دکتر سعدالله ولایتی
شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان

نکاتی چند پیرامون نفوذپذیری سازندهای سخت کربناته

کلیات :

سازندهای زمین‌شناسی را در پیوند با آب وسفره‌های آب زیرزمینی بطور کلی به دوگروه بزرگ تقسیم می کنند:

الف ـ سازندهای سخت

ب ـ سازندهای سخت‌نشده یا نرم

سازندهای سخت خود به‌دو دسته الف ـ سازندهـای سخت کربناته . ب ـ سازندهای سخت غیر کربناته تقسیم می‌شوند .

آب نافذ ، یعنی آن بخش از نزولات جوی که پس ازتبخیر و رواناب باقی می‌ماند ، در زمین نفوذ می کند ودرمیان فضاهای خالی سازندهـای مزبور جای می گیرد وچنانچه تمام فضاهای خالی موجود در سازند را پر و بتواند تحت تأثیر نیروی ثقل حرکت کند ، تشکیل سفرهٔ آب زیرزمینی (آکیفر) را می‌دهد . آب موجود در این سفره‌ها ، یا بطور طبیعی وبدون دخالت انسان درسطح زمین بصورت چشمه ظاهر می‌شود ویا آنرا بـا حفر قنات وچاه بطورمصنوعی اززیر زمین خارج‌می کنند وبه‌مصرف می‌رسانند.

فضاهای‌خالی مزبورکه آب نافذ قادراست درآن جای گرفته به‌حرکت درآید، در سازندهای سخت ونرم بصورتهای گوناگون بوجود می‌آید . در

سازندهای سخت‌نشده ، فضاهای خالی بین دانه‌های رسوب کـه به‌تخلخل موسوم است، آب را درخود جای می‌دهند ، ولی درسازندهای سخت درز و شکافها ، مجاری زیرزمینی وغارها، بطورکلی عوارض کارستی، این‌وظیفه را به‌عهده دارند . هرچه فضاهای خالی بیشتر باشد، مقدار ذخیره‌شده آب زیادتر خواهد بود.(شکل ۱) زیر سه‌نمونه ازفضاهای خالی‌را نشان‌می‌دهد.

شکل ۱ــ سه‌نمونه ازفضاهای خالی درسفره‌های مختلف آب زیرزمینی .

ازآنجا که سازندهای زمین‌شناسی بطور طبیعی ازنظر لیتولوژیکی و تکتونیکی ونیز ازنظر قطر، نحوهٔ قرارگرفتن‌دانه‌هاوتراکم‌آنهابایکدیگر تفاوت دارند ، محیطهای ایجاد شده وهمچنین فضاهای خالی ایجادشده نیز با یکدیگر متفاوتند ودرنتیجه بین آنها ناهمسانی و ان ایزوتروپی دیـده می‌شود .

مطالعه وبررسی فضاهای خالی ، بویژه فضاهای خالی مؤثر ومفید و نیز عملکرد آنها، درزمینه برآورد حجم مخازن آب زیرزمینی ، از اهمیت زیادی برخوردار است .

صرف‌نظر ازبعضی سازندهای سخت نظیر ماسه سنگها، توف وسنگهای آهکی‌متخلخل وکنگلومراها که‌علاوه‌بردرز وشکاف‌وگسل، دارای‌تخلخل نیز هستند، در بقیه سازندها یسخت غیرکربناته تنها درز وشکافها وگسلها جای‌دهندهٔ آب نافذ هستند. این درز وشکافها ویا گسلها دراثر رخدادهای زمین ساختی ویا سردشدن سنگها ایجاد می‌شوند. زیرا که این سنگها سخت وشکننده هستند . طبیعی است کـه همهٔ درز و ترکها قـادر به‌هدایت آب

نیستند . برای این‌که آب بتواند در درون درز وترکها بحرکت درآید باید فراخی آنها بزرگتر از $4\mu m$ باشد. ولی درسازندهای سخت کربناته که موضوع اصلی بحث این مقاله است، وقتی که آب توانست از درون درز و ترکها بحرکت درآید، فرآیند کارستی‌شدن که یك‌فرآیند شیمیائی‌است، مؤثر می‌افتد وموجب بازشدن فضاهای خالی اولیه می‌شود . به‌اینصورت که آب نافذ تا مادام که قدرت خورندگی آهك را دارد ، درحین حرکت بردیواره درز وترکها اثر می‌گذارد وآهك را براساس رابطه زیر درخود حل کرده، ازمحل دور میسازد :

$$CaCo_3 + H_2O + Co_2 \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2Hco_3^-$$

(آهک جامد) (آهک محلول)

قدرت خورندگی آب نافذ، ناشی از گاز کربنیك موجود درآن است. نزولات جوی مقداری از Co_2 هوا را درخود حل وتولید اسید کربنیك می‌کند . اسید کربنیك سنگ آهك و دولومیت ($Mg\ ca\ (Co_3)_2$) را طبق رابطه سابق‌الذکر به‌صورت بیکربنات کلسیم ($Ca(Co_3H)_2$) ویا منیزیم حل کرده ، ازمحل دور می‌سازد .

لازم به‌تذکر است که کارستی‌شدن تنها به‌سنگهای کربناتی محدود نمی‌شود بلکه سنگهای دیگری مانند نمك سدیم (هالیت) ، ژیپس و کوارتزیت (کوارتزیت فقط درشرایط بسیار گرم ومرطوب) نیز کارستی می‌شوند .

گرچه مطالعه نحوهٔ کارستی‌شدن این سنگها واشکال مختلف کارست درمطالعه کارست هیدرولوژی یك منطقه به‌ما کمك زیادی می‌کند ، معهذا درحال حاضر موضوع بحث ما نیست .

باتوجه به‌مطالب مزبور روشن است که اولین شرط ایجاد پدیده‌های

کارستی وجود درز وترك وشکستگی‌اولیه، ودومین وسومین‌شرط به‌ترتیب وجود آب حاوی گاز کربنیك وجریـان آن در زیرزمین است. فـرآیند کارستی می‌تواند تا آنجا پیش رود که ارتفاعات عظیم آهکی و دولومیتی را به‌منطقه‌ای هموار مبدل کند.

تا قبل ازنیمه دوم قرن اخیر، محققان تصور می‌کردند که منبع‌اصلی تأمین‌کنندهٔ گازکربنیك محلول درآب‌نافذ، هواست. با اوج‌گیری‌مطالعات کارست هیدروژئولوژی، معلوم شد کـه‌گاز کربنیك حاصل ازهوا ویـا خاکهای هوموس‌دار، برای ایجاد فضاهای خالی وبزرگ دراعماق زمین (بخش فرایتك) کافی نیست. زیرا گازکربنیك حاصل ازهوا درمدت‌زمان کمی که آب از درون درز وشکاف عبور کرد مصرف می‌شود وبه‌اعماق‌زیاد زمین نمی‌رسد.

با بررسیهایی‌که آلفردبوگلی[1] دراین‌زمینه انجام داد به‌نتیجه‌ای‌بزرگ وارزشمند دست یافت. وی بعداً نظریـات خود را تحت عنوان «خوردگی آهك مسأله اصلی کارستی‌شدن زیرزمین»، تدوین وارائه کرده است.

گرچه قبل ازمطالعات بوگلی ونظریه وی که بعداً به‌نظریه خوردگی مخلوط Mixcorrosion معروف شد، عملکرد این پدیده در کانالهای آبرسانی مشاهده شده بود، معهذا این امتیاز بزرگ نصیب بوگلی شد.

نظریه خوردگی مخلوط می‌گوید که وقتی دوآب که غلظتهای‌مختلفی ازآهك دارند، با یکدیگرمخلوط شوند، بطور لحظه‌ای مقدار زیادی گاز کربنیك تولیدمی‌شود که مجدداً می‌تواند درآب حل‌گشته قدرت‌خورندگی آب را افزایش دهد، جدول زیر این مطلب را نشان‌می‌دهد. برای مثال در ستون (دو) که دوآب* مختلف به‌نسبت ۱:۱ وبه‌غلظتهای ۱۱/۵ و۳۲۹/۶

1: A. Boegli

* W_1 , W_2

ازآهك با یکدیگر مخلوط شده‌اند ، به‌میزان ۵۸ گرم درمتر مکعب آهك اضافی حل شده است . به‌عبارت دیگر گاز کربنیك اضافی تولیدشده قادر به‌حل این مقدار آهك اضافی شده است . وچون آبهای مختلف با غلظتهای مختلفی ازآهك درهرعمقی اززمین بـوجود می‌آیند وقادرند بـا یکدیگر مخلوط شوند ، بنابراین خوردگی دراعماق مختلف زمین می‌تواند صورت گیرد . امروزه کلیه مطالعات مربوط به‌کـارست وغار برنظریه خوردگی مخلوط استوار است .

جدول ۱ــ مقدارآهك اضافی قابل حل در اثر خوردگی مخلوطدر۱۵درجه سانتیگراد

غلظت اولیه آبها		نسبت مخلوط با مقدار آهک اضافی قابل حل برحسب گرم در مترمکعب		
W_1 ppm $CaCO_3$	W_2 ppm $CaCO_3$	3:1	1:1	1:3
11,5	125,0	4,5	5,0	4,0
11,5	221,6	15,5	24,5	19,5
11,5	329,6	35	58	55
73,9	125,0	1,3	2,5	2,0
73,9	221,6	9,6	14	11
73,9	329,6	25	41	37
125,0	170,5	0,9	1,1	0,8
125,0	272,7	9,5	14	10,8
125,0	358,0	21	34	32

مطالعه اشکال وسیستمهای مختلف کارست ونیز نحوهٔ جریان آب از درون این سیستمها امروزه در شاخه‌ای از زمین‌شناسی فیزیکی به‌نام کارست هیدروژئولوژی بررسی ومطالعه می‌شود .

باتوجه به‌این‌که سازندهای سخت کربناته بخش وسیعی از سطح کره زمین را می‌پوشانند ، مطالعه عملکرد جریان آب دراین سازند وبهره گیری ازآن حائز اهمیت فراوانی است . درمناطق خشك تا نیمه‌خشك، نظیر کشور ما ایران ، بخصوص درشرایطی‌که بیشترسفره‌های آبرفتی دراثرعدم توازن درتغذیه وتخلیه یا خشك شده‌اند ویا درحال خشك‌شدن هستند ، مطالعه و بررسی سفره‌های آب در سازندهای سخت آهکی وغیرآهکی اهمیت زیادی دارد . بعلاوه مطالعه پدیده‌هـا وسیستمهای کارست در ارتباط بـا احداث سدهای مخزنی ، ابنیه وجاده درمناطق آهکی ، دارای اهمیت است .

حرکت آب از راه فضاهای خالی در سازندهای سخت کربناته ، تابع هیچ قاعده وقانون مشخص ومعینی نیست ، مگر نظم وترتیبی که خود آب درحین حرکت درطول زمان درآن ایجاد می کند. به‌همین دلیل استثناهای زیادی دراین زمینه وجود دارد. به عبارت‌دیگر مناطق کـارستی در زمینه آبهای زیر زمینی فریبنده هستند .

در سازندهای سخت غیرکربناته ، آب عمدتاً درجهت شیب لایه‌هـا و یا در جهت گسلها ودرز وشکافها جریـان می‌یابد ، درحالی‌که در منطقه کارستی علاوه براین‌که ممکن است عوامل مزبور نقش داشته‌باشند، عوامل دیگری نیز ازقبیل مجاری بزرگ زیرزمینی که گاه بطور منفرد و مجزا عمل می‌کنند ، دخالت دارند ونقش اصلی را در زه‌کشی بعهده می‌گیرند و سایر عوامل نقش فرعی دارند . ویـا ممکن است آب بجای این‌که از شیب لایه‌ها وجهت عمومی گسلها تبعیت‌کند، ازراه درز وشکافهای عمود برشیب لایه‌ها زه‌کش شود . همین استثناها درزمینه حرکت آب وآبراهه‌هاست که بردشواری مطالعات می‌افزاید . مع‌هذا بررسیهای انجام‌شده نشان می‌دهد که مناطق کارستی را می‌توان بطور کلی به‌سه منطقه بزرگ تقسیم کرد :

ـ مناطقی که عمدتاً از لوله‌هـا ومجاری منفرد زیـرزمینی تشکیل

شده‌اند و آب از درون آنها زه‌کش می‌شود .

ـ مناطقی که عمدتاً دارای درز وشکاف و گسل‌اند و آب زیرزمینی از راه آنها به‌حرکت درمی‌آید .

ـ مناطق بینابینی ، یا مناطقی که آب زیرزمینی هم ، از درون لوله‌ها ومجاری زیرزمینی وهم ، ازراه درز وشکاف و گسل زه‌کش می‌شود .

روشن است که برای نیل به‌هرهدف مطالعاتی درمنطقه کارستی ، به‌دستورالعمل مشخصی نیاز است . مع‌هذا بین همهٔ دستورالعمل‌ها وجه مشترکی وجود دارد که باید رعایت شود . نکاتی که اجرای آنها درمطالعه شناسایی هرمنطقه کارستی ، ضروری است بشرح زیرند :

ـ بررسی دقیق وضعیت زمین‌شناسی ـ تکتونیکی منطقه ، بویژه مشخص کردن لایه یا لایه‌های آبدار ولایه یا لایه‌های غیرقابل نفوذ وسدـ کنندهٔ آب .

ـ مطالعه رفتار چشمه‌های کارستی در زمینه دبی، درجه حرارت آب، کیفیت وحالتهای دیگری نظیر تیره‌شدن آب پس ازهرر گبار ویا نوسانات لحظه به‌لحظه دبی چشمه .

ـ مطالعه پدیده‌های مختلف کارست درسطح زمین .

انجام آزمایشهای‌ردیابی، درنقاطی‌که امکان‌آن وجود دارد. تفسیر و تحلیل نمودار ماده ردیاب در پیوند با دبی چشمه ونزولات جوی.

ـ اندازه‌گیری میزان بارندگی ، درجه حرارت هوا، تبخیر ورطوبت نسبی منطقهٔ تحت مطالعه .

ـ گردآوری نتایج چاههای اکتشافی وچاه‌پیمایی چاه یا چاهها (در صورت موجودبودن) . تفسیر منحنیها و تعیین رابطه آنها با وضعیت هیدروژئولوژیکی منطقه .

ـ انجام مطالعات ژئوفیزیك (سایسمیك) نیز می‌تواند در شناخت

وضعیت کارست‌یك منطقه‌مؤثر واقع شود .

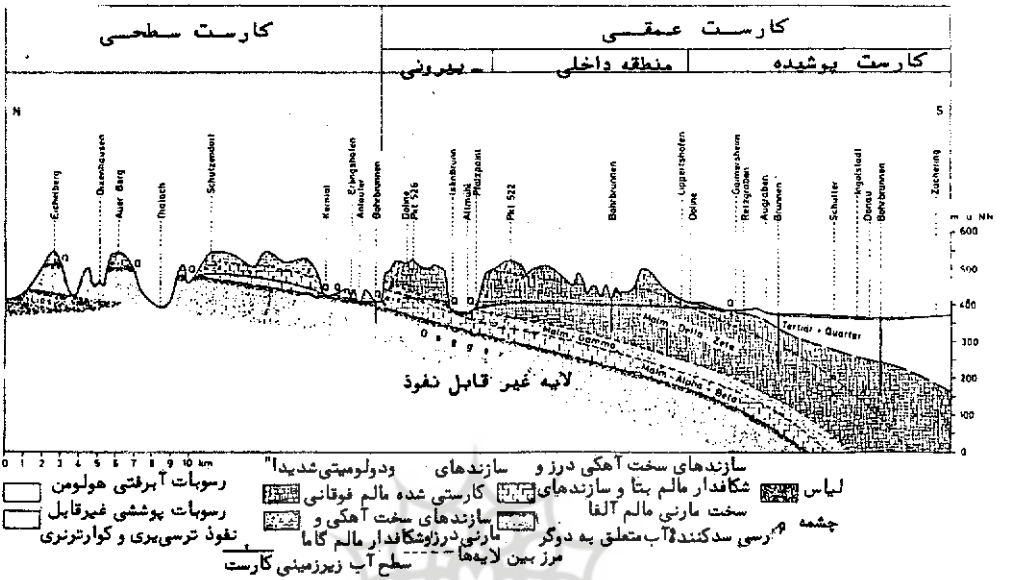
درمیان نکات برشمرده شده ، سه نکته از اهمیت بیشتری برخـوردار است که ذیلاً مورد بررسی اجمالی قرار می‌گیرد :

زمین‌شناسی

بررسی وضعیت زمین‌شناسی منطقه کارستی جزو مطالعات اساسی است و باید به‌آن توجه زیادی کرد. اگرنقشه زمین‌شناسی ازمنطقه موجودباشد، کار آسان خواهد بود . پس ازیك کنترل مجدد، می‌توان به‌موقعیت وابعاد لایه‌های مورد نظر پی‌برد . این‌که دراغلب اوقات تعیین حجم مخزن (ولو بطور تقریب) وآب موجود در آن بـرایمان دشوار است ، دلیلش علاوه‌بر ندانستن میزان ضریب ذخیره، عدم‌اطلاع کافی ازموقعیت وابعاد آکی‌فرنیز است .

حصول شناخت از لایه یا لایه‌های سدکنندهٔ آب (لایه غیرقابل نفوذ) نیز ضروری است ، زیرا بدون وجود چنین لایه‌ای جلوگیری ازنفوذ آب به‌اعماق وایجاد آکی‌فر ، ناممکن خواهد بـود. مضافاً این‌که دریك منطقه بزرگ کارستی ، چندین لایه آبدار وچندین لایه غیرقابل نفوذ ممکن‌است بطور متوالی وجود داشته باشند . درچنین حالتی ، جداکردن این لایه‌هـا روی نقشه زمین‌شناسی وموقعیت توپوگرافی آنها، مارا در بررسی وتفکیك نوع کارست یاری خواهد داد. برای مثال چنانچه لایه سدکننده آب بالاتر ویا هم‌سطح کف دره (محل آبریز) واقع شده باشد ، کارست روی آنرا کارست سطحی واگر لایه سدکنندهٔ آب زیر کف دره واقع باشد، کـارست منطقه را کارست عمقی می‌گـویند . شکل زیر این دو منطقه کـارستی را به‌تفکیك نشان می‌دهد .

اهمیت تفکیك کارست سطحی وعمقی دراین است که این دو منطقه



شکل۲ــ پروفیل از منطقه کارستی آلب فرانکن جنوبی (از وایدین‌باخ، ۱۹۴۵)
(Weidenbach)

ازبسیاری‌جهات با یکدیگر تفاوت‌دارند، بویژه ازلحاظ سیستمهای کارست ورفتار چشمه‌های موجود دراین دومنطقه . برای مثال چشمه‌هـای منطقه کارست سطحی ، ازحیث دبـی، درجه حرارت ، کیفیت وتیرگی نوسانات زیادی دارند . مهمتر ازهمه این‌کـه ، پتانسیل آبی منطقه کارست سطحی حندان زیاد نیست ومخزن این‌گونه مناطق اغلب درطی یك دوره خشك‌ـ سالی، خالی می‌شود. به‌همین‌دلیل برای تأمین آب شرب یك منطقه‌مسکونی به‌هیچ‌وجه نباید به‌سراغ چشمه‌های موجود درمنطقه کارست سطحی رفت.

شناسایی سنگهای کربناته ازنظر نوع (آهك، دولومیت) ودرجه‌خلوص حائز اهمیت فراوانی است ، زیرا تا مدتها پیش دانشمندان عقیده داشتندکه دولومیت کارستی نمی‌شود. ولی امروزه همه می‌دانیم که درمنطقه دولومیت

نیز عوارض کارستی زیاد است . مع‌هذا هرچه سنگ آهك خالصتر باشد، بهتر وبیشتر کارستی می‌شود. سنگهایی که کاملاً کارستی می‌شوند از ۹۰ـ ۹۵ درصد کربنات کلسیم ($CaCo_3$) تشکیل شده‌اند .

ـ تکتونیك (ماکرو ، میکرو)

بررسی وضعیت تکتونیکی هرمنطقه کارستی در زمره مطالعات پایه و اصلی محسوب می‌شود وهرچه دراین مـورد بیشتر دقت شود، نتایج بهتری درمورد فضاهای خالی ودر نهایت حجم مخزن آب، به‌دست می‌آید .

سازندهای سخت کربناتـه دارای‌خاصیت شکنندگی هستند ودراثـر نیروهای پرسی وکششی که درحین رخدادهای زمین ساختی وغیره برآنها وارد می‌آید متأثر وشکسته‌می‌شوند، وبسته به‌مقدارنیروی‌وارده وچگونگی جنس لایه‌ها ، ترکها ، درزها ، شکستگیها وگسلها درآنها ایجاد می‌شود . همین فضاهای خالی اولیه است که بعداً می‌تواند فراخ وتوسط آب پر شود ومخازن بزرگ زیرزمینی را بوجود آورد .

همانگونه که قبلاً اشاره شد ، آب نافذِحاویِ co_2 درحین عبور از درز و شکاف وگسلها ، بردیوارهٔ آنها اثر گذاشته سبب فراخترشدن آنهـا می‌شود دراین صورت روشن است کـه بدست‌آوردن شناخت کافی از این پدیده تکتونیکی درمورد آبهای زیرزمینی حائز اهمیت فراوان است .

دراین مورد روشهای مختلفی پیشنهاد می‌شود ومحقق طبق نظر خود باتوجه به‌وضعیت منطقه ، روش مـورد نظر را انتخاب وبراساس آن عمل می‌کند . درعین حال برای مطالعه مقدماتی، انجام نکات‌زیر ضروری‌است:

ـ اندازه‌گیری طول وجهت گسلها، میزان جابجایی لایه‌ها، تشخیص نوع گسل، میزان بازشدگی زمین وترسیم نمودارهای مربوط .

ـ اندازه‌گیری جهت وشیب شکستگیها وترسیم نمودارهای مربوط .

ـ اندازه‌گیری جهت ، طول ودهانه شکافها .

ـ تعیین جهت و شیب لایه‌ها، درصورت امکان تعیین جهت و شیب لایه آبدار.
ـ اندازه گیری طول و جهت دره‌ها و تعیین نوع آنها و ترسیم نمودارهای مربوط.
ـ درصورت امکان، اندازه گیری و تعیین میزان و تغییرات درز و شکافها از سطح به‌عمق (از روی کر).

پس ازبررسی و مطالعه پدیده‌های مزبور، باید نتایج حاصل را مورد تجزیه و تحلیل دقیق قرار داده و باتوجه به‌آن، تجسمی از مقدار درصد فضاهای خالی منطقه بدست آورد.

ردیابی

به‌منظور کسب اطلاع ازنوع و نحوهٔ قرارداشتن آبراهه‌های زیرزمینی، تعیین جهت حرکت و سرعت آب از درون پدیده‌های کارست و تعیین حد و مرز حوزه آبگیر زیرزمینی یك یا چند منبع آبی درمنطقه کارستی، آب‌را ردیابی می‌کنند.

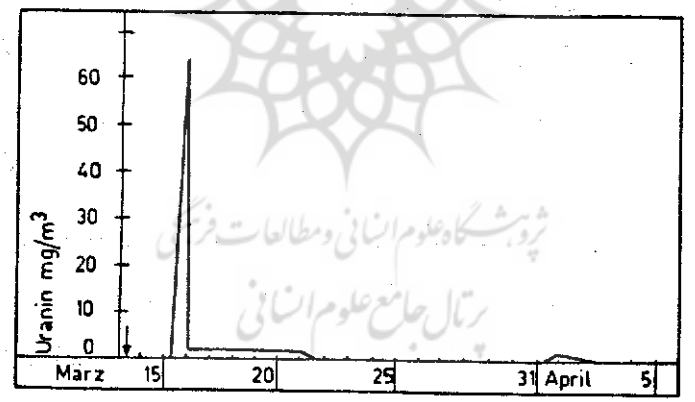
همهٔ آزمایشهای ردیابی ازاین قاعده کلی پیروی می‌کنند که یك ماده ردیاب را درمحل معینی (دولین، شکاف) همراه با مقدار نسبتاً زیادی آب می‌ریزند ودرانتظار آن درمحل خروج (معمولاً محل احتمالی خروج، چاه یا چشمه) می‌نشینند. چنانچه ماده ردیاب درمحل دیده شد، معلوم می‌شود که بین محل تزریق ومحل ظهور، رابطه هیدرولیکی وجود دارد.

مواد ردیاب، مختلف ومتنوع هستند. اولین ماده ردیابی که برای این منظور بکار رفته مارماهی بوده است. ولی امروزه ازمواد ردیاب بسیار حساسی مثل مواد رادیواکتیو نیز استفاده می‌کنند. معمولاً هرمحقق بسته به‌نظر خود ماده ردیاب را انتخاب می‌کند، ولی تاکنون اورانین ($C_{20}H_{10}O_5Na_2$) از همه بهتر وعملی‌تر تشخیص داده شده است. بویژه اگر

امکانات فنی مجهز وپیشرفته موجود نباشد .

اورانین درآب بخوبی محلول‌است. رنگ جامد آن قرمز تیره ورنگ محلول آن سبز روشن است . این ماده به‌نسبت $۱ : ۱۰^{۱۲}$ (یك گرم دریك میلیون تن آب) بوسیله دستگاه فلئورسین اسپکترومتر بخوبی قابل‌تشخیص است . وبه‌نسبت $۱ : ۱۰^{۷}$ بوسیله چشم غیرمسلح دیده می‌شود . دیگر این‌که اورانین نه‌برای موجودات زنده ونه‌برای انسان مسمومیتی ایجاد نمی‌کند . بهمین دلیل ازاین‌ماده برای ردیابی منابع‌آب مصرفی نیز استفاده می‌کنند.

از نمودار غلظت ــ زمان که نمونه‌ای از آن درزیر نشان داده شده ، درصورت داشتن تجربه کافی ، می‌توان برای شناسائی سیستمهای کارست بهره‌برداری زیادی کرد .



شکل۳ــ نمودار غلظت ــ زمان آزمایش ردیابی .

با استفاده نمودار مزبور می‌توان علاوه‌بر تعیین غلظت ماده ردیاب ، زمان تزریق وزمان ظهور آنرا نیز مشاهده کرد. این نمودارها معمولاً دارای یك یا چند ماکزیمم ویك یا چند مینیمم‌هستند. اگرتنها یك‌ماکزیمم داشته باشند ، معلوم می‌شود که مسیر جریان درزیر زمین ساده است ومشکل

چندانی وجود نـدارد . درنتیجه می‌تـوان متوسط سرعت خطی (V_m) را بصورت زیر محاسبه کرد :

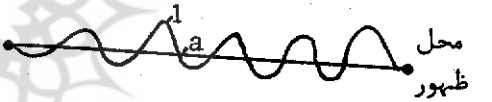
$$V_m = \frac{a}{t}$$

در رابطه فوق :

a = فاصله هوایی بین محل تزریق ومحل ظهور

t = زمان تزریق تا زمان ظهور ماده ردیاب

نظر به‌این‌که مسافت واقعی بین دو نقطه تزریق وظهور در زیرزمین، همیشه بزرگتر ازفاصله هوایی آن است، درمحاسبات ازفاکتور اصلاحی یا طویل کننده ($f = \frac{L}{a}$) استفاده می کنند .



$$V'_m = f \frac{a}{t}$$

چنانچه میزان دبی چشمه معلوم باشد، می‌توان حجم شبکه‌خالی زیر- زمین(V)را تعیین کرد.

$$V = Q \cdot t_m$$

Q = دبی چشمه

t_m = زمان متوسط

پراندت[2] (۱۹۶۹) می‌نویسد کـه سرعت ماکزیمم ۱/۳ برابر سرعت متوسط ($V_{max} = 1,3\ V_m$) است وحداکثر سرعت (اولین سرعت ظهورماده) را به‌محل چشمه درمدت زمان t_1 نشان می‌دهـد، یعنی $\frac{a}{t_1}$. درنتیجه

2- Prandt

سرعت متوسط (V_m) درمدت زمان (t_m) به‌دست می‌آید، زیرا a ثابت‌است، و $t_m = 1,3\ t_1$. درنتیجه رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$V = 1,3 \cdot Q \cdot t_1$$

V = حجم مخزن m^3

Q = دبی چشمه m^3/se

t_1 = زمان se

متوسط مساحت مقاطع شبکه زیرزمینی از رابطه زیر به‌دست می‌آید :

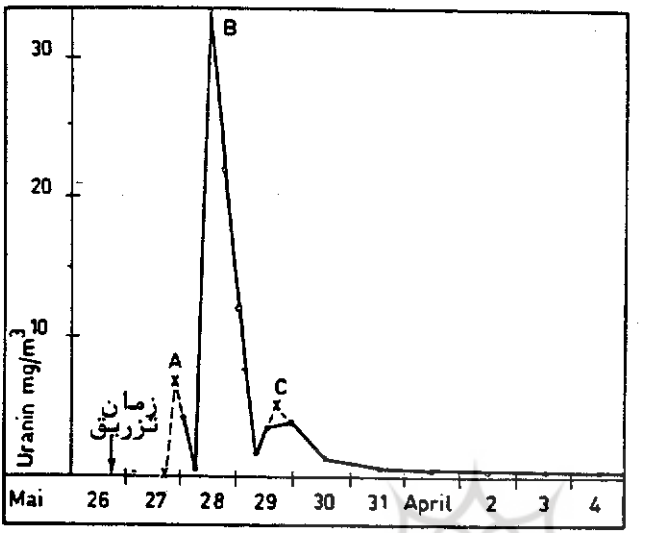
$$A_m = \frac{Q}{V_m} = 1.3 : \frac{Q}{V_{max}}$$

لازم به‌تذکر است که محاسبات مزبور وقتی صادق است کـه V و A تنها متعلق به‌یك لوله یا مجرا باشد. درطبیعت اغلب پیچ وخمها وتنگی و گشادی مجاری، شاخه‌های فرعی ونیز رابطه یك مجرا با مخازن مجاور، وجود دارد.

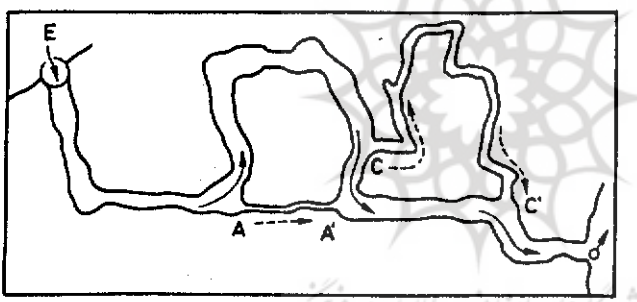
درحالت دیگر ممکن است که یك نمودار علاوه‌بر یك ماکزیمم ویك می‌نیمم دارای یك ماکزیمم اصلی و دو ماکزیمم فرعی بـاشد، مانند شکل زیر (٤).

نمودار شکل (٤) که نتیجه آزمایش ردیـابی درمحدوده چشمه زرد واقع در حوضه آبریز دریاچه تونر می‌باشد، نشان می‌دهد که مدتی پس‌از تزریق، ماده ردیـاب درنقطه (E)، درمحل چشمه (♂) ظاهر شده وپس از رسیدن به‌نقطه ماکزیمم، درمدت زمان کوتـاهی به‌نقطه می‌نیمم می‌رسد. مجدداً میزان ماده‌ردیاب افزایش‌یافته به‌ماکزیمم (ماکزیمم اصلی) می‌رسد. بعلاوه ماکزیمم ومی‌نیمم دیگری نیز در نمودار دیده می‌شود.

باتوجه به‌روند نمودار، مدلی طراحی وارائـه شده است (شکل ٤).



شکل ٤ــ منحنی غلظت ــ زمان برای اورانین در چشمه زرد واقعْ در حوضهٔ آبریز دریاچه تونر[3] (سویس)، از سیمونی[4].



مدل یك مجرای زیر زمینی

این مدل بطوری که در گزارش آمده ، بعداً چندین‌بار مورد تأیید واقع‌شده است .

مدل مزبور وضعیت زیرزمین را درمنطقه اشباع به‌نمایش می گذارد . حرکت جریان آب بقدری کند است کـه اصطکاك اهمیت چندانی ندارد . مجرای اصلی دارای پیچ وخم است ویك مجرای باریك درمسیر A - A' در زیر مجرای اصلی یافت می‌شود . همچنین بین C - C یك پیچ تنگ وجود

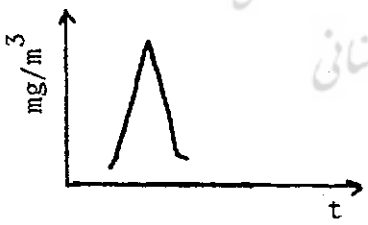
3- Thunersee

4- Simeoni (1973)

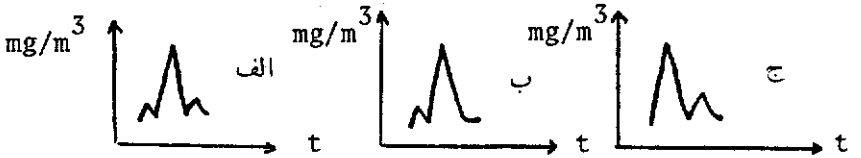
دارد . درنتیجه بخش اصلی آب ازراه مجرای اصلی جریان می‌یابد ولی مقدار کمی ازماده ردیاب با آب ازراه باریك A - A' (مراجعه بهشکل ٤) عبور کرده است وچون‌مسیر کوتاه‌تری را طی می‌کند با آبی که فاقد ماده ردیاب بوده است وازمجرای اصلی حرکت می‌کند، مخلوط وبا غلظتی کم بصورت اولین جبهه ماده ردیاب وارد چشمه می‌شود (اولین ماکزیمم). سپس جبهه دوم واصلی وارد چشمه می‌شود (دومین ماکزیمم) . در مرحله آخر، مقداری ازماده ردیاب ازمسیر C - C' وارد چشمه می‌شود (ماکزیمم سوم) .

صرف‌نظر از حالتهای استثنایی ، بطورکلی، نتایج آزمایشهای ردیابی نشان می‌دهد که در مناطق کارستی ممکن است سه نوع منحنی غلظت ـ زمان بدست آید :

ـ هنگامی‌که آب زیرزمینی از درون لوله‌های منفرد ومجزا حرکت می‌کند ، شکل منحنی به‌صورت زیر است . حجم مخزن ومساحت مقاطع لوله‌ها باتوجه به‌روابط سابق‌الذکر محاسبه می‌شود .



ـ وقتیکه آب ازراه لوله‌های پرپیچ وخم حرکت کند ، شکل منحنی ممکن است به‌صورتهای زیر باشد .



ـ آب زیرزمینی اگر از درون درز وشکاف‌ها حرکت کند، وضعیت منحنی بصورت زیـر است. این منحنی دارای یك صعود نسبتاً تند و یـك نزول ملایم وطویل‌المدت است.

درصورتی که منحنیهای بدست آمده دریك منطقه تحت مطالعه دارای هرسه شکل مزبور باشند، باید سعی کرد حتی‌الامکان آنها را جدا ومنطقه را براساس آنها ارزیابی کرد.

بهرصورت به‌کمك آزمایشهای ردیـابی که هزینه چندان زیـادی هم نمی‌برد، می‌توان تا حدودی سیستمهای کـارست منطقه را برای مطالعات بعدی بررسی کرد. برای مثال با آزمایشهای ردیابی در حوضهٔ آبگیر یك منطقه، محدوده یا حوضه آبگیر زیرزمینی یك منبع آب مصرفی یك‌شهر را بصورتی که درشکل ۵ آمده، مشخص کردند. تعیین حوضه آبگیر یك یا چند منبع تأمین‌کننده آب شرب به‌این دلیل حایز اهمیت است کـه سرعت جریان آب می‌تواند دریك منطقه کارستی زیاد باشد (حداکثر ۵۰۰ متر در ساعت) ودرصورت وجود یك منبع آلوده‌کننده درحوضه‌آبریز، می‌تواند سبب آلودگی آب شود. به‌همین دلیل پس ازتعیین حوضه آبگیر زیرزمینی، منطقه را طبق قانون حفاظت محیط زیست ومنابع، حفظ می‌کنند و منابع آلوده‌ساز را ازمیان برمی‌دارند.

همان‌گونه کـه شکل ۵ نشان می‌دهد باتوجه به‌آزمایشهای ردیابی مرز حوضه آبگیر پنج دهـانه چشمه آب شرب ومساحت حوزه آن محاسبه شد (مساحت حوزه ۷۲ کیلومترمربع، $F_N = 72\ Km^2$).

گرچه میزان ماده ردیاب به‌کاررفته درهرمنطقه با نظرمحقق وباتوجه به‌وضعیت کارست آن ، تعیین واعلان می‌شود ، مع‌هذا مقدار آن را اغلب به‌کمك رابطه زیر به‌دست می‌آورند :

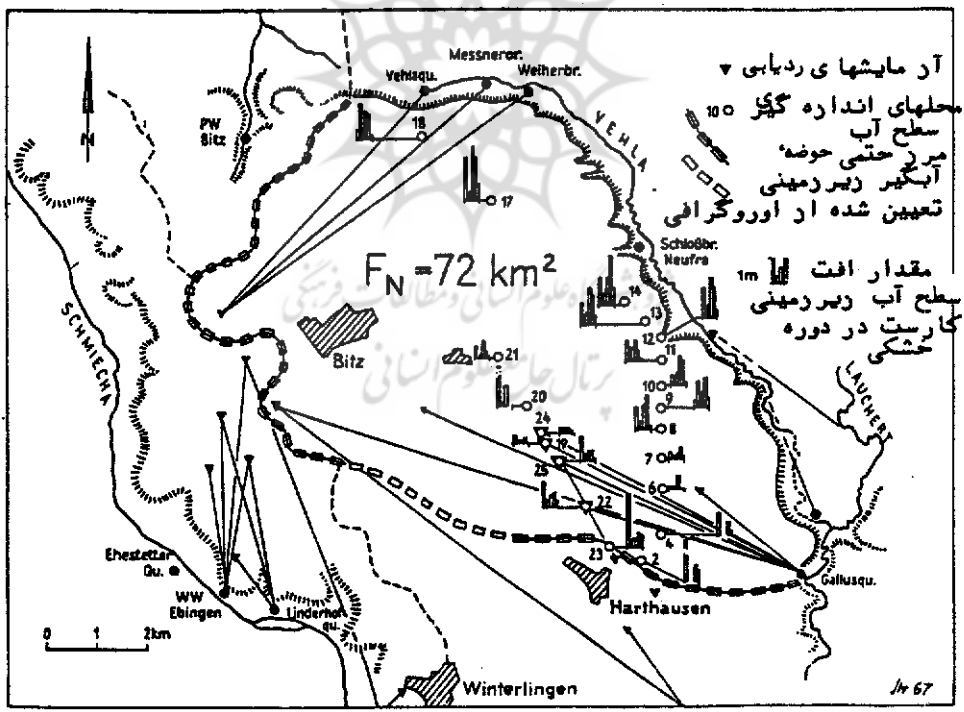
$$A = K.Q.L\ [g]$$

Q = دبی چشمه یا چاه (Cm^3/se)

L = فاصله بین محل تزریق ومحل ظهور (Cm)

K = ضریب (برای اورانین $2,5 . 10^{-9}$ و برای فوکسین 5.10^8).

مثال اگر مقدار $Q = 300000\ cm^3/se$ و $L = 800000\ cm$ باشد مقدار موردنیاز برای اورانین $A = 600\ g$ می‌باشد.



شکل شماره ۵ــ حوضهٔ آبگیر ○ دهانه چشمه آب شرب شهر بیتز (bitz)(اقتباس از اشترای‌له[5]، ۱۹۷۰)

5- Strayle

محاسبه نفوذپذیری سازندهای سخت کربناته* وبرآورد حجم‌مخزن

پس ازمقدمه‌ای کوتاه ومعرفی اجمالی نکات مهم واساسی درمطالعات کارست هیدروژئولوژی، ذیلاً به‌روشهای معمول درتعیین نفوذپـذیری و ضرایب هیدرودینامیکی ، اشاره می‌شود .

تاکنون روش مشخص ومعینی ازآزمایشهای پمپاژ کـه خاص مناطق آهکی باشد وبتوان آنـرا برای تمام مناطق آهکی عمومیت داد ، ازسوی هیچ‌کس ارائه نشده است . دلیل این امر نامشخص‌بودن سیستمهای کارست وناهمسانی شدید محیطهاست . مع‌هذا بعضی ازمحققان برای برآورد حجم مخزن وتعیین پتانسیل آبی سفره‌ها درسازندهای سخت کربناته وگاه غیر کربناته ، روشهایی بکار بسته وپیشنهاد کرده‌اند که ذیلاً معرفی می‌شوند:

۱ ــ روشی که ازسال ۱۹۰۵ تاکنون مورد استفاده قرارمی‌گیرد ، و بارها در متون آمده است ، روش مایه[6] می‌باشد . مایه نشان داد کـه بیشتر هیدروگرافهای درحال نقصان (فروکش) ازیك روندنمایی پیروی‌می‌کنند که بصورت زیر نشان داده‌می‌شود:

$$Q_t = Q_o \cdot e^{-\alpha t}$$

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

دراین رابطه :

Q_t = دبی پس از گذشت زمان t (روز) از ابتدای اندازه‌گیری که چشمه دارای حداکثر دبی (Q_o) درزمان t_o می‌باشد .

Q_o = دبی ماکزیمم در زمان t_o

e = پایه لگاریتم نپرین (۲/۷۱۸)

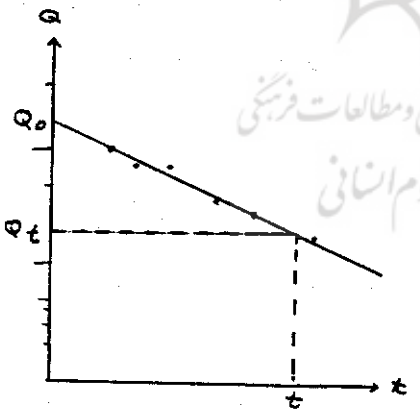
6- Maillet

* لازم به‌تذکر است که بعضی از روشهای ارائه‌شده برای محاسبه نفوذپذیری سازندهای سخت غیرکربناته نیز بکار می‌رود که درمتن توضیح داده شد .

α = ضریب منحنی فروکش کردن دبی

درمابین پارامترهای مزبور ، تعیین مقدار α با دشواری همراه است . دراین مورد راه حلی توسط ریشتر[7] و لیلیش[8] درصفحه بعد ارائه شده است. روی یك برگ کاغذ نیمه‌لگاریتمی ، محور × را به‌زمان (t) و محور y (لگاریتمی) را به‌دبی (Q) اختصاص می‌دهیم . با قراردادن مقادیر دبی چشمه در دستگاه مختصات در رابطه با زمان، تعدادی نقاط بدست می‌آید (شکل زیر ٦) . با گذراندن خط راست ازمیان نقاط مزبور وادامه‌دادن آن تا محور Q ، نقطه‌ای به‌نام Q_o بدست می‌آید . بعلاوه از روی گراف می‌توان مقدار Q_t را درزمان t به‌دست آورد . با قراردادن مقادیر مزبور در رابطه زیر ، α محاسبه می‌شود .

$$\alpha = \frac{\lg Q_o - \lg Q_t}{t \cdot \lg e} = \frac{\lg Q_o - \lg Q_t}{0/4343 \cdot t}$$



شکل ٦ــ دیاگرام Q(t) برای تعیین مقدار α

مقدار آبی که می‌تواند درمدت زمان مشخص ازچشمه خارج شود.(Q_s)

7- Richter

8- Lillich

از رابطه زیر قابل محاسبه است .

$$Q_s = \frac{Q_o}{\alpha}$$

در رابطه مزبور :

Q_s = حجم آبی که می‌تواند درمدت زمان مشخص از چشمه خارج شود.

Q_o = دبی ماکزیمم (دبی در آغاز اندازه گیری)

α = ضریب منحنی فرو کش کردن دبی

چنانچه شکل هندسی لایه آبدار یا به‌عبارت دیگر ابعاد آکیفر معلوم باشد ، می‌توان مقدار درصد فضاهای خالی‌مفید یا ضریب‌ذخیره را ازرابطه زیر محاسبه کرد :

$$V_{ki} = \frac{Q_s \cdot 100}{Ve}$$

در رابطه مزبور :

Vki = ضریب ذخیره(فضاهای خالی مفید درز وشکاف)

Ve = حجم آکیفر (آن بخش از آکیفر که ازآب خالی شده‌است)

Q_s = حجم آبی که می‌تواند درمدت‌زمان مشخص ازچشمه خارج شود.

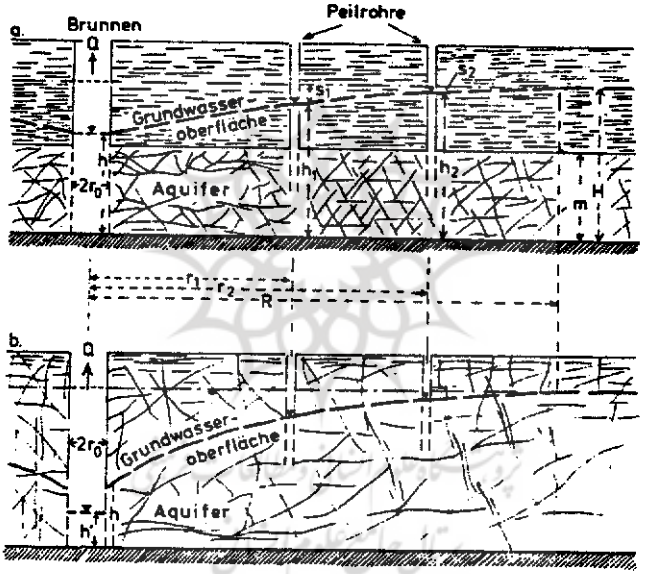
۲ ــ درصورتی که آکیفر تحت مطالعه عمدتاً دارای درز وشکاف باشد وپراکندگی این درز وشکاف‌ها طوری باشد که بتوان آنرا معادل آکیفر رسوبات سخت‌نشده یا آبرفتی درنظر گرفت ، درآنصورت درمـورد آنها بکاربردن روشهای معمول پمپاژ درسفره‌های آبرفتی جـایز است . دیگر این‌که اگر در سازند سخت غیر کربناته وضعیت درز وشکاف مانند آنچه‌که گفته شد باشد ، بازهم می‌توان از روشهای معمول استفاده کرد .

روشهای پمپاژی که در رسوبات آبرفتی‌انجام می‌شود ووسایلی که در این مورد نیاز هستند ، برای هیدرولوژیستