH		
Discharge		
SIC		
P _{CO2}		

۴-۳- تعیین موقعیت فضایی گسل‌ها، شکستگی‌ها و زون‌های خرد

۴-۳-۱- تعیین موقعیت فضایی گسل‌ها، شکستگی‌ها و زون‌های خرد شده

برای تعیین موقعیت فضایی درزه‌ها و گسل‌ها، همان‌طور که در فصل ۳ گفته شد، می‌توان از چندین نمودار استفاده نمود که مهم‌ترین آنها نمودارهای گل‌سرخ، هیستوگرام، استریوگرام و کنتورزنی می‌باشد. این روش‌ها به‌طور خلاصه در زیر ارائه می‌شوند.

- نمودار گل‌سرخ

در این روش می‌توان سه نوع نمودار گل‌سرخ را ترسیم نمود که شامل نمودار گل‌سرخ امتدادی، نمودار گل‌سرخ شیبی و نمودار گل‌سرخ جهت شیبی می‌شود. در زیر نحوه تهیه نمودار گل‌سرخ امتدادی برای دسته‌جات درزه توضیح داده می‌شود. در این نوع نمودار گل‌سرخ، امتداد و فراوانی درزه‌ها جهت ترسیم نمودار مورد نیاز می‌باشد. به این منظور در روی زمین با استفاده از کمپاس امتداد و تعداد درزه‌ها برداشت می‌شود. در اندازه‌گیری امتداد درزه‌ها باید دقت نمود که جهتی از درزه انتخاب شود که مقدار آزیموت آن درزه بین صفر و ۱۸۰ درجه قرائت شود. به عبارت دیگر تمام اندازه‌گیری‌ها به‌گونه‌ای باشند که بر روی یک نیمه نمودار گل‌سرخ واقع شوند. بعد از برداشت امتداد دسته‌جات درزه‌های غالب در منطقه مورد نظر، آنها را به تعدادی دسته، برای مثال با فواصل ۵ درجه‌ای، تقسیم نموده و سپس تعداد درزه‌ها در هر دسته مشخص شده و در جدولی مانند جدول (۴-۵) ارائه می‌شود.

جدول ۴-۵- فراوانی درزه‌ها در دسته درزه‌های مختلف

فراوانی درزه‌ها	دسته درزه‌ها (درجه)
۴	۰ - ۵
۳	۵ - ۱۰
۱۰	۱۰ - ۱۵
۱۲	۱۵ - ۲۰
۱	۲۰ - ۲۵
۲۰	۲۵ - ۳۰
۳۶	۳۰ - ۳۵
۷	۳۵ - ۴۰

نمودار گل‌سرخ استاندارد شامل دواير متحدالمرکزی می‌شود که بر روی یک دسته خطوط شعاعی منطبق شده‌اند. شعاع هر دایره، یک واحد بزرگ‌تر از شعاع دایره قبلی است. واحدهای طول در امتداد شعاع، معرف کمیت‌های اندازه‌گیری درزه است. این کمیت‌ها که با یک واحد منفرد در امتداد یک شعاع نشان داده می‌شوند، طوری انتخاب شده‌اند که تعداد کل درزه‌ها در غالب‌ترین دسته درزه، بر روی شبکه‌ای به شعاع ۱۰ سانتی‌متر نشان داده شود. معمولاً هر واحد معرف یک یا دو اندازه‌گیری است و جهت‌گیری هر شعاع نشانه یک گرای قطب‌نما می‌باشد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، شعاع‌ها به‌طور طبیعی در فواصل ۵ درجه‌ای از یکدیگر قرار گرفته‌اند. هر قطاع ۵ درجه‌ای یک فاصله رده‌ای نامیده می‌شود.

تعداد n درزه که گره‌های آنها در یک فاصله رده‌ای قرار می‌گیرند، به صورت یک قطاع پر شده رسم می‌شوند و طول n بر حسب مقیاس نمودار می‌باشد. از مزیت‌های اصلی نمودار گل‌سرخ این است که داده‌های رسم شده به سادگی قابل تجسم می‌باشد.

در مورد نمودار گل سرخی شیبی، طبقات شیب با فواصل معمولاً ۵ درجه‌ای انتخاب می‌شوند و در این حالت نمودار گل سرخی همانند با نمودار گل سرخی امتداد تهیه می‌شود با این تفاوت که داده‌های رسم شده در یک چهارم دایره (از صفر تا ۹۰ درجه) واقع می‌شوند. در مورد نمودار گل سرخی جهت شیبی، طبقات مربوط به جهت شیب معمولاً با فواصل ۵ درجه‌ای انتخاب شده و نحوه کار همانند با نمودار گل سرخی امتدادی است و داده‌های رسم شده می‌توانند از صفر تا ۳۶۰ درجه واقع شوند. در این نوع نمودار تنها فرقی که با نمودار گل سرخی امتداد وجود دارد این است که جهت شیب‌ها قرینه ندارند.

- هیستوگرام‌ها

برای درزه‌ها و گسل‌ها نیز می‌توان سه نوع هیستوگرام ترسیم نمود که شامل هیستوگرام امتدادی، هیستوگرام شیبی و هیستوگرام جهت شیبی می‌شود. در این جا رایج‌ترین آنها یعنی هیستوگرام امتدادی توضیح داده می‌شود. در هیستوگرام همانند نمودار گل سرخی از فواصل رده‌ای ۵ درجه‌ای استفاده می‌شود، با این تفاوت که به جای شبکه دایره‌ای شبکه مربعی استفاده می‌شود. در این روش امتداد به صورت بیرینگ قرائت می‌شود و در محور افقی هیستوگرام نمایش داده می‌شود و محور عمودی هیستوگرام درصد فراوانی داده‌ها می‌باشد. داده‌های ترسیم شده در این نمودار به سادگی نمودار گل سرخی قابل تجسم نیستند، ولی قله‌هایی با اختلاف بیرینگ اندک به سادگی تمیز داده می‌شوند.

در مورد هیستوگرام شیبی محور افقی مقدار شیب می‌باشد که از صفر تا ۹۰ درجه متغیر است و در خصوص هیستوگرام جهت شیبی محور افقی که جهت شیب می‌باشد از صفر تا ۳۶۰ درجه متغیر است. در مورد این دو نوع هیستوگرام محورهای عمودی همانند با هیستوگرام امتدادی می‌باشد.

- استریوگرام

برای تهیه استریوگرام، آزیموت یا بیرینگ و شیب مربوط به صفحه یا خط مورد نیاز است. در زیر نحوه تهیه استریوگرام برای یک صفحه (مثلاً درزه) ارائه می‌شود. فرض می‌شود که امتداد و شیب صفحه به ترتیب N80W و S۴۰ می‌باشد. ابتدا یک کاغذ شفاف بر روی شبکه استریونت قرار داده می‌شود و ۸۰ درجه در جهت غرب (خلاف عقربه‌های ساعت) شمارش می‌شود و یک علامت گذاشته می‌شود. سپس انتهای دیگر این صفحه (یعنی S80E) هم مشخص می‌شود. در مرحله بعد، کاغذ شفاف را چرخانده تا علامت‌های گذاشته شده (در N80W و S80E) در جهت NS قرار بگیرد. در این حالت جهت شیب در سمت چپ قرار می‌گیرد. بر روی قطر شرقی - غربی، ۴۰ درجه از دایره اولیه در سمت جهت شیب شمارش می‌شود (در این حالت در سمت چپ شبکه) تا اثر دایره بزرگ نشان‌دهنده صفحه با شیب S۴۰ مشخص شود. در روی قطر شرقی - غربی صفحه مربوط به جهت شیب به صفحه مورد نظر ما (مثلاً درزه) با یک پاره‌خط وصل می‌شود. در مرحله آخر کاغذ شفاف به حالت اولیه برگردانده می‌شود.

علاوه بر نمایش صفحه به صورت یک استریوگرام می‌توان هر صفحه را به صورت یک نقطه‌ای روی شبکه نشان داد. برای این کار امتداد عمود بر صفحه را در نظر گرفته و آن را قطب^۱ صفحه می‌نامند. برای ترسیم قطب صفحه، بعد از رسم صفحه در جهت

عمود بر صفحه و تعقر آن، به اندازه ۹۰ درجه شمارش می‌شود و نقطه به دست آمده قطب صفحه می‌باشد که با علامتی بر روی صفحه مشخص می‌شود.

برای رسم خط در شبکه استریونوت، امتداد و شیب خط مورد نیاز است (برای مثال خط S4SW,30). برای تهیه تصویر استریوگرام این خط ابتدا از علامت جنوب، ۴۵ درجه به طرف غرب (در جهت عقربه‌های ساعت) شمارش می‌شود و بر روی دایره یک علامت گذاشته می‌شود. سپس کاغذ شفاف را چرخانده تا علامت گذاشته شده در روی علامت جنوب قرار بگیرد. در این حالت به طرف مرکز و در امتداد قطر شمالی - جنوبی، ۳۰ درجه شمارش و علامت زده می‌شود. در نهایت کاغذ شفاف به حالت اولیه برگردانده می‌شود.

- نمودارهای هم‌تراز (کنتور دیاگرام‌ها)

نمودارهایی هستند که بر روی یک شبکه هم مساحت رسم می‌شوند و توزیع نقاط را در قسمت‌های مختلف شبکه نشان می‌دهند. برای رسم این نمودارها ابتدا قطب صفحات به صورت نقاطی روی شبکه ترسیم می‌شود، سپس با یکی از روش‌های اشمیت، کالسیبک، ملیس و کمب به صورت منحنی‌های تراز رسم می‌شوند. رایج‌ترین این روش‌ها، روش اشمیت می‌باشد. این روش برای داده‌های زیاد (بیش‌تر از ۴۰۰ داده) کارایی خوبی دارد. روش کالسیبک، یک روش سریع و آسان برای ترازبندی است و به ویژه برای استفاده در صحرا روش مناسبی می‌باشد. روش ملیس برای داده‌های اندک (کم‌تر از ۱۰۰ داده) و مجموعه‌هایی که تمرکز بالایی را نشان نمی‌دهند، کارایی خوبی دارد. روش کمب، روشی است که بر اساس آن می‌توان تحلیل‌های ترسیمی از مفهوم آماری تمرکز نقاط بر روی یک طرح هم مساحت انجام داد.

لازم به ذکر است که برای تعیین موقعیت فضایی گسل‌ها، درزه‌ها و شکستگی‌ها با استفاده از روش‌های ذکر شده در این بخش (شامل نمودارهای گل‌سرخ، هیستوگرام، استریوگرام و کنتور دیاگرام) می‌توان از نرم‌افزارهای موجود (برای مثال نرم‌افزار استریونوت) استفاده نمود.

۴-۳-۲- تعیین موقعیت فضایی گسل‌ها، شکستگی‌ها و زون‌های خرد شده

به‌طور کلی تعیین تداخل ثانویه به شکل گسل‌ها، شکستگی‌ها و زون‌های خرد شده در مطالعات فرار آب سدها از اهمیت خاصی برخوردار است. با استفاده از نتایج حاصل از بررسی‌های زمین‌شناسی و امور اکتشافی می‌توان موقعیت فضایی آنها را تا حد زیادی مشخص نمود.

- استفاده از زمین‌شناسی و حفاری‌های اکتشافی

همان‌طور که در فصول قبلی ذکر شد، در مرحله اول با استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای کلیه خطواره‌ها (گسل‌ها، شکستگی‌ها و زون‌های خرد شده) مشخص می‌شوند. سپس با استفاده از نقشه زمین‌شناسی منطقه و بازدیدهای صحرائی و بر اساس الگوی خطواره‌ها، مدل مفهومی حرکت آب در سازندهای منطقه طراحی می‌شود. در این مرحله تفسیر عملکرد خطواره‌ها به لحاظ هیدروژئولوژی با مقداری خطا همراه خواهد بود.

اگرچه معمولاً در مناطق خشک و نیمه خشک تعداد حفاری‌های اکتشافی بسیار محدود است، ولی در مراحل بعدی اطلاعات حاصل از این حفاری‌ها در تدقیق بیشتر مدل مفهومی نیاز می‌باشد. گسل‌ها، شکستگی‌ها و زون‌های خرد شده بر اساس وضعیت هندسی‌شان شامل طول، آزیموت، چگالی و تقاطعشان با یکدیگر طبقه‌بندی می‌شوند و با استفاده از نتایج حاصل از آزمایشات لوفران

و لوژن گمانه‌های اکتشافی مقایسه می‌شوند. در همین راستا توزیع گسل‌ها، شکستگی‌ها و زون‌های خردشده بر روی رزیدیاگرام نمایش داده می‌شود و بر اساس پتانسیل عبور آب نیز طبقه‌بندی می‌شوند.

- استفاده از نتایج ژئوفیزیک

در بررسی‌های ژئوفیزیکی، وجود ناهنجاری‌های مختلف نشانه تغییر خواص نسبت به ماتریکس یا زمینه در برگیرنده آن ناهنجاری است که معمولاً ناشی از تغییر لیتولوژی، وجود گسل، برخورد به سطح آب و یا برخی خطاهای عملیاتی است. بنابراین به‌کارگیری این روش‌ها به تنهایی کافی نبوده و باید از نتایج دیگر بررسی‌های اکتشافی نیز بهره جست. همان‌طور که در فصول قبلی ذکر شد، معمولاً مقاومت سنگ بستر ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ اهم متر، چگالی آن ۲/۷۵ تا ۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب و سرعت امواج لرزه‌ای در آنها ۴۰۰۰ تا ۷۰۰۰ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شده است. بنابراین با استفاده از روش‌های مختلف ژئوفیزیکی هر نوع ناهنجاری در سنگ بستر قابل اندازه‌گیری خواهد بود. ولی تعیین موقعیت گسل‌ها، شکستگی‌ها و زون‌های خردشده با استفاده از این روش‌ها دشوار بوده و با عدم قطعیت زیادی همراه می‌باشد. به عنوان مثال کاربردی‌ترین روش‌های ژئوالکترونیک در مطالعات هیدروژئولوژی از قبیل ونر و شلومبرژه که در تعیین موقعیت سنگ بستر، عمق برخورد به سطح آب و به‌طور نسبی در تفکیک لیتولوژی‌های آبخوان کارایی داشته، در تعیین موقعیت گسل‌ها، شکستگی‌ها و زون‌های خردشده چندان مفید نمی‌باشند. تنها آرایش داپل - داپیل با نفوذ عمقی مناسب (بسته به عمق قرارگیری گسل دارد) می‌تواند تا حد زیادی موقعیت شیب و امتداد گسل را نشان دهد.

۴-۴- نحوه ارتباط هیدرولیکی مخزن و تکیه‌گاه‌ها با منابع آب پایین‌دست و تشخیص زون‌های

ارتباطی

ارتباط هیدرولیکی مخزن و تکیه‌گاه‌های سد با منابع پایین‌دست ممکن است از طریق نهشته‌های آبرفتی، تشکیلات کارستی و یا سازندهای سخت باشد. این موارد به‌طور خلاصه در زیر ارائه می‌شوند.

- ارتباط هیدرولیکی مخزن و تکیه‌گاه‌های سد با منابع پایین‌دست از طریق نهشته‌های آبرفتی

اگرچه در اکثریت سدها تکیه‌گاه‌ها و مخازن از طریق سازندهای سخت یا سازندهای کارستی با منابع پایین‌دست ممکن است ارتباط هیدرولیکی داشته باشند، در بعضی از موارد ممکن است این ارتباط هیدرولیکی از طریق نهشته‌های آبرفتی انجام شود. ژاکوب^۱ و وانس^۲ ذکر کرده‌اند که اگرچه نهشته‌های آبرفتی در مقایسه با سازندهای کارستی و دیگر سازندهای سخت، موادی همگن قلمداد می‌شوند، اما آنها در مقیاس‌های مختلف از حدود اندازه دانه‌ها تا سامانه‌های رسوبگذاری مختلف ممکن است شامل ناهمگنی شوند. در نهشته‌های آبرفتی، بخش‌هایی که نفوذپذیری آنها حدود ۲ الی ۳ برابر نفوذپذیری توده خاک است، بخش اعظم سامانه جریان آب زیرزمینی را تشکیل می‌دهند و این بخش‌ها از نظر بررسی مقدار فرار و نشت آب حائز اهمیت می‌باشند. به منظور بررسی وجود یا

عدم وجود ارتباط هیدرولیکی بین مخزن و تکیه‌گاه‌های سد با منابع پایین‌دست در نهشته‌های آبرفتی به صورت زیر عمل می‌شود. اول این که با انجام بازدید صحرایی وجود یا عدم وجود زون‌های با تراوایی بیش‌تر مورد شناسایی قرار می‌گیرند. دوم اینکه با استفاده از اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی در چاهک‌های مشاهده‌ای و ترسیم نقشه هم‌پتانسیل سطح آب زیرزمینی وجود یا عدم وجود جریان زیرزمینی و جهت آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که بررسی سطح آب در داخل چاهک‌های مشاهده‌ای باید برای دو حالت (قبل از آب‌گیری و بعد از آب‌گیری مخزن) مورد توجه قرار داده شود.

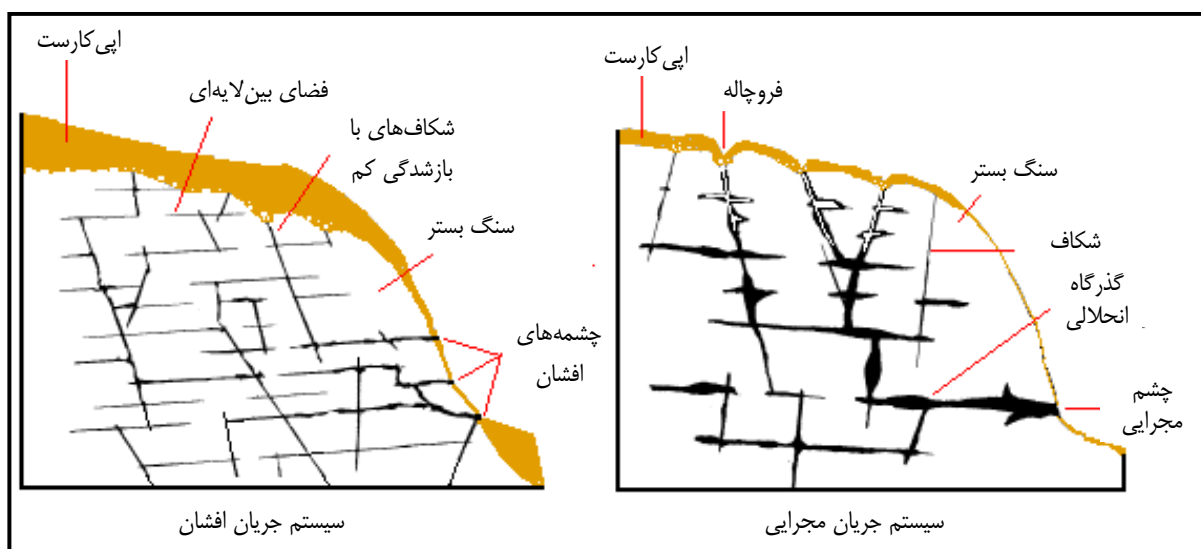
- ارتباط هیدرولیکی مخزن و تکیه‌گاه‌های سد با منابع پائین دست از طریق سازندهای کارستی

جریان آب زیرزمینی در سفره‌های کارستی از طریق خلل و فرج، و شکستگی‌ها، مجاری لوله مانند و دیگر مجاری بزرگ منتقل می‌شود. از آن جایی که شبکه انتقال‌دهنده آب معمولاً به‌طور یکنواختی توزیع نمی‌شوند، سفره‌های کارستی عموماً ناهمگن و ناهمسو هستند. سازندهای کارستی که ممکن است به عنوان تکیه‌گاه‌های سد و دیواره‌ها و یا بستر دریاچه سد مورد استفاده قرار گیرند، شامل سازندهای آهکی و دولومیتی می‌شوند. این سازندهای سخت دارای نفوذپذیری اولیه بسیار ناچیزی هستند، به‌گونه‌ای که می‌توان از آن چشم‌پوشی نمود. در حالی که نفوذپذیری ثانویه این قبیل سنگ‌ها می‌تواند بسیار قابل ملاحظه باشد و این نوع نفوذپذیری معمولاً در امتداد دسته‌جات درزه‌ها، زون‌های گسلی، مجاری انحلالی و دیگر فضاهای خالی متمرکز شده است. بر اساس مطالعات گسترده‌ای که درخصوص نفوذپذیری سازندهای کارستی انجام شده است، می‌توان نفوذپذیری این سازندها را به دو مولفه کلی تقسیم نمود:

۱- نفوذپذیری اولیه که در داخل بلوک‌های سنگی وجود دارد.

۲- نفوذپذیری ثانویه که شامل درزه‌ها و شکستگی‌ها، مجاری انحلالی و سایر فضاهای خالی می‌شود که بین بلوک‌های تقریباً غیرقابل نفوذ این سنگ‌ها ایجاد شده‌اند.

مقدار نفوذپذیری و توسعه آنها در سازندهای کارستی به درجه کارستی شدن این سازندها وابسته می‌باشد. بنابراین به منظور ارزیابی ارتباط هیدرولیکی مخزن و تکیه‌گاه‌های سد از طریق سازندهای کارستی باید نوع سامانه کارستی و در نتیجه درجه توسعه کارست در منطقه مورد نظر شناسایی شود. به‌طور کلی در داخل کارست دو نوع جریان آب زیرزمینی وجود دارد. نوع اول، جریانی است که از مجاری، درزه و شکاف‌های با بازشدگی نسبتاً زیاد (بزرگ‌تر از یک سانتی‌متر) عبور می‌کند. این نوع جریان متلاطم است و به آن جریان مجرای^۱ گفته می‌شود (شکل ۴-۴). این نوع جریان که همانند با جریان آب در سامانه‌های لوله‌ای^۲ می‌باشد در لایه‌های بالایی نواحی کارستی توسعه یافته رخ می‌دهد. از ویژگی‌های مهم این جریان درجه ناهمگنی بالا و درجه اتصالات اندک شبکه انتقال‌دهنده آب می‌باشد. نوع دوم جریان از داخل درزه و شکاف‌های کوچک با بازشدگی نسبتاً کم (کوچک‌تر از یک سانتی‌متر) و خلل و فرج به هم پیوسته عبور می‌کند. این نوع جریان عموماً به صورت خطی می‌باشد و به آن جریان افشان گفته می‌شود (شکل ۴-۴). این نوع جریان همانند با جریان در سفره‌های دانه‌ای می‌باشد و از قانون داری تبیعت می‌کند.



شکل ۴-۴- سامانه‌های جریان کارستی

به منظور ارزیابی سامانه جریان کارستی، محققین مختلف از معیارهای گوناگونی استفاده کرده‌اند. مهم‌ترین این معیارها عبارتند از تغییرات زمانی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب چشمه‌ها، آنالیز هیدروگراف چشمه، خصوصیات ژئومرفولوژیکی گستره کارستی، محدوده اثر مقیاس، جمع‌بندی معیارهای متعددی که مرتبط با شرایط هیدروژئولوژیکی، هیدروژئولوژیکی، و شکل زمین در گستره کارستی می‌باشند، و با استفاده از نتایج آزمایش پمپاژ و محاسبه درجه ناهمگنی و درجه اتصالات مجاری انتقال‌دهنده آب در آبخوان

- ارتباط هیدرولیکی مخزن و تکیه‌گاه‌های سد با منابع پایین‌دست از طریق سایر سازندهای سخت

بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی سازندهای سخت به خاطر ناهمگنی آنها مشکل می‌باشد. نانوایلر^۱ ذکر کرده است که سازندهای سخت تفاوت فاحشی با نهشته‌های آبرفتی دارند. در سازندهای سخت نفوذپذیری قطعات سنگی^۲ در مقایسه با سامانه سطوح لایه‌بندی، مجاری انحلالی، درزه‌ها و شکستگی‌ها قابل اغماض است. از این رو بدون خطا می‌توان نتیجه گرفت که تراوش و نشت آب در سازندهای سخت فقط از میان ناپیوستگی‌های سنگ (شامل انواع مختلف شکستگی‌ها، سطوح لایه‌بندی و مجاری انحلالی) صورت می‌گیرد. با عنایت به مطالب فوق، ملاحظه می‌شود که در سازندهای سخت بررسی انواع مختلف شکستگی‌ها، سطوح لایه‌بندی و مجاری انحلالی می‌تواند اطلاعات کافی در خصوص وضعیت تراوایی سازندهای سخت به ما ارائه دهد.

در سازندهای سخت که نفوذپذیری آنها عمدتاً به درزه‌ها و شکستگی‌ها محدود می‌شود، چگالی درزه‌ها و شکستگی‌ها، جهت‌یابی درزه‌ها و شکستگی‌ها، بازشدگی، شکل و پرشدگی آنها مهم‌ترین پارامترهایی هستند که بر میزان نفوذپذیری این قبیل سازندها تاثیر می‌گذارند. برخلاف سازندهای کارستی که با گذشت زمان نفوذپذیری شکستگی‌ها و مجاری انحلالی به دلیل عملکرد انحلال بیشتر می‌شود، در بیشتر سازندهای سخت میزان نفوذپذیری به دلیل پرشدگی درزه‌ها و شکستگی‌ها با زمان کاهش پیدا می‌کند. در سازندهای سخت به دلیل این که از بازشدگی شکستگی‌ها با عمق کاسته می‌شود، قسمت اعظم جریان در ۹ متر ابتدایی رخ می‌دهد و در اعماق حدود ۳۰ متر مقدار جریان به صفر می‌رسد. شناسایی سامانه جریان در سازندهای سخت با روش‌های ریاضی بسیار مشکل است و برای این امر می‌توان از اطلاعات مربوط به

1- Nonveiller

2- Rock Blocks

مغزه‌های حفاری، آزمایش پمپاژ، آزمایش ردیابی، اکتشافات ژئوفیزیک و آزمایش لوژان استفاده نمود. در میان سازندهای سخت، سنگ‌های ولکانیکی به ویژه سنگ‌های بازالتی دارای تراوایی بالایی هستند. سنگ‌های آذرین درونی و به ویژه سنگ‌های دگرگونی اغلب دارای تراوایی بسیار پایینی می‌باشند و این قبیل سازندها به لحاظ فرار و نشت آب مورد توجه قرار نمی‌گیرند. مجیاس^۱ و لپزگتا^۲ سازندهای سخت با نفوذپذیری کم را از دیدگاه نفوذپذیری به چهار گروه طبقه‌بندی نموده‌اند.

گروه اول: سازندهای سخت با نفوذپذیری بسیار کم، که نفوذپذیری آنها کم‌تر از 1×10^{-12} متر بر ثانیه می‌باشد.

گروه دوم: سازندهای سخت با نفوذپذیری کم، که نفوذپذیری آنها از 1×10^{-12} تا 1×10^{-9} متر بر ثانیه متغیر می‌باشد.

گروه سوم: سازندهای سخت با نفوذپذیری نسبتاً کم، که نفوذپذیری آنها از 1×10^{-9} تا 1×10^{-7} متر بر ثانیه متغیر می‌باشد.

گروه چهارم: سازندهای سخت با متوسط، که نفوذپذیری آنها از 1×10^{-7} تا 1×10^{-5} متر بر ثانیه متغیر می‌باشد.

۴-۵- تعیین وضع تراوایی زون‌های ارتباطی

پس از شناسایی زون‌های ارتباطی در محدوده مخزن و تکیه‌گاه‌های سد، همان‌طور که در بخش ۴-۴ ذکر شد، لازم است که مقدار تراوایی این زون‌های ارتباطی به طریقی تعیین شود. نحوه برآورد مقدار نفوذپذیری در زون‌های ارتباطی (زون‌های با تراوایی نسبی بالا) با عنایت به این که این زون‌ها در نهشته‌های آبرفتی و یا در سازندهای سخت واقع شده‌اند به‌طور جداگانه در زیر ارائه می‌شود.

- برآورد مقدار تراوایی زون‌های ارتباطی موجود در نهشته‌های آبرفتی

در نهشته‌های آبرفتی برای برآورد مقدار تراوایی زون‌های ارتباطی می‌توان از یکی از دو روش زیر استفاده نمود:

• استفاده از آزمایش پمپاژ

در نهشته‌های آبرفتی بهترین و ساده‌ترین روش برآورد مقدار تراوایی زون‌های ارتباطی، انجام آزمایش پمپاژ و تجزیه و تحلیل داده‌های حاصله از این آزمایش می‌باشد. از آنجایی که در این‌جا منظور زون‌های تراوایی است که در بین یک مجموعه‌ای از مواد با تراوایی کم‌تر واقع شده‌اند، بنابراین باید توجه کرد که این نوع ابخوان در چنین شرایطی از نوع ابخوان‌های محصور^۳ می‌باشد و باید برای آنالیز داده‌های آزمایش پمپاژ از روش‌های خاص ابخوان‌های محصور استفاده شود (رجوع شود به Kruseman and de Ridder 1992).

• استفاده از آزمایش لوفران

همان‌طور که در بخش ۳-۲-۲ گفته شد، این آزمایش برای تعیین میزان نفوذپذیری در مواد غیرپیوسته و همچنین سنگ‌های سست و خرد شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. توضیحات مفصل درخصوص این آزمایش در بخش ۳-۲-۲ ارائه شده است. دقت این روش در مقایسه با آزمایش پمپاژ کم‌تر می‌باشد.

- برآورد مقدار تراوایی زون‌های ارتباطی موجود سازندهای سخت

در سازندهای سخت برای برآورد مقدار تراوایی زون‌های ارتباطی، بسته به خصوصیات این زون‌ها، از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده نمود که مهم‌ترین آنها به‌طور مختصر در زیر ارائه شده اند:

• استفاده از آزمایش لوژن

همان‌طور که در بخش ۳-۲-۲ گفته شد، این آزمایش برای تعیین میزان نفوذپذیری سنگ کف یا توده‌های سنگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. توضیحات مفصل درخصوص این آزمایش در بخش ۳-۲-۲ ارائه شده است.

• استفاده از آزمایش پمپاژ

در صورتی که زون تراوا به صورت یک زون کاملاً خرد شده با درزه و شکستگی‌های فراوان و همچنین نسبتاً عریض باشد (حداقل چند متر عرض آن باشد)، یکی از روش‌های مناسب برآورد نفوذپذیری این زون استفاده از آزمایش پمپاژ می‌باشد. در این سازندها همانند نهشته‌های آبرفتی بحث قرارگیری زون تراوا در یک مجموعه‌ای از سنگ‌های با تراوایی کم‌تر مطرح می‌باشد، بنابراین باید توجه کرد که این نوع آبخوان در چنین شرایطی از نوع آبخوان‌های محصور می‌باشد و باید برای آنالیز داده‌های آزمایش پمپاژ از روش‌های خاص آبخوان‌های محصور استفاده شود.

بعضی از محققین به‌طور صریح یا به‌طور ضمنی روش‌های مرسوم تایس و کوپر - جیکوب را برای آنالیز داده‌های آزمایش پمپاژ در سازندهای سخت پیشنهاد نموده‌اند (برای مثال Jones 1999 و Dillon et al. 2001). اگرچه در بسیاری از موارد رفتار کلی سفره‌های کارستی همانند سفره‌های دانه‌ای است و به‌کارگیری روش‌های فوق‌الذکر برای آنالیز داده‌های آزمایش پمپاژ در این قبیل آبخوان‌ها دقت کافی را شامل می‌شود. در هر حال، در بعضی از موارد که منحنی افت - زمان شامل سه بخش می‌شود کاربرد روش‌های مرسوم برای آنالیز داده‌های آزمایش پمپاژ در سفره‌های کارستی خطاهای قابل توجهی ایجاد خواهد نمود. در این قبیل سفره‌ها منحنی افت - زمان از الگو سه بخشی تئوری تخلخل دوگانه پیروی می‌کند و به همین دلیل داده‌های آزمایش پمپاژ باید با روش‌هایی که اساس آنها تئوری مذکور می‌باشد، (مانند روش Moench 1984) آنالیز شوند.

۴-۶- برآوردی از ارتباط هیدرولیکی مخزن و تکیه‌گاه‌های سد با منابع آب مجاور

به منظور بررسی ارتباط هیدرولیکی مخزن و تکیه‌گاه‌های سد با منابع آب مجاور، می‌توان از یکی از روش‌های زیر و یا تلفیقی از آنها استفاده نمود.

- استفاده از نتایج بخش ۴-۴

چنانچه مطالعات مربوط به بخش ۴-۴ نشان دهد که زون‌های ارتباطی در محدوده مخزن و تکیه‌گاه‌های سد وجود دارد، احتمال اینکه منطقه مورد نظر (مخزن و تکیه‌گاه‌های سد) از طریق این زون‌های تراوا با منابع آب مجاور در پائین دست ارتباط هیدرولیکی داشته باشند، نسبتاً زیاد می‌شود.

- بررسی تغییرات سطح آب و ارتباط آن با دبی منابع آب مجاور

در بسیاری از تحقیقات، تغییرات سطح آب زیرزمینی برای بررسی وجود و یا عدم وجود ارتباط هیدرولیکی بین دو نقطه مجاور هم مورد استفاده قرار گرفته است. چنانچه تغییرات سطح آب با دبی منابع آب مجاور رابطه مستقیمی داشته باشد، به این ترتیب که با بالا آمدن و پائین رفتن سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد نظر (مخزن و تکیه‌گاه‌های سد)، دبی جریان در منابع آب مجاور منطقه مورد نظر به‌طور هماهنگی افزایش و کاهش پیدا کند، احتمال وجود ارتباط هیدرولیکی بین دو نقطه مذکور وجود دارد به خصوص اگر فواصل زمانی اوج تغییرات با یکدیگر همخوانی داشته باشند.

- بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی

در این خصوص، اندازه‌گیری پارامترهای مختلف فیزیکی و شیمیایی آب از قبیل هدایت الکتریکی، اسیدیته، درجه حرارت، کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی در منطقه مورد نظر و منابع آب مجاور می‌تواند اطلاعات مفیدی مبنی بر وجود یا عدم وجود ارتباط هیدرولیکی مخزن و تکیه‌گاه‌های سد با منابع آب مجاور ارائه دهد. در میان خصوصیات هیدروژئوشیمیایی، تغییرات هدایت الکتریکی و نسبت‌های یونی (برای مثال نسبت کلر به مجموع آنیون‌ها و یا نسبت سدیم به مجموع کاتیون‌ها و دیگر نسبت‌های آنیونی و کاتیونی) در مقایسه با غلظت تک تک کاتیون‌ها و آنیون‌ها بسیار مفیدتر و گویاتر می‌باشد. چنانچه تغییرات هدایت الکتریکی و همچنین تغییرات نسبت‌های یونی در منطقه مورد نظر با منابع آب مجاور همخوانی داشته باشند، به احتمال قوی ارتباط هیدرولیکی وجود دارد. ذکر این نکته ضروری است که چنانچه دو یا چند عامل وجود یا عدم وجود ارتباط هیدرولیکی مخزن و تکیه‌گاه‌های سد با منابع آب مجاور را به وضوح بیان نمایند (یعنی همدیگر را تأیید نمایند)، احتمال وجود یا عدم وجود ارتباط هیدرولیکی بسیار زیاد خواهد بود. برای مثال اگر تغییرات هدایت الکتریکی در منطقه مورد نظر با تغییرات هدایت الکتریکی در منابع آب مجاور هم جهت باشد و علاوه بر این تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد نظر با تغییرات دبی منابع آب مجاور همخوانی داشته باشد، احتمال ارتباط هیدرولیکی بسیار بالا می‌باشد.

هوانگ^۱ و همکارانش با استفاده از تغییرات هدایت الکتریکی و دریافت مقادیر اوج هدایت الکتریکی آب برای بررسی ارتباط هیدرولیکی بین آب دریا و فروچاله‌های موجود در یک سازند سخت ساحلی استفاده نمودند.

- بررسی ایزوتوپ‌های محیطی

چگونگی استفاده از ایزوتوپ‌های محیطی مناسب در نشریه‌های شماره‌های ۲۶۳- الف و ۲۵۷- الف به تفصیل ارائه شده است.

- استفاده از ردیاب‌های مصنوعی

چگونگی استفاده از ردیاب‌های مصنوعی در نشریه‌های شماره‌های ۲۶۳- الف و ۲۵۷- الف به تفصیل ارائه شده است.

۴-۷- تهیه مدل مفهومی اولیه

به منظور تهیه مدل مفهومی اولیه هیدروژئولوژیکی آبخوان، محققین مختلف اطلاعات متنوعی را در نظر گرفته‌اند که این اطلاعات کم و بیش یکسان می‌باشند. متخصصین سازمان زمین‌شناسی آمریکا اظهار نموده‌اند که برای تهیه مدل مفهومی هیدروژئولوژیکی در یک آبخوان درزه و شکافدار ترکیبی از داده‌ها و اطلاعات زمین‌شناسی، برداشت صحرایی درزه‌ها، ژئوفیزیک سطحی و زیرسطحی، آزمایشات هیدرولیکی و روش‌های ژئوشیمیایی و ایزوتوپی لازم می‌باشد. پولیدو^۱ و همکارانش با ترکیب اطلاعات مربوط به زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، هیدرولوژی، و هیدرولیک یک مدل مفهومی هیدروژئولوژیکی برای یک سازند سخت در پرتماث آمریکا ارائه نموده‌اند. در این مدل مفهومی، اطلاعات زمین‌شناسی شامل مجموعه چینه‌شناسی، کانی‌شناسی، زمین‌شناسی ساختمانی، و آنالیز مغزه‌های حفاری (شامل مطالعات میکروسکوپی مقاطع نازک) می‌شود. لوگ‌های ژئوفیزیک برای تعیین فواصل مختلف در چاه‌های حفاری شده جهت آزمایش‌های هیدرولیکی است. اطلاعات هیدروژئولوژیکی شامل بارندگی، درجه حرارت، فشار هوا، سطح آب در چند چاهک مشاهده‌ای می‌باشد. اطلاعات هیدرولیکی شامل تعداد زیادی آزمایش پمپاژ و لوژن می‌باشد. لی^۲ و همکارانش با بررسی اطلاعات مربوط به زمین‌شناسی، سطح آب، درجه حرارت آب، هدایت الکتریکی، اسیدیت، و آزمایش‌های هیدرولیکی مساله فرار آب از بستر و دیواره مخزن سد آلمون در کره جنوبی را تجزیه و تحلیل نموده‌اند.

با عنایت به موارد ذکر شده توسط محققین مختلف، به نظر می‌رسد برای تهیه یک مدل مفهومی اولیه لازم است که اطلاعاتی درخصوص زمین‌شناسی، برداشت صحرایی درزه‌ها و شکستگی‌ها، ژئوفیزیک سطحی و زیر سطحی، آزمایشات هیدرولیکی و اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب در منطقه وجود داشته باشد. البته بسته به امکانات موجود و اهداف طرح می‌تواند این اطلاعات محدودتر و یا وسیع‌تر در نظر گرفته شوند.

در مدل مفهومی اولیه هیدروژئولوژیکی آبخوان باید مقاطع زمین‌شناسی، زون‌های تراوا، وجود یا عدم وجود ارتباط هیدرولیکی مخزن و تکیه‌گاه‌های سد با منابع آب مجاور، نیمرخ‌هایی از خصوصیات کمی (برای مثال سطح آب زیرزمینی) و کیفی (برای مثال تغییرات زمانی هدایت الکتریکی در محدوده مخزن و تکیه‌گاه‌های سد و همچنین برای منابع آب مجاور)، جهت جریان زیرزمینی قبل و بعد از آبیگری مخزن سد ارائه شود.

1- Pulido

2- Lee

فصل ۵

ردیابی

۱-۵- کلیات

نظر به این که مطالعات ردیابی در نشت و فرار آب از سدها و مخازن آنها تفاوت چندانی با مطالعات ردیابی در آب‌های زیرزمینی ندارد و اساساً بررسی نشت و فرار آب از سدها به نوعی مطالعات هیدروژئولوژی محسوب می‌شود، لذا به منظور رعایت شرط ایجاز، از تکرار بخش‌های ارائه شده در نشریات قبلی خودداری شده و ضمن اشاره خلاصه‌وار به آنها تنها در صورت لزوم در برخی از قسمت‌ها توضیحات مختصری ارائه شده است.

اصولاً ردیاب‌ها مواد یا انرژی هستند که به منظور تعیین توزیع زمانی و مکانی آب و مواد آلاینده آن در منابع آب به کار می‌روند. بر همین اساس در بررسی فرار آب از سدها نیز کاربرد وسیعی دارند.

۲-۵- کاربرد انواع ردیاب‌ها در بررسی نشت و فرار آب از سدها و مخازن

انواع ردیاب‌های متداول در مطالعات آب‌های زیرزمینی و کاربرد هر یک در بررسی نشت و فرار آب از سدها و مخازن به شرح زیر می‌باشد.

۱-۲-۵- ردیاب‌های محیطی

- ایزوتوپ‌های محیطی پایدار نظیر اکسیژن-۱۸، دوتریم، کربن-۱۳ و ...
 - ایزوتوپ‌های محیطی پرتوزا (ناپایدار) نظیر کربن-۱۴، تریتیوم و ...
 از بین ردیاب‌های فوق اکسیژن-۱۸، دوتریم و تریتیوم جز مولکول آب هستند. ردیاب‌های فوق در تعیین منشأ و سن آب به کار می‌روند.

- ردیاب‌های میکروارگانیک نظیر باکتری و ویروس‌ها
 این‌گونه ردیاب‌ها کاربرد محدودی دارند و به دلیل خطرات احتمالی نباید در سدها و مخازن پس از آنگیری به کار گرفته شوند.
 - یون‌های موجود در آب
 - دمای آب

این ردیاب‌ها در مقیاس محلی و بیش‌تر در بررسی نشت در بدنه سدهای خاکی به کار می‌روند.

۲-۲-۵- ردیاب‌های مصنوعی

- ردیاب‌های رنگی فلئورسنت: این گروه از ردیاب‌ها با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد و قابلیت‌های مناسبی که دارند، جز کاربردی‌ترین ردیاب‌ها در بررسی نشت و فرار آب از سدها و مخازن به شمار می‌رود. توضیحات بیش‌تر در مورد این ردیاب‌ها در بخش ۲-۲ نشریه شماره ۲۶۳- الف و بخش ۳-۲ نشریه شماره ۲۵۷- الف ارائه شده است.
 - ردیاب‌های ایزوتوپی پرتوزا نظیر: کبالت-۶۰، کبالت-۵۸، کرم-۵۱، تریتیوم و مواد پرتوزای گاما. استفاده از این قبیل ردیاب‌ها به دلیل مشکلات زیست محیطی و نیاز به تجهیزات پیشرفته جهت اندازه‌گیری در کشور ما چندان متداول نیستند.

- ایزوتوپ‌های قابل فعال شدن نظیر: برم-۸۰، لانتانیوم-۱۳۹، ایندیوم-۱۱۶، ید-۱۳۰. استفاده از این گروه از ردیاب‌ها نیز مشابه مورد قبلی چندان متداول نیستند.
- ردیاب‌های جامد (نامحلول) نظیر: باکتری‌ها، مخمرها، ویروس‌ها و بیوکلوئیدها. استفاده از این گروه از ردیاب‌ها نیز مشابه مورد قبلی چندان متداول نیستند. علاوه بر این در مناطقی که خطر ابتلا به بیماری‌ها وجود داشته باشد، استفاده از این ردیاب‌ها با محدودیت جدی روبرو است.
- نمک‌های معدنی نظیر: نمک طعام، کلرور کلسیم، کلرور پتاسیم، کلرور لیتیم. مهم‌ترین محدودیت در کاربرد این گروه، لزوم استفاده از آنها در حجم زیاد است که در عملیات صحرائی به خصوص در مناطق دور از دسترس مشکلاتی را ایجاد می‌نماید.
- پاک‌کننده‌ها، هالوکربن‌ها، اسیدهای آلی فلتوری شده، کلوروفلوروکربن (CFC) و آب گرم و آب سرد نیز از جمله دیگر ردیاب‌هایی هستند که کاربردهای محدودی دارند.

۳-۵- ملاحظات ایمنی در پروژه‌های ردیابی

- به منظور حفظ ایمنی افراد و صحت انجام عملیات ردیابی در به‌کارگیری هر ردیاب ملاحظات و ضوابط ویژه‌ای باید مد نظر قرار گیرد.
- تشکیل سه گروه مجزا تحت عنوان تزریق، نمونه‌برداری و اندازه‌گیری که هیچ‌گونه تماس فیزیکی در حین اجرای عملیات با یکدیگر نداشته باشند.
- استفاده از لباس مناسب، ماسک، عینک، چکمه و دستکش در حین عملیات تزریق و جلوگیری از هرگونه تماس مستقیم افراد با ماده ردیاب.
- برپایی چادر جهت آماده‌سازی ماده ردیاب و جلوگیری از انتشار مواد ردیاب به سایر نقاط توسط باد و غیره.
- استفاده از بشکه‌های شیردار جهت سهولت انجام عملیات تزریق.
- از بین بردن و سوزاندن کلیه لباس‌های روپوش و لوازم مورد استفاده افراد شرکت‌کننده در تیم تزریق (توضیح این‌که ممکن است در برخی از موارد این لوازم به نحوی توسط افراد محلی به نقاط نمونه‌برداری منتقل شوند و صحت آزمایش را مخدوش نمایند).
- توجه به زمان از بین رفتن ماده ردیاب و ارسال به موقع نمونه‌ها.
- توجه زیاد به نحوه برچسب‌گذاری و دقت در درج مشخصات و زمان نمونه‌برداری.
- جدایش نمونه‌هایی که احتمال وجود ماده ردیاب در آنها نسبت به سایر نمونه‌ها بیش‌تر باشد.

۴-۵- ملاحظات زیست محیطی در پروژه‌های ردیابی

- به‌طور کلی ردیاب‌ها باید از هر نظر برای موجودات زنده و محیط زیست بی‌خطر باشند و بر اساس قوانین موجود هرگونه تغییر بو، رنگ و مزه آب ممنوع می‌باشد. جزییات بیش‌تر در بندهای ۲-۵ نشریه شماره ۲۵۷-الف و ۳-۵ نشریه شماره ۲۶۳-الف ارائه شده است.

۵-۵- حداقل تخصص‌های مورد نیاز در گروه کاری

این قسمت به تفصیل در بندهای ۳-۴ نشریه شماره ۲۵۷-الف و ۴-۱ نشریه شماره ۲۶۳-الف ارائه شده است.

۵-۶- لوازم و تجهیزات مورد نیاز

در بندهای ۱-۹، ۲-۹ و ۳-۹ نشریه شماره ۲۵۷-الف و بند ۱۰ نشریه شماره ۲۶۳-الف به‌طور کامل ارائه شده است.

۵-۷- نقد مطالعات ردیابی قبلی

به‌طور کلی به منظور حصول بهترین نتایج، هر عملیات ردیابی (در صورت وجود) نیازمند بررسی و نقد آزمایشات قبلی و مشخص نمودن نقاط ضعف و قوت آنها می‌باشد. برخی از مواردی که در نقد مطالعات ردیابی قبلی باید مشخص گردند، عبارتند از:

- آیا با توجه به شرایط هیدروژئولوژی منطقه ماده مناسبی جهت ردیابی انتخاب شده است؟ چرا؟
- آیا به مقدار کافی ماده ردیاب تزریق شده است؟
- آیا زمان انجام عملیات مناسب بوده است (فصل تر یا خشک)؟
- آیا نقاط مناسبی جهت تزریق و نمونه‌برداری انتخاب شده است؟
- آیا نمونه‌برداری به‌طور دقیق و کامل انجام شده است؟
- آیا حمل و ارسال نمونه‌ها به آزمایشگاه به‌درستی و به موقع انجام شده است؟
- شرایط اندازه‌گیری‌ها چگونه بوده است؟

و بسیاری از جزئیات دیگر که بر روی نتایج تاثیرگذار هستند، باید کنترل شوند و در نهایت براساس کلیه موارد فوق عملیات ردیابی جدید طراحی و اجرا شود.

۵-۸- چگونگی انتخاب نوع ردیاب

این قسمت به تفصیل در بندهای ۱-۵ نشریه شماره ۲۵۷-الف و ۵ نشریه شماره ۲۶۳-الف ارائه شده است.

۵-۹- عوامل موثر در تعیین تعداد ردیاب تزریقی

با توجه به هدف پروژه می‌توان از چندین ردیاب در یک عملیات ردیابی استفاده نمود. برخی از عوامل موثر در تعیین تعداد ردیاب تزریقی شامل موارد زیر می‌شود:

- بررسی ارتباط چندین نقطه (ورودی) با چندین نقطه دیگر (خروجی).
- بررسی تقدم و تاخر زمان ظهور ردیاب‌ها در یک نقطه (رتبه‌بندی ظهور ردیاب‌ها).
- صرفه‌جویی در هزینه‌های پروژه (یک نمونه برای چندین ردیاب مورد آزمایش قرار می‌گیرد).

۱۰-۵- نحوه تعیین مقدار ردیاب تزریقی

مقدار ماده ردیاب تزریقی به تفصیل در بندهای ۳-۷ نشریه شماره ۲۵۷-الف و ۴-۷ نشریه شماره ۲۶۳-الف ارائه شده است.

۱۱-۵- نقاط تزریق و چگونگی تعیین محل آنها

این قسمت به تفصیل در بندهای ۱-۶ نشریه شماره ۲۵۷-الف و ۲-۷ نشریه شماره ۲۶۳-الف ارائه شده است.

۱۲-۵- نحوه تعیین نقاط نمونه‌برداری

ضوابط انتخاب منابع آب مناسب برای نمونه‌برداری به تفصیل در بندهای ۲-۶ نشریه شماره ۲۵۷-الف و ۲-۸ نشریه شماره ۲۶۳-الف ارائه شده است.

۱۳-۵- روش‌های تزریق (امتیازات و محدودیت‌ها)

بسته به نوع نقاط تزریق انتخابی انواع روش‌های تزریق وجود دارد که در بندهای ۱-۷ نشریه شماره ۲۵۷-الف و ۳-۷ نشریه شماره ۲۶۳-الف به‌طور کامل ارائه شده است.

۱۴-۵- نحوه نمونه‌برداری و ارسال نمونه‌ها به آزمایشگاه

این قسمت به تفصیل در بندهای ۱-۸ و ۲-۸ نشریه شماره ۲۵۷-الف و ۸ و ۹ نشریه شماره ۲۶۳-الف ارائه شده است.

۱۵-۵- سنجش‌های میدانی به هنگام عملیات ردیابی

این قسمت به تفصیل در بندهای ۳-۹ نشریه شماره ۲۵۷-الف و ۱۰-۱-۳ نشریه شماره ۲۶۳-الف ارائه شده است.

۱۶-۵- سنجش‌های آزمایشگاهی نمونه‌ها

این قسمت به تفصیل در بندهای ۱۲ نشریه شماره ۲۵۷-الف و ۱۰ نشریه شماره ۲۶۳-الف ارائه شده است.

۱۷-۵- چگونگی تدوین برنامه عملیات میدانی پروژه

در یک پروژه ردیابی عملیات میدانی شامل موارد زیر می‌شود:

- بازدیدهای اولیه و برداشت نمونه جهت تعیین مقادیر زمینه^۱ و انتخاب نقاط تزریق و نمونه‌برداری.

- تزریق آب بداخل محل تزریق قبل از تزریق ماده ردیاب به منظور اطمینان از رسیدن ردیاب به آب زیرزمینی.
 - آماده‌سازی ردیاب و مراحل قبل از تزریق.
 - عملیات تزریق.
 - عملیات نمونه‌برداری (طولانی‌ترین و دشوارترین قسمت عملیات میدانی است).
- با توجه به دشواری انجام عملیات میدانی به ویژه در ابتدای کار (با توجه به برنامه زمان‌بندی نمونه‌برداری‌ها و تعداد زیاد نمونه‌ها در آغاز عملیات) و به منظور انجام دقیق موارد فوق، در تدوین این عملیات توجه به برخی از نکات ذیل ضروری است.
- فراهم نمودن وسیله نقلیه مناسب شرایط منطقه به تعداد کافی (نمونه‌برداری از نقاط از قبل تعیین شده بر اساس برنامه زمان‌بندی و ارسال نمونه‌ها به آزمایشگاه در سریع‌ترین زمان ممکن باید مد نظر باشد).
 - استخدام نیروی کار مناسب به تعداد کافی.
 - فراهم نمودن آب، غذا و سایر ضروریات برای کلیه پرسنل شاغل در عملیات.
 - فراهم نمودن تجهیزات اقامتی برای افرادی که در محل نمونه‌برداری زمان زیادی را سپری می‌کنند.
- انعطاف‌پذیر بودن برنامه نمونه‌برداری با توجه به نتایج اخذ شده از آزمایشگاه (در بند ۱۱ نشریه شماره ۲۵۷- الف و بند ۱۲ نشریه شماره ۲۶۳- الف عملیات صحرائی تکمیلی ارائه شده است).

فصل ٦

تجزیه و تحلیل نتایج

۶-۱- جمع‌آوری و تلفیق کلیه نتایج مطالعات قبلی

به منظور کاربرد ردیاب‌ها در بررسی نشت و فرار آب از مخزن و تکیه‌گاه‌های سد در منطقه مورد نظر، همانند سایر مطالعات هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی، اولین کاری که باید انجام شود جمع‌آوری کلیه مطالعاتی است که در منطقه مورد نظر قبلاً به منظورهای مختلفی انجام شده است و می‌توانند در کاربرد ردیاب‌ها برای بررسی نشت و فرار آب مفید واقع شوند. این مطالعات شامل بررسی‌های زمین‌شناسی (به ویژه مطالعات چینه‌شناسی و زمین‌شناسی ساختمانی)، بررسی‌های اکتشافی، سایر مطالعات هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی، و دیگر مطالعات مرتبط با موضوع مورد توجه می‌باشد. پس از جمع‌آوری مطالعات ذکر شده، باید نتایج مورد استفاده در بحث بررسی نشت و فرار آب در منطقه مورد نظر از آن مطالعات استخراج شود و بعد از دسته‌بندی و تلفیق نتایج، سایر محدودیت‌ها و پتانسیل‌های منطقه در خصوص احتمال وجود مسیرهای فرار و نشت آب و اولویت‌بندی آنها و همچنین احتمال وجود ارتباط هیدرولیکی بین منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد نظر با مناطق مجاور شناسایی شوند. در حقیقت در این قسمت با استفاده از مطالعات قبلی انجام شده، یک درک مقدماتی از وضعیت منطقه حاصل می‌شود و با عنایت به این درک اولیه کمبود اطلاعات مختلف در خصوص زمین‌شناسی، هیدرولوژی و هیدروژئولوژی مشخص می‌شود تا قبل از به‌کارگیری ردیاب‌ها این کمبودها مرتفع شود و یک مدل مفهومی در خصوص وضعیت هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی منطقه به دست آید. به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که قبل از هر عملیات ردیابی باید، مدل مفهومی فوق‌الذکر حاصل شود تا بتوان عملیات ردیابی را در مناطقی، که در مدل مفهومی به عنوان مسیرهای فرار و نشت آب حائز اهمیت شناخته شده‌اند، انجام داد و مدل مفهومی اولیه تکمیل و دقیق شود.

۶-۲- بررسی‌های کیفی

در این قسمت از کار باید نقاط دارای پتانسیل نشت، جهت و مسیرهای فرار و نشت آب، و همچنین نحوه ارتباط هیدرولیکی بین منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد نظر با مناطق مجاور، با استفاده از مطالعات مختلف انجام شده در منطقه شامل بررسی‌های زمین‌شناسی، بررسی‌های اکتشافی و سایر مطالعات هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی و در نهایت نتایج کیفی حاصل از عملیات ردیابی در منطقه به صورت کیفی مشخص شوند. نحوه شناسایی کیفی موارد فوق‌الذکر در زیر ارائه شده است.

۶-۲-۱- تعیین نقاط دارای پتانسیل نشت

قبل از عملیات ردیابی به منظور بررسی فرار و نشت آب از مخزن و تکیه‌گاه‌های سد باید در این محل‌ها نقاطی که دارای پتانسیل فرار و نشت آب هستند مورد شناسایی قرار گیرند. برای این کار باید موارد زیر مورد توجه قرار گیرند.

- بررسی‌های زمین‌شناسی

ذکر نموده است که لیتولوژی، وضعیت چینه‌شناسی، ناپوستگی‌های چینه‌ای، ساختارهای زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی و پدیده کارستی شدن از مهم‌ترین عوامل زمین‌شناسی هستند که بر روی پدیده‌های هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی تاثیرگذار هستند. در بررسی‌های زمین‌شناسی برای شناسایی نقاطی که دارای پتانسیل فرار و نشت آب هستند عمدتاً از علوم سنگ‌شناسی، چینه‌شناسی و زمین‌شناسی ساختمانی استفاده می‌شود.

با عنایت به علم سنگ‌شناسی، انواع مختلف لیتولوژی‌ها مشخص می‌شوند. لیتولوژی‌های مختلف به لحاظ تراوایی و انتقال جریان آب زیرزمینی تفاوت‌های فاحشی را شامل می‌شوند. برای مثال در میان سنگ‌های رسوبی، سنگ‌های کربناته به علت فرایند کارستی شدن و توسعه زون‌های انحلالی معمولاً از تراوایی بسیار بالایی برخوردارند. تراوایی ماسه سنگ‌ها به سیمانی که ذرات ماسه را به هم متصل کرده و همچنین توسعه شکستگی‌های ناشی از عملکرد نیروهای تکتونیکی وابسته می‌باشد. در ماسه سنگ‌هایی که سیمان بین ذرات از نوع کربنات کلسیم است، می‌تواند مجاری انحلالی بزرگی در اثر فرایند کارستی شدن ایجاد شود در حالی که در ماسه سنگ‌های با سیمان سیلیسی تنها در صورت وجود شکستگی‌ها امکان عبور جریان فراهم می‌شود. کنگلومراها هم وضعیتی شبیه ماسه سنگ‌ها دارند ولی گسترش آنها بسیار کم‌تر است. اکثریت قریب به اتفاق شیل‌ها و مارن‌ها از تراوایی بسیار ناچیزی برخوردارند. در میان سنگ‌های آذرین و دگرگونی، تنها سنگ‌های بازالتی هستند که دارای تراوایی بسیار خوبی هستند و بقیه سنگ‌های آذرین و دگرگونی، در صورتی که در آنها به علت عملکرد نیروهای تکتونیکی شکستگی‌ها توسعه پیدا نکرده باشند، تراوایی بسیار ناچیزی را شامل می‌شوند.

از علم چینه‌شناسی برای شناخت ناپیوستگی‌های چینه‌ای و توالی‌های مختلف چینه‌ای استفاده می‌شود. محل‌های ناپیوستگی‌های چینه‌ای (شامل ناپیوستگی‌های هم شیب، دگر شیبی‌ها و دگر شیبی‌های زاویه‌دار) می‌توانند مسیرهای مناسبی برای عبور آب باشد. توالی‌های مختلف چینه‌ای می‌توانند بر روی ارتباط و عدم ارتباط هیدرولیکی توده‌های آب و همچنین آزاد بودن یا محبوس بودن جریان تاثیر داشته باشند.

از زمین‌شناسی ساختمانی برای شناخت انواع شکستگی‌ها، تراکم و بازشدگی شکستگی‌ها و شیب صفحات شکستگی در سازندهای سخت (سازندهای کارستی و سایر سازندهای سخت) استفاده می‌شود. با استفاده از این مطالعات بر اساس ویژگی‌های مختلف شکستگی‌ها، دسته‌جات درزه‌ها، و زون‌های گسلی مناطق مستعد فرار آب مشخص می‌شوند.

- بررسی توسعه کارست در منطقه مورد مطالعه

چنانچه در منطقه سازندهای کربناته و یا سایر سازندهای با قابلیت انحلال حضور داشته باشند، باید با دقت پدیده‌های مختلف کارستی از قبیل فروچاله‌ها، حفرات انحلالی، گودی‌های مسدود و دیگر عوارض کارستی مورد بررسی قرار گیرند و درجه کارستی شدن منطقه مشخص شود. لازم به ذکر است که اگر بین لایه‌هایی از سازندهای تبخیری در منطقه مورد مطالعه حضور داشته باشد، باید توجه نمود که این بین لایه‌های تبخیری مسیرهایی با انحلال‌پذیری بالا هستند و بعد از اشباع شدن و دایر شدن جریان زیرزمینی در آنها، این مجاری به شدت بزرگ خواهند شد و غارها و کانال‌های زیرزمینی عظیمی را ایجاد خواهند نمود.

- بررسی‌های هیدروژئولوژیکی

بر اساس تراوایی سازندها، وجود و عدم وجود ارتباط هیدرولیکی مخزن و تکیه‌گاه‌های سد با منابع آب مجاور، ارزیابی وضعیت هیدرولیکی سفره آب زیرزمینی در دیواره‌های مخزن بعد از آب‌گیری مخزن و امکان رخداد جریان آب زیرزمینی به لحاظ بار هیدرولیکی ایجاد شده و انرژی مورد نیاز برای انتقال آب (افت بار) در مسیرهای مورد نظر، نقاط دارای پتانسیل نشت و فرار آب مشخص می‌شوند. در بررسی‌های هیدروژئولوژیکی با اندازه‌گیری سطح آب در پیژومترهای حفر شده، نقشه هم‌پتانسیل منطقه تهیه می‌شود. با عنایت به این نقشه نیز می‌توان مسیرهای با پتانسیل فرار و نشت آب را مشخص نمود. به این ترتیب که در قسمت‌هایی

که خطوط هم پتانسیل به طرف بار هیدرولیکی بیش تر منحرف می‌شوند، این قبیل مسیرها به عنوان مسیرهای تخلیه آب زیرزمینی عمل می‌کنند.

- بررسی‌های اکتشافی

بر اساس اطلاعات به دست آمده از لاگ‌های حفاری و دیگر بررسی‌های اکتشافی، تراوایی لایه‌ها در جهت‌های جانبی و عمودی مقایسه می‌شوند و زون‌هایی که دارای تراوایی نسبی بالاتری در مقایسه با سایر زون‌ها هستند، مورد شناسایی قرار می‌گیرند. این قبیل زون‌ها در صورتی که پایین تر از خط شیب هیدرولیکی بین سطح آب در مخزن (پس از آب‌گیری) و مناطق مجاور قرار گرفته باشند، به عنوان نقاط و مسیرهای با پتانسیل فرار و نشت آب قلمداد می‌شوند.

۶-۲-۲- تعیین جهت و مسیرهای فرار و نشت آب

به منظور تعیین جهت و مسیرهای فرار و نشت آب از مخزن و تکیه‌گاه‌های سد، کم و بیش همان مواردی که در بخش قبلی ذکر شد مورد استفاده واقع می‌شود. بنابراین موارد زیر در تعیین جهت و مسیرهای فرار و نشت آب باید مورد توجه قرار گیرند.

- ناپیوستگی‌های مهم، به ویژه ناپیوستگی‌هایی که بین لیتولوژی‌های کاملاً مختلف واقع شده‌اند، می‌توانند به عنوان مسیر انتقال آب عمل نمایند.
- درزه‌های اصلی، دسته‌جات درزه‌ای، گسل‌های مهم و زون‌های گسلی می‌توانند به عنوان مسیر حرکت آب عمل کنند.
- خطواره‌های موجود در منطقه، به ویژه خطواره‌هایی که واحدهای مختلف سنگی را قطع می‌کنند، می‌توانند به عنوان مسیرهای فرار آب عمل نمایند.
- زون‌هایی که تراوایی آنها در حدود ۲ یا چند مرتبه بیش تر از زون‌های مجاور هست می‌توانند در فرار و نشت آب نقش ایفا نمایند.
- مسیرهایی که در نقشه هم پتانسیل به عنوان مسیرهای اصلی تخلیه آب زیرزمینی شناسایی شده‌اند، تخلیه آب از این قبیل مسیرها بعد از آب‌گیری مخزن به علت افزایش بار هیدرولیکی به طور قابل ملاحظه‌ای تشدید خواهد شد.

۶-۲-۳- چگونگی تعیین نحوه ارتباط هیدرولیکی مخزن سد با منابع آب مجاور

در بخش‌های ۴-۴ و ۴-۶ به طور مفصل در خصوص چگونگی ارتباط هیدرولیکی مخزن سد با منابع آب مجاور توضیح داده شده است. با عنایت به مطالب مندرج در بخش‌های ذکر شده، برای تعیین ارتباط هیدرولیکی مخزن سد با منابع آب مجاور باید موارد زیر مورد توجه قرار داده شوند:

- حضور زون‌های با تراوایی نسبتاً بالاتر در مقایسه با زون‌های مجاور (زون‌هایی که نفوذپذیری آنها حدود ۲ یا چند برابر نفوذپذیری زون‌های مجاور است) بین مخزن سد با منابع آب مجاور می‌تواند ارتباط هیدرولیکی بین مخزن سد و منابع آب مجاور را فراهم سازند.

- قسمت‌هایی که در نقشه‌های هم پتانسیل تهیه شده بین مخزن سد با منابع آب مجاور، خطوط هم پتانسیل به طرف بار هیدرولیکی بیش‌تر منحرف می‌شوند، در این قبیل مسیرها می‌تواند ارتباط هیدرولیکی بین مخزن سد با منابع آب مجاور وجود داشته باشد و پس از آب‌گیری مخزن ارتباط موجود تشدید شود.
- چنانچه تغییرات سطح آب زیرزمینی در محدوده مخزن سد با دبی منابع آب مجاور رابطه مستقیمی داشته باشد، به این ترتیب که با بالا آمدن و پایین رفتن سطح آب زیرزمینی در محدوده مخزن و تکیه‌گاه‌های سد، دبی جریان در منابع آب مجاور منطقه مورد نظر به‌طور هماهنگی افزایش و کاهش پیدا کند، احتمال وجود ارتباط هیدرولیکی بین مخزن سد با منابع آب مجاور وجود دارد به خصوص اگر فواصل زمانی بین نقاط اوج تغییرات با یکدیگر همخوانی داشته باشند.
- بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی شامل اندازه‌گیری پارامترهای مختلف فیزیکی و شیمیایی آب از قبیل هدایت الکتریکی، اسیدیته، درجه حرارت، کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی در محدوده مخزن و منابع آب مجاور. این قبیل اندازه‌گیری‌ها به ویژه تغییرات هدایت الکتریکی و نسبت‌های یونی (برای مثال نسبت کلر به مجموع آنیون‌ها و یا نسبت سدیم به مجموع کاتیون‌ها و دیگر نسبت‌های آنیونی و کاتیونی) می‌تواند اطلاعات مفیدی مبنی بر وجود یا عدم وجود ارتباط هیدرولیکی مخزن و تکیه‌گاه‌های سد با منابع آب مجاور ارائه دهد. چنانچه تغییرات پارامترهای مذکور در محدوده مخزن و منابع آب مجاور همخوانی خوبی داشته باشند، به احتمال قوی ارتباط هیدرولیکی بین مخزن سد و منابع آب مجاور وجود دارد.
- چنانچه دو یا چند مورد از موارد مذکور، وجود یا عدم وجود ارتباط هیدرولیکی مخزن و تکیه‌گاه‌های سد با منابع آب مجاور را به وضوح بیان نمایند (یعنی همدیگر را تایید نمایند)، احتمال وجود یا عدم وجود ارتباط هیدرولیکی بسیار زیاد خواهد بود.

۳-۶- بررسی‌های کمی

به منظور تحلیل کمی آزمایشات ردیابی ابتدا باید به معادلات حاکم بر حرکت آب و انتقال ماده ردیاب موجود در آب توجه نمود. بر همین اساس سرعت موثر حرکت آب در محیط‌های متخلخل از فرمول زیر به دست می‌آید:

$$V_a = \frac{k_f \cdot i}{n_e} \quad (۱-۶)$$

V_a : سرعت موثر

K_f : ضریب نفوذپذیری

i : شیب هیدرولیکی

n_e : تخلخل موثر

و معادله حرکت آب با در نظر گرفتن ضریب پخشیدگی^۱ به صورت زیر نوشته می‌شود.

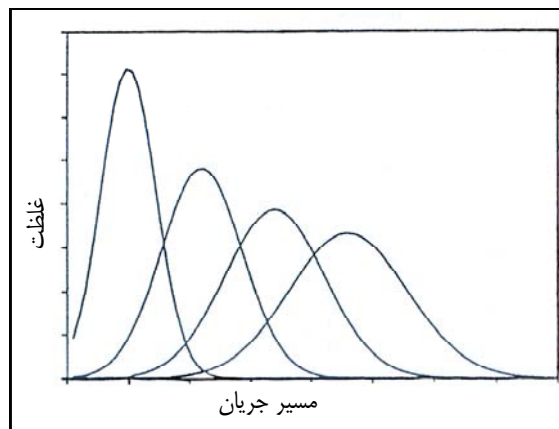
$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - v_a \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \quad (۲-۶)$$

c: غلظت

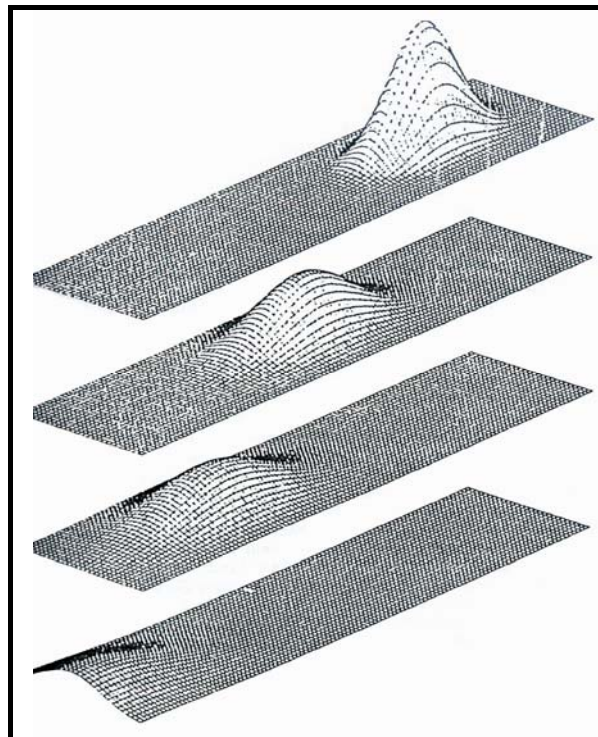
t: زمان

D_x , D_y و D_z : ضریب پخشیدگی در جهات طولی، جانبی و عمودی

معادله دیفرانسیل فوق براساس شرایط مرزی مختلف، دارای روش‌های حل تحلیلی متفاوتی می‌باشد که بر اساس آنها و با استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری می‌توان غلظت ماده ردیاب را در مکان‌ها و زمان‌های مختلف پیش‌بینی نمود. شکل‌های (۱-۶) و (۲-۶) حل یک بعدی و دو بعدی توزیع غلظت در چهار زمان مختلف پس از تزریق لحظه‌ای را نشان می‌دهد.



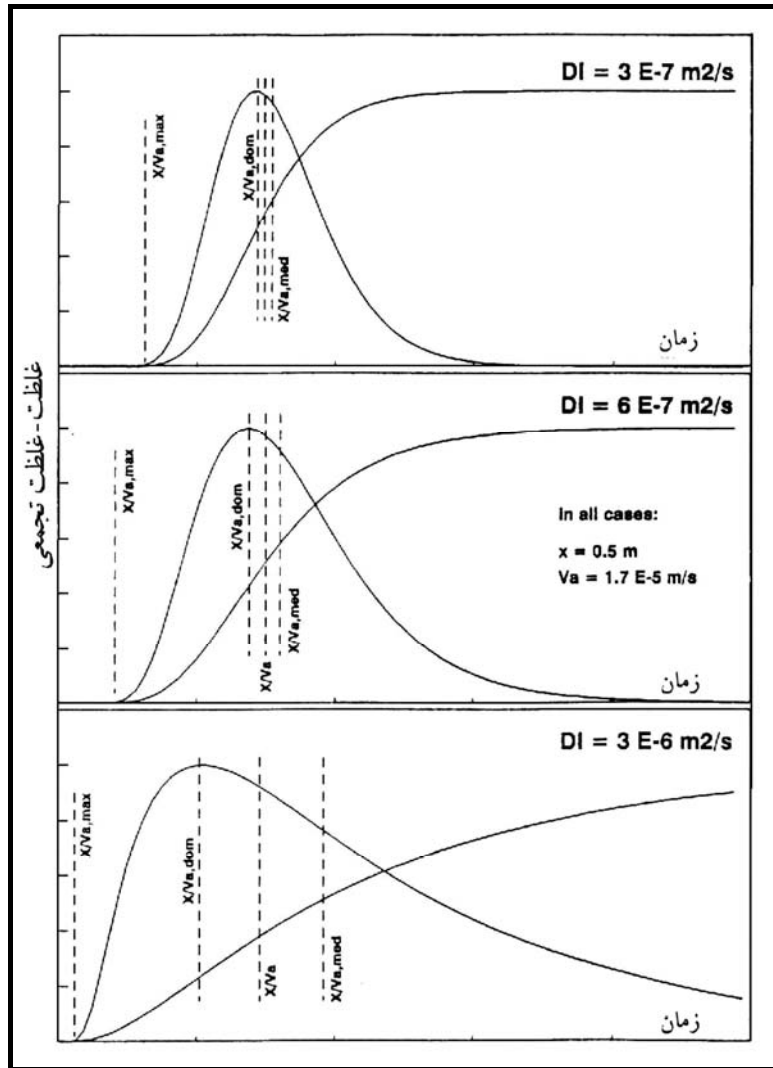
شکل ۶-۱- توزیع غلظت در چهار زمان مختلف پس از تزریق ردیاب بر مبنای حل یک بعدی معادله انتقال جرم



شکل ۶-۲- توزیع غلظت در چهار زمان مختلف پس از تزریق ردیاب بر مبنای حل دو بعدی معادله انتقال جرم

۱-۳-۶- نحوه برآورد زمان ماندگاری^۱

یکی از کاربردی ترین نتایج حاصله در مطالعات ردیابی، منحنی‌های غلظت-زمان می‌باشد که پس از آنالیز نمونه‌ها و ترسیم زمان نمونه‌برداری در مقابل غلظت هر نمونه به دست می‌آید (شکل ۳-۶).



شکل ۳-۶- نمودارهای غلظت-زمان در حالت‌های مختلف ضریب پخشیدگی آبخوان

از بالا به پایین ضریب پخشیدگی افزایش پیدا کرده است. خطچین‌ها به ترتیب از چپ به راست نشان‌دهنده سرعت ماکزیمم، سرعت غالب، سرعت واقعی و سرعت میانه می‌باشند.

متوسط زمان ماندگاری ردیاب در آبخوان از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$I_1 = \int (C/t).dt \tag{۳-۶}$$

$$I_2 = \int C.dt \tag{۴-۶}$$

$$T_r = I_2 / I_1 = \int C \cdot dt / \int (C/t) \cdot dt \quad (5-6)$$

که در این رابطه C غلظت ردیاب در محل نمونه برداری بر حسب ppb و t زمان پس از تزریق بر حسب روز می باشد.

$$I_3 = \int C \cdot t \cdot dt \quad (6-6)$$

برای محاسبه ضریب پخشیدگی باید واریانس منحنی غلظت - زمان را به صورت زیر محاسبه نمود.

$$\delta^2 = (I_3 / I_1) - (I_2 / I_1)^2 \quad (7-6)$$

سپس با استفاده از رابطه زیر این ضریب به دست می آید.

$$D = \delta^2 L^2 / 2T_r^3 \quad (8-6)$$

۶-۳-۲- چگونگی برآورد درصد بازیافت ردیاب

از دیگر نتایج کمی قابل توجه در آزمایشات ردیابی درصد بازیافت^۱ می باشد که در واقع نسبت مقدار ماده رنگی بازیافتی در کلیه چشمه ها به مقدار ماده رنگی تزریق شده می باشد.

$$100 \times (\text{مقدار ماده تزریقی} / \text{مقدار ماده بازیافتی}) = \text{درصد بازیافت} \quad (9-6)$$

که مقدار ماده بازیافت شده از رابطه زیر قابل برآورد می باشد.

$$M = \int C \cdot Q \cdot dt \cdot 10^6 \quad (10-6)$$

یا به بیان ساده تر:

$$M = \sum C \cdot Q \cdot \Delta t \cdot 10^6 \quad (11-6)$$

که در این رابطه Q دبی چشمه بر حسب مترمکعب در روز، C غلظت ردیاب بر حسب ppb، و M جرم ماده ردیاب بر حسب کیلوگرم می باشد. به منظور سهولت انجام محاسبات، باید بازه های زمانی Δt نمونه برداری و اندازه گیری دبی چشمه یکسان در نظر گرفته شود. ضمناً در صورتی که دبی چشمه در طول دوره نمونه برداری ثابت باشد، می توان از رابطه زیر جهت برآورد مقدار ماده ردیاب استفاده کرد.

$$M = Q \int C \cdot dt \cdot 10^6 \quad (12-6)$$

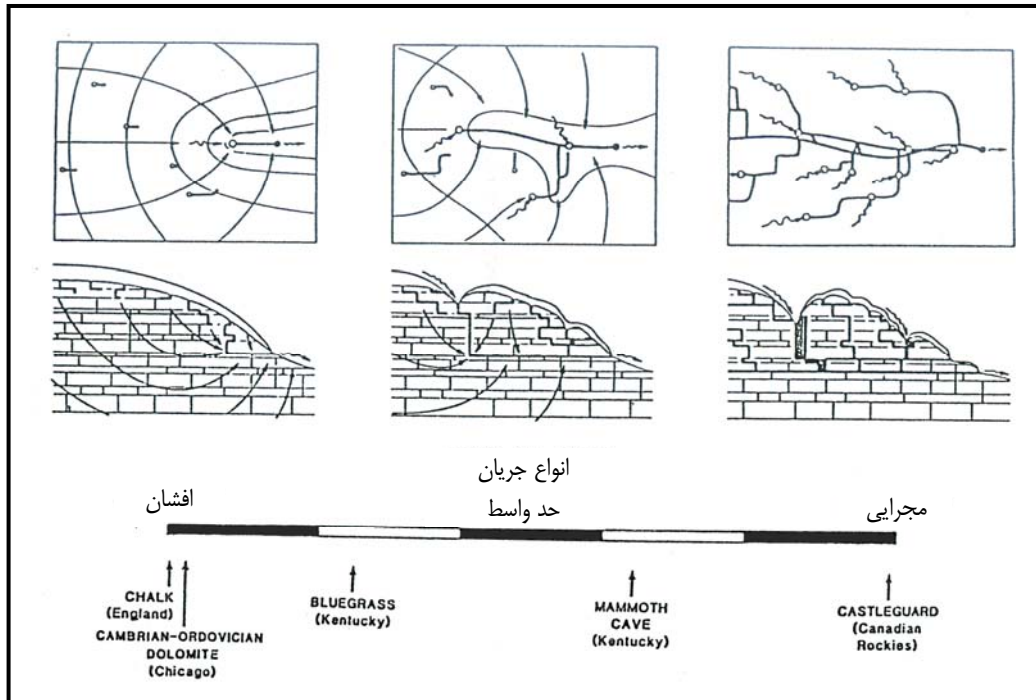
در صورتی که درصد بازیافت حدود ۶۵ الی ۷۰ درصد باشد، نشان دهنده تخلیه قسمت عمده آب منطقه توسط چشمه های تحت نمونه برداری می باشد و بقیه ماده ردیاب دریافت نشده، برای جذب و زوال^۲ در نظر گرفته می شود. در حالیکه اگر میزان بازیافت کم باشد، مثلاً ۲۰٪، نشان دهنده امکان خروج آب از راه های دیگری به غیر از منابع آب مورد نمونه برداری می باشد. بزرگ بودن مخزن آب زیرزمینی نیز می تواند باعث رقیق شدگی زیاد ماده ردیاب و کاهش میزان بازیافت شود. همچنین به کارگیری برخی از ردیاب ها از قبیل رودامین ها، در مناطق دارای لایه های رسی به دلیل خاصیت جذب بالا موجب کاهش درصد بازیافت می شود.

1- Recovery

2- Decay

۳-۳-۶- نحوه تعیین سرعت و الگوی جریان آب

در بررسی‌های فرار آب، محاسبات سرعت جریان از اهمیت خاصی برخوردار است. به دلیل این که معمولاً حرکت آب با سرعت افشان، کم بوده و فرار آب به این ترتیب قابل صرف‌نظر کردن است درحالی‌که حرکت آب با سرعت مجرای موجب فرار آب قابل توجهی خواهد شد. شکل (۴-۶) جریان افشان، حد واسط و مجرای را به صورت فرضی نشان می‌دهد. به اختلاف خطوط جریان و هم‌پتانسیل در نمودارها توجه شود.



شکل ۴-۶- جریان افشان، حد واسط و مجرای

در جریان افشان به دلیل آرام بودن جریان می‌توان از فرمول داری جهت محاسبه سرعت استفاده نمود.

$$\bar{V} = K \frac{dh}{dl} \tag{۱۳-۶}$$

فرمول داری برای سه حالت مختلف به شرح زیر است:

محیط متخلخل^۲

$$\bar{V} = \frac{\rho g (Nd^2) h_f}{\mu L} \tag{۱۴-۶}$$

درزه و شکاف با دیواره‌های موازی^۳

$$\bar{V} = \frac{\rho g B^2 h_f}{12\mu L} \tag{۱۵-۶}$$

- 1- Laminar
- 2- Porous Medium
- 3- Parallel Walled Fracture

مجرا با مقطع دایره‌ای^۱

$$\bar{V} = \frac{\rho g r^2 h_f}{8\mu L} \quad (۱۶-۶)$$

که در آن B فاصله بین دیواره‌های شکاف یا بازشدگی، N فاکتور شکل نفوذپذیری و d قطر ذرات می‌باشد. شرط استفاده از روابط فوق آرام بودن جریان و پر بودن کل مقطع عبوری از آب می‌باشد.

در جریان مجرای عمده‌ت جریان آشفته^۲ بوده و نمی‌توان از فرمول داری استفاده نمود. در این‌گونه موارد باید از رابطه داری - وایسباخ استفاده نمود.

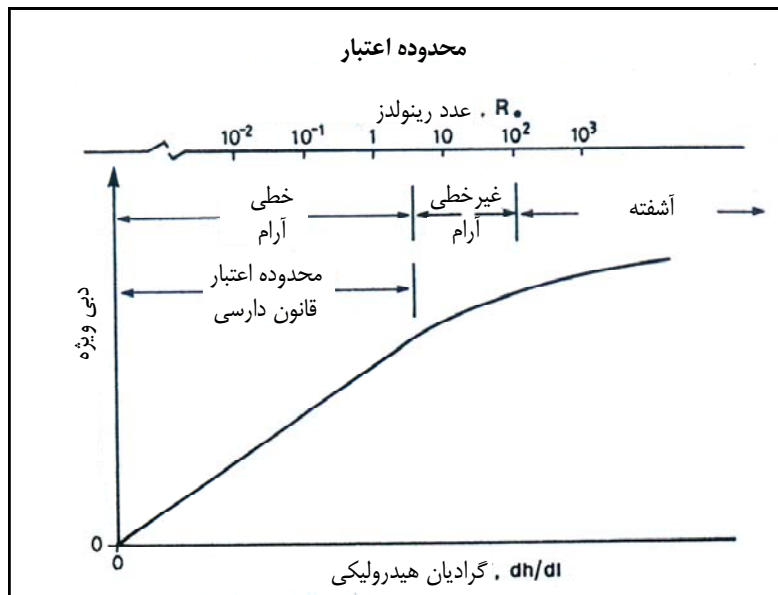
$$\bar{V}^2 = \frac{(4gr)}{f} \left(\frac{h_f}{L} \right) \quad (۱۷-۶)$$

که در آن f ضریب اصطکاک (بدون بعد) می‌باشد که با عدد رینولدز رابطه عکس دارد:

$$f = \frac{64}{N_R} \quad (۱۸-۶)$$

$$N_R = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu} \quad (۱۹-۶)$$

در واقع عدد رینولدز معیاری جهت تفکیک جریان آرام و آشفته می‌باشد که محدوده اعتبار قانون داری را نشان می‌دهد. شکل (۵-۶)، ارتباط شیب هیدرولیکی، دبی ویژه و عدد رینولدز را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۵ - محدوده اعتبار قانون داری

رابطه کلی سرعت عبارت است از:

زمان / فاصله = سرعت

- 1- Circular Conduit
- 2- Turbulent

بنابراین با توجه به منحنی غلظت - زمان حاصله و بر اساس زمان ظهور ماده ردیاب، سرعت‌های جریان عمدتاً به سه نوع تقسیم می‌شوند. سرعت بر اساس اولین ظهور ماده ردیاب، سرعت ماکزیمم^۱ V_{max} نامیده می‌شود. سرعت بر اساس اولین زمان نقطه اوج^۲ سرعت غالب^۳ V_{int} نامیده می‌شود که به معنی این است که حداکثر تعداد مجاری به‌طور هم‌زمان ماده رنگی خود را تخلیه می‌کنند و پس از آن مجاری یکی پس از دیگری از ماده رنگی تخلیه می‌شوند و منحنی کاهش می‌یابد.

سرعت بر اساس اولین میانه منحنی غلظت - زمان، سرعت میانه V_{med} نامیده می‌شود. در شکل (۶-۱) انواع سرعت‌ها بر روی منحنی‌های غلظت - زمان مشخص شده است.

با توجه به طول‌تر بودن مسیر واقعی جریان نسبت به مسیر مستقیم (به دلیل وجود انشعابات فرعی زیاد)، به منظور برآورد سرعت واقعی باید فاصله مستقیم بین نقطه تزریق و محل ظهور ردیاب را در ضریب $1/3$ تا $1/5$ ضرب نمود.

محاسبه سرعت جریان با استفاده از روش‌های فوق مربوط به روش چند چاهی است. با این مفهوم که ماده ردیاب در یک یا چند نقطه تزریق و در نقاط مختلف نمونه‌برداری می‌شود. علاوه بر موارد فوق روش تک چاه نیز به دو روش تزریق - تخلیه و رقیق شدن مورد استفاده قرار می‌گیرد که به دلیل اهمیت آن عیناً از نشریه ۲۶۳- الف نقل می‌شود:

- روش تزریق - تخلیه

$$\pi X = V_{50} / bn \quad (۲۰-۶)$$

که در آن V_{50} مقدار حجم آب پمپ شده می‌باشد که ۵۰ درصد مقدار ردیاب بازیافت شده است، b ضخامت آبخوان و n تخلخل است. سرعت متوسط از رابطه X / t محاسبه می‌شود که t فاصله زمانی از لحظه تزریق اولیه تا زمان شروع پمپاژ می‌باشد.

- روش رقیق شدن

$$\frac{C_0}{C} \ln \cdot V_f = \left(\frac{\pi \cdot r_1}{2\alpha \cdot t} \right) \quad (۲۱-۶)$$

که در آن V_f سرعت ظاهری آب زیرزمینی یا سرعت دارسی، r_1 شعاع داخلی ناحیه مشبک چاه و α ضریبی است که از روابط زیر به دست می‌آید.

$$\alpha = \frac{4K_1}{K_1 \left[1 + \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right] + K_1 \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right]} \quad (۲۲-۶)$$

که در آن K_1 هدایت هیدرولیکی، r_1 قطر داخلی ناحیه مشبک چاه، r_2 قطر خارجی مشبک چاه می‌باشد. اگر چاه با فیلتر گراولی تجهیز شده باشد رابطه فوق به صورت زیر تغییر می‌کند.

$$\alpha = \frac{8K_1 \cdot K_2}{K_2 \cdot A + KB} \quad (۲۳-۶)$$

1 - Maximum Velocity of Tracer

2 - Peak

3 - Velocity of Peak of Tracer

که در آن:

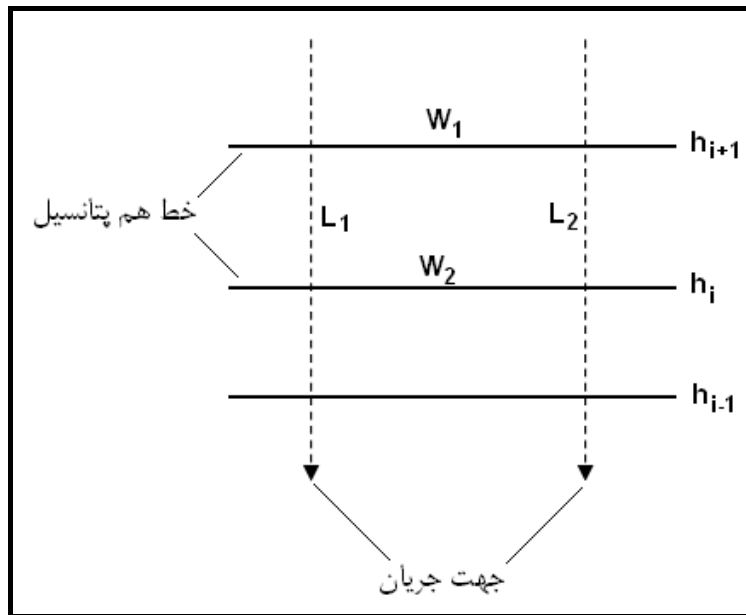
$$A = (K_1 + K_2) \left[1 + \frac{r_1^2}{r_3} \right] + (K_1 - K_2) \left[\frac{r_1^2}{r_2} + \frac{r_2^2}{r_3} \right] \quad (۲۴-۶)$$

$$B = (K_1 + K_2) \left[1 - \frac{r_1^2}{r_3} \right] + (K_1 - K_2) \left[\frac{r_1^2}{r_2} - \frac{r_2^2}{r_3} \right] \quad (۲۵-۶)$$

که K_2 هدایت هیدرولیکی توده گراول و r_3 شعاع حفاری، C_0 غلظت ردیاب در زمان صفر و C غلظت ردیاب در زمان t می‌باشد.

۶-۳-۴- چگونگی تعیین حجم فرار و نشت آب

برای برآورد حجم فرار و نشت آب از مخزن و تکیه‌گاه‌های سد، از معادله داریسی استفاده می‌شود. به این ترتیب که در محدوده‌ای که با به‌کارگیری عملیات ردیابی مسیره‌های فرار و نشت آب تشخیص داده شده‌اند، تعدادی پیزومترها و گمانه‌های اکتشافی بیش‌تری حفر می‌شوند و بر اساس اطلاعات سطح آب زیرزمینی در این پیزومترها و گمانه‌های اکتشافی نقشه هم‌پتانسیل آب زیرزمینی برای آن محدوده با دقت تهیه می‌شود. علاوه بر این، در محدوده مورد نظر با انجام آزمایش پمپاژ و یا دیگر آزمایشات مقدار قابلیت انتقال لایه‌ها با دقت برآورد می‌شود. سپس با عنایت به شکل (۶-۶) و با به‌کارگیری معادله داریسی به صورت زیر حجم فرار و نشت آب از مسیر مورد نظر برآورد می‌شود.



شکل ۶-۶- نقشه هم پتانسیل به صورت شماتیک

$$Q = T \left(\frac{W_1 + W_2}{2} \right) \frac{h_{i+1} - h_i}{\frac{L_1 + L_2}{2}} \quad (۲۶-۶)$$

Q = دبی جریان در بین دو خط جریان متوالی (متر مکعب بر روز)

T = قابلیت انتقال در محدوده مورد نظر (متر مربع بر روز)

با محاسبه مقدار Q از رابطه فوق الذکر، می‌توان با ضرب نمودن آن در فاصله زمانی مورد نظر حجم جریان را برای محدوده مورد نظر برآورد نمود. حجم کل فرار و نشت آب از مخزن و تکیه‌گاه‌های سد از جمع نمودن حجم‌های به دست آمده در محدوده‌های مختلف مخزن و تکیه‌گاه‌های سد به دست می‌آید.

لازم به ذکر است که برای محاسبه حجم فرار و نشت آب از مخزن و تکیه‌گاه‌های سد علاوه بر روش دستی ذکر شده می‌توان با به‌کارگیری نرم افزار SEEP/W به سادگی و با دقت بالاتر حجم فرار و نشت آب را تعیین نمود.

۶-۳-۵- رابطه بین رقوم آب در مخزن و مقدار نشت آب

بدیهی است که مقدار فرار و نشت آب از مخزن و تکیه‌گاه‌های سد با رقوم آب در مخزن رابطه مستقیمی دارد. بنابراین، هرچه رقوم آب در مخزن سد بالاتر رود، به علت افزایش بار هیدرولیکی از یک طرف و اضافه شدن محدوده‌های جدیدی با پتانسیل نشت و فرار آب (که در رقوم پایین تر آب دخالتی در فرار و نشت آب نداشتند) از طرف دیگر، مقدار نشت و فرار آب از مخزن و تکیه‌گاه‌های سد بیش‌تر خواهد شد.

اگرچه رابطه بین رقوم آب در مخزن سد و مقدار نشت رابطه مستقیمی است ولی رابطه مذکور معمولاً یک رابطه خطی نیست و بسته به شرایط محلی می‌تواند، رابطه پیچیده‌ای باشد. علت پیچیدگی رابطه ذکر شده از این قرار است که با بالا رفتن سطح آب در مخزن سد، سطح جانبی مخزن که توسط آب فراگرفته می‌شود به صورت نمایی افزایش می‌یابد و در نتیجه محدوده‌های وسیع‌تری که قبلاً در فرار و نشت آب از مخزن و تکیه‌گاه‌های سد دخیل نبوده‌اند، مشارکت خود را شروع می‌کنند. از آنجایی که محدوده‌های با پتانسیل نشت و هم‌چنین توانایی انتقال توسط آنها در رقوم مختلف کاملاً متفاوت است، این موارد باعث پیچیدگی بیش‌تر رابطه بین رقوم آب در مخزن و مقدار نشت و فرار آب می‌شود. بنابراین رابطه بین رقوم آب در مخزن سد و مقدار فرار و نشت آب، همانند با رابطه رقوم آب و حجم مخزن، برای هر مخزن رابطه‌ای خاص می‌باشد و به همین دلیل نمی‌توان یک معادله کلی ارائه نمود که رابطه بین رقوم آب در مخزن سد و مقدار نشت و فرار آب را برای تمام مخازن بیان نماید. بنابراین باید برای هر مخزن به‌طور جداگانه رابطه بین رقوم آب در مخزن سد و مقدار نشت و فرار آب برآورد شود که رابطه حاصله فقط و فقط خاص مخزن مورد نظر می‌باشد. روش کار برای تهیه رابطه بین رقوم آب در مخزن سد و مقدار نشت و فرار آب در زیر ارائه شده است.

برای این کار باید با به‌کارگیری عملیات ردیابی در نقاط با پتانسیل فرار و نشت آب که در مدل مفهومی اولیه مشخص شده است، نقاط و مسیرهای اصلی فرار و نشت آب مشخص شوند. سپس یک زون بندی در جهت عمودی در مخزن مورد نظر انجام می‌شود و در هر زون ارتفاعی وضعیت هیدرولیکی مسیرهای فرار و نشت آب تعیین می‌شوند. برای مثال زون‌های ارتفاعی با ارتفاع برابر با ۱۰ متر در نظر گرفته می‌شود و سپس در هر مرحله نقشه هم پتانسیل از پایین‌ترین ارتفاع تا ارتفاع مورد نظر تهیه می‌شود و این کار آن‌قدر ادامه داده می‌شود تا در مرحله آخر از پایین‌ترین ارتفاع تا حداکثر رقوم سطح آب در مخزن در نظر گرفته شود. این کار هم به صورت دستی و هم با استفاده از نرم افزار SEEP/W به سادگی قابل انجام است و همانند آنچه که در بخش قبل (بخش ۶-۳-۴) ذکر شد، دبی و در نتیجه حجم نشت و فرار آب از مخزن و تکیه‌گاه‌های سد در رقوم مختلف ارتفاعی برآورد شود.

۶-۳-۶- تکمیل مدل مفهومی اولیه

چگونگی تهیه مدل مفهومی اولیه هیدروژئولوژیکی محدوده مخزن سد و محیط اطراف آن در بخش ۴-۷ توضیح داده شده است. به طور مختصر قابل ذکر است که برای تهیه مدل مفهومی اولیه هیدروژئولوژیکی، با توجه به آنچه در منابع و مراجع مختلف ذکر شده است، ترکیبی از داده‌های زمین‌شناسی (داده‌های چینه‌شناسی، زمین‌شناسی ساختاری، سنگ‌شناسی و ژئومورفولوژی)، بررسی‌های اکتشافی (ژئوفیزیک سطحی و زیر سطحی)، آزمایشات هیدرولیکی، اطلاعات هیدرولوژی، و روش‌های ژئوشیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین ذکر شد که در مدل مفهومی اولیه هیدروژئولوژیکی آبخوان باید مقاطع زمین‌شناسی، زون‌های تراوا، وجود یا عدم وجود ارتباط هیدرولیکی مخزن و تکیه‌گاه‌های سد با منابع آب مجاور، نیم‌رخ‌هایی از خصوصیات کمی (برای مثال سطح آب زیرزمینی) و کیفی (برای مثال تغییرات زمانی هدایت الکتریکی در محدوده مخزن و تکیه‌گاه‌های سد و همچنین برای منابع آب مجاور)، جهت جریان زیرزمینی قبل و بعد از آگیری مخزن سد ارائه شود.

به منظور تصحیح و تکمیل مدل مفهومی اولیه هیدروژئولوژیکی محدوده مخزن سد و محیط اطراف آن، که با عنایت به اطلاعات پایه زمین‌شناسی، بررسی‌های اکتشافی و بررسی‌های هیدروژئولوژیکی تهیه شده است باید از اطلاعات و نتایج به دست آمده در بررسی‌های کمی مربوط به عملیات ردیابی (نظیر مسیرهایی که فرار و نشت آب را شامل می‌شوند، اولویت‌بندی مسیرهای فرار و نشت آب، رابطه بین رقوم آب در مخزن سد و مقدار فرار و نشت آب) استفاده شود و اصلاحات لازم بر روی مدل مفهومی اولیه هیدروژئولوژیکی محدوده مخزن سد و محیط اطراف آن انجام شود.

در نهایت باید یک مدل مفهومی دقیق و جامع از وضعیت هیدروژئولوژیکی محدوده مخزن سد و محیط اطراف آن ایجاد شود. به این ترتیب که در این مدل مفهومی مسیرهای اصلی فرار و نشت آب از مخزن و تکیه‌گاه‌های سد برای منطقه‌بندی انجام شده در رقوم مختلف سطح آب مخزن، نحوه ارتباط هیدرولیکی مخزن سد با منابع آب مجاور، و جهت جریان آب زیرزمینی برای منطقه‌بندی انجام شده در رقوم مختلف سطح آب مخزن (جهت جریان قبل از آگیری و جهت جریان بعد از آگیری مخزن برای رقوم مختلف سطح آب در مخزن) مشخص شده باشد.

منابع و مراجع

- ۱- احمدزاده هروی، م. (۱۳۷۱). فعالیت‌های کمیته ملی چینه‌شناسی ایران. مجله علوم زمین، ۷۲-۶۴.
- ۲- اسدپور، ر. (۱۳۷۹). بررسی هیدروژئولوژیکی کارست در تاق‌دیس راوندی سد سیمره با استفاده از ماده رنگی رودامین B. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بخش زمین‌شناسی، دانشگاه شیراز.
- ۳- اسدی، ن. (۱۳۷۷). بررسی مسئله احتمال فرار آب از سد تنگاب فیروزآباد با استفاده از ردیاب‌های رنگی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بخش زمین‌شناسی، دانشگاه شیراز.
- ۴- جان‌پرور، م. (۱۳۸۰). بررسی هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی تاق‌دیس زرآب. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بخش زمین‌شناسی، دانشگاه شیراز.
- ۵- طلایی ارکانی، ح. (۱۳۷۸). بررسی مسیر حرکت آب در سازندهای تکیه‌گاه چپ سد تنگاب با استفاده از ماده رنگی رودامین B. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بخش زمین‌شناسی، دانشگاه شیراز.
- ۶- کریمی، غ. (۱۳۷۲). بررسی رابطه بین عوامل موثر بر نفوذ آب به داخل کارست و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی کوه‌های گر و برم فیروز. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بخش زمین‌شناسی، دانشگاه شیراز.
- ۷- کریمی، غ. (۱۳۸۳). بررسی هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه کارستی چشمه علی دامغان، طرح پژوهشی با کد ۲۱۰۷، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود. ۴۷ ص.
- ۸- کریمی، ح. (۱۳۷۶). بررسی هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های و پیزومترهای تاق‌دیس پودنو فیروزآباد. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بخش زمین‌شناسی، دانشگاه شیراز.
- ۹- کمالی نیسانی، م. (۱۳۷۸). بررسی مسئله احتمال فرار آب زیرزمینی و تعیین راندمان فنی پمپاژ در دشت فیروزآباد. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بخش زمین‌شناسی، دانشگاه شیراز.
- 10- Atkinson, T. C. (1977). Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills, Somerset (great Britain). J. Hydrol. 35: 93-110.
- 11- Barker, R.D.; White, C.C.; Houston, J.F.T. (1992). Borehole siting in an African accelerated drought relief project. In E.P.Wright and W.G. Burgess (eds) The hydrogeology of crystalline basement Aquifers in Africa. Geol. Soc. Special Publ. no.66, pp.183-201.
- 12- Barker, R.D.(1981).The offset system of electrical resistivity sounding and its use with a multicore cable. Geophysical prospecting, vol.29, pp. 128-43.
- 13- Bogli, A., (1980). Karst hydrology and physical speology, Heidelberg-Newyork.
- 14- Bonacci, O. (1987). Karst hydrology, with special reference to the Dinaric karst. Springer-Verlag, Berlin, 184pp.
- 15- Brassington, R. (1998). Field hydrogeology. John Wiley & sons, New York, 248 pp.
- 16- Brown, N. N. (1994). Integrating structural geology with remote sensing in hydrogeological resource evaluation and exploration. Proc. 10th thematic conference on geologic remote sensing, San Antonio, TX, USA, 1994, part I, pp. 144-54 .

- 17- Carruthers, R.M.;Smith, I.F. (1992). The use of ground electrical survey methods for siting water-supply boreholes in shallow crystalline basement trains. The hydrogeology of basement Aquifers in Africa. Geol. Soc. Special Publ. no.66, pp.203-20.
- 18- Castany, G. (1984). Determination of aquifer characteristics. In: Guide to the hydrology of carbonate rocks, Lamoreaux, P. E., Wilson, B. M., and Memon, B. A (eds), 210-237. Studies and reports in hydrology. No. 41, Paris, UNESCO.
- 19- Cooper J.D., Miller R.H. and Patterson J. (1995). A trip through time: principles of historical geology. Merrill Publishing Co.
- 20- Cooper, H. H. and Jacob, C.E., (1946) A generalised graphical method for evaluating formation constants and summarising well field history, American Geophysics Union Transactions, Vol. 27, pp 526-534.
- 21- Cowell D.W. and Ford D.C. (1983) Karst hydrology of the Bruce Peninsula, Ontario, Canada, In: Back W., LaMareaux P.E. and Guesteds V.T. Stringfield Symposium Processes in Karst Hydrology. J. Hydrol 61: 163-168.
- 22- Drew D.P., Burke A.M., and Daly D. (1996). Assessing the extent and degree of karstification in Ireland. In: Proceedings of international conference on karst-fractured aquifers – vulnerability and sustainability, Katowice-Ustron, Poland, June 10-13, 1996, 37-47.
- 23- Ede, D. P. (1972) Comments on “ seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs” by Evan T. Shuster and William B. White. J. Hydrol. 16: 53 – 55.
- 24- Fetter, C.W. (2001). Applied Hydrogeology.4th edition, Prentice hall Pub. 598p.
- 25- Freeze, R. A. and J. A. Cherry. (1979). Groundwater. Prentice Hall, Inc.
- 26- Frits W.J. (1988). Basics of physical stratigraphy and sedimentology, John Wiley & sons.
- 27- Garrels R.M. and Christ C. H. (1965) Solutions, minerals and equilibria. Harper and Row, Newyork, N.Y. 2nd ed.450pp.
- 28- Hwang S., Shin J., Park Y., Park K., Oh H., Choi S., and Lee S. (2005). Application of fluod conductivity logging to identify permeable zones in costal aquifer, Yeonggwang, Korea. Geophysycal Res. Abs., Vol 7, 07906, Sref- ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-07906.
- 29- Jacobs J.A. and Vance D.B. (2005). Groundwater flow in heterogenetic sediments and fractured rock system.In: Water Encyclopedia: Ground Water, edited by Lehr J.H. and Keeley J., 175-177pp .
- 30- Jacobson, R. L. and Langmuir, D. (1974). Controls on the quality variations of some carbonate spring waters. J. Hydrol. 23:247 – 265.
- 31- Jalludin, M. and Razack, M. (1994). Analysis of pumping tests, with regard to tectonics, hydrothermal effects and weathering, for fractured Dalha and stratiform basalts, Republic of Djibouti. J. Hydrol., 155: 237-250.
- 32- Karami, G. H. (2002). Assessment of heterogeneity and flow systems in karstic aquifers using pumping test data, PhD. thesis Univ. of Newcastle, Newcastle upon Tyne.

- 33- Kass, W. (1998). Tracing techniques in geohydrology, A.A, BALKEMA.
- 34- Keys, W.S. (1989). Borehole Geophysics Applied to Ground-water Investigations. National water well Association, Dublin, Ohio, 313 pp.
- 35- Kruseman, G. P. and de Ridder, N. A. (1994). Analysis and evaluation of pumping test data (2nd edn), ILRI Publication, International Institute for Reclamation and development, Wagening, Netherlands, 377 pp.
- 36- Lee J.Y., Choi Y.K., Kim H.S., and Yun S. T. (2005). Hydrologic characteristics of a large rockfill dam: implications for eater leakage. Engineering Geology, 80, 43-59pp.
- 37- Linsley, R.K., Kohler M. A. and Paulhus J.L.H. (1988). Hydrology for engineers. SI metric edition, McGraw-Hill, 492pp.
- 38- Marshak, S. and Mitra, G.(1988). Basic methods of structural geology .
- 39- McNeill,J. D. (1990). Use of electromagnetic methods for groundwater studies. In S.H. Ward (ed.) Geotechnical and environmental Geophysics, Society of exploration geophysicists, Tulsa, vol. 1,pp. 191-218.
- 40- McWhorter, D.B. (1977) Groundwater hydrology and hydraulics, 239pp.
- 41- Meier, P.M., Carrera, J. and Sanchez-Vila, X., (1998). An evaluation of Jacob's method for the interpretation of pumping tests in heterogeneous formations. 1011-1025.
- 42- Mejias M. Lopez-Geta J.A. (2003). Instrumentation and methodology for the hydraulic characterization of fractured rocks.In: proceedings of Int. Conference on Groundwater in Fractured Rocks, 15-19 September Prague, Czech Republic. 275-276pp.
- 43- Milanovic P.T. (1977) Reservoirs in karst – common watertightness problems. Karst waters and Environmental Impacts, Gunay and Johnson (eds), Balkema, Rotterdam, PP.397-400.
- 44- Milanovic P.T. (1981). Karst Hydrogeology. Water Resources Publications, 434 pp.
- 45- Moench, Allen F. (1984). Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin, Water Resources Research, 20(7): 831-846 .
- 46- Motyka J. and Szuwarzynski, M. (1996). Elements of the hydraulic network in Triassic carbonate rocks in the Chrzanow area (S Poland). In: proceedings of international conference on karst-fractured aquifers – vulnerability and sustainability, Katowice-Ustron, Poland, June 10-13, 1996, 151-161.
- 47- Newson M.D. (1972)Comments on seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs, by Shuster E.T. and White W.B., J. Hydrol, 16: 49-51.
- 48- Nichols G. (1999) Sedimentology and stratigraphy, Blackwell Science Ltd.
- 49- Nonveiller E. (1989). Grouting, theory and practice. Elsevier Pub.
- 50- Olaynika, A.I.; Barker, R.D. (1990). Borehole siting in crystalline basement areas of Nigeria with a micro-processor controlled resistivity traversing system. Ground water, vol. 28, pp.178-83.

- 51- Paillet, F.;Duncanson, R. (1994). Comparison of drilling reports and detailed geophysical analysis of ground water production in bedrock wells. *Ground water*, vol. 32, pp.200-6.
- 52- Price, N. J. (1966). *Fault and joint development in brittle and semi-brittle rock*, Pergamon press, Oxford and London.
- 53- Priyadarshi N.(2005). Consolidated water bearing rocks. In: *Water Encyclopedia: Ground Water*, edited by Lehr J.H. and Keeley J., 55-56pp.
- 54- Puldio G., Ballestro T.B., Barrera M.I., Marbet H.J., and Kinner N.E. (2003) Developing a conceptual hydrogeological model for a fractured bedrock formation. In: *proceedings of Int. Conference on Groundwater in Fractured Rocks*, 15-19 September Prague, Czech Republic. 89-90pp.
- 55- Quinlan J.F., Smart P.L., Schindel G.M., Alexander E.C., Edwards A.J., and Smith A.R., (1991). Recommended administrative/regulatory definition of karst aquifer, principles for classification of carbonate aquifers, practical evaluation of vulnerability of karst aquifers, and determination of optimum sampling frequency at springs. In: *Proceedings of the third conference on hydrogeology, ecology, monitoring, and management of groundwater in karst terranes*, Dublin, Ohio, National Ground Water Asso .,pp 573-635.
- 56- Quinlan, J.F. and Ewers, R.O., (1985), Ground water flow in limestone terranes: Strategy rationale and procedure for reliable, efficient monitoring of ground water quality in karst areas, in *National symposium and exposition on aquifer restoration and ground water monitoring*, 5th, Columbus Ohio, 1985, *Proceedings: Dublin, Ohio*, p. 197-234.
- 57- Raeisi, E. and Karami, G. (1996). The governing factors of the physico-chemical characteristics of Sheshpir karst spring, Iran. *Carbonates and Evaporates*. 11(2):162–169.
- 58- Raeisi, E. and Karami, G. (1997). Hydrochemographs of Berghan karst spring as indicators of aquifer characteristics. *J. of Cave and Karst Studies*. 59(3): 112 – 118.
- 59- Ragan D. M. (1984). *Structural geology and introduction to geometrical techniques*.John Wiley & sons, New York, 416 pp.
- 60- Rovey II , C.W., (1994). Assessing flow systems in carbonate aquifers using scale effects in hydraulic conductivity. *Environmental Geology*, 24: 244-253.
- 61- Sanchez-vila, X., Meier, P.M., and Carrera, J., (1999). Pumping test in heterogeneous aquifers: an analytical study of what can be obtained from their interpretation using Jacob's method. *Water Resour. Res.*, 35(4), 943-952.
- 62- Sandberg, S.K. (1993). *Microcomputer software for individual or simultaneous inverse modeling of transient electromagnetic, Resistivity and induced polarization soundings*. New Jersey geological survey, Open file report OFR 90-1.
- 63- Sauter, M. (1991) Assessment of hydraulic conductivity in a karst aquifer at local and regional scale, In *proceedings of the Third Conference on Hydrogeology, Ecology, Monitoring, and Management of Ground Water in Karst Terranes*. Dublin, Ohio: National Ground Water Association, pp 39-57.

- 64- Scanlon B.R. and Thrailkill J. (1987) Chemical similarities among physically distinct spring types in a karst terrain: *J hydrology*. 89:259-279.
- 65- Shedlock, S.L. (1990). Borehole geophysical logging within crystalline basement aquifers, Vol.2, pp.149-68, Commonwealth Science Council Pub.
- 66- Shuster, E. T. and White, W. B. (1971). Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs: A possible means for characterising carbonate aquifers. *J. Hydrol.* 14: 93 – 128.
- 67- Shuster, E. T. and White, W. B. (1972). Source areas and climatic effects in carbonate groundwaters determined by saturation indices and carbon dioxide pressures. *Water Resour. Res.* 8 (4): 1067 – 1073.
- 68- Spane F.A. (2002) Considering barometric pressure in groundwater flow investigations, *Water Resources Research*, 38(6): 1410-1418.
- 69- Stone W. J. (1999). *Hydrogeology in practice - a guide to characterising groundwater systems*. Prentice Hall, 248 pp .
- 70- Ternan, J. L. (1972). Comments on the use of calcium hardness variability index in the study of carbonate aquifers: with reference to Central Pennines, England. *J. Hydrol.* 16: 317 – 334.
- 71- Theis, C.V., (1935) The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, *Transactions of American Geophysical Union*, Vol. 16, pp 519-524.
- 72- Thrailkill, J. (1981). *Flow Parameters in a shallow conduit-flow carbonate aquifer, Inner Bluegrass Karst Regions, Kentucky, USA* .
- 73- Todd, D. K. (2005). *Groundwater hydrology (2nd edn)*, John Wiley & sons, New York, 539 pp.
- 74- U.S.G.S. (1990). *Integrated methods for characterising a fractured rock aquifer*. The USGS office of ground water, branch of geophysics web site at <http://water.usgs.gov/ogw/bgas/>
- 75- Van Overmeeren., R.A. (1981). A combination of electrical resistivity, seismic refraction and gravity measurements for groundwater exploration in Sudan. *Geophysics* ,vol.46., pp.1,304-15.
- 76- Vozoff, K. and Jupp, D.L.B. (1975). Joint inversion of geophysical data. *Geophysics*, *Jl Roy. Astr. Soc.* Vol.50, pp.333-52.
- 77- White W. B. (1988). *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. Oxford University Press, 464 pp.
- 78- White, C.C; Houston, J.F. T.; Barker, R.D. (1988). The Victoria province drought project, I. Geophysical siting of Boreholes. *Ground water*, vol. 26, 309-16.
- 79- White, W. B. (1969). Conceptual models for carbonate aquifers. *Ground Water*, 7(3): 15–21.
- 80- White, W. B. and Schmidt V. A. (1966). Hydrology of karst area in East – Central West Virginia. *Water Resour. Res.*, 2: 549 – 560.

- 81- White, W.B. (1999). Conceptual models for karstic aquifers, In: Palmer, A.N., Palmer M.V., and Sasowsky, I.D., West Virginia. Karst Modelling, Karst waters institute special publication 5, 259-261 .
- 82- Worthington, P.F. (1977). Geophysical investigations of ground water resources in the Kalahari Basin. Geophysics, vol. 42, pp. 838-49.

خواننده گرامی

امور نظام فنی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، با گذشت بیش از سی سال فعالیت تحقیقاتی و مطالعاتی خود، افزون بر پانصد عنوان نشریه تخصصی- فنی، در قالب آیین‌نامه، ضابطه، معیار، دستورالعمل، مشخصات فنی عمومی و مقاله، به‌صورت تالیف و ترجمه، تهیه و ابلاغ کرده است. نشریه حاضر در راستای موارد یاد شده تهیه شده، تا در راه نیل به توسعه و گسترش علوم در کشور و بهبود فعالیت‌های عمرانی به کار برده شود. فهرست نشریات منتشر شده در سال‌های اخیر در سایت اینترنتی nezamfanni.ir قابل دستیابی می‌باشد.

Islamic Republic of Iran
Vice Presidency For Strategic Planning and Supervision

Guideline for Using Tracers in Evaluation of Leakage from Dam's Reservoir and Abutments

No .561

Office of Deputy for Strategic Supervision

Department of Technical Affairs

nezamfanni.ir

Ministry of Energy

Bureau of Engineering and Technical
Criteria for Water and Wastewater

<http://seso.moe.org.ir>

2012

این نشریه

این راهنما با هدف بررسی خصوصیات هیدروژنولوژیکی سازندهای کارستی و ارائه راهکارهایی جهت چگونگی کاربرد مطالعات زمین‌شناسی، هیدروژنولوژیکی، بررسی‌های اکتشافی و نهایت مطالعات ردیابی در پتانسیل آب‌بندی این سازندها در قبل از احداث سدها و پس از آبیگری مخازن تهیه شده است.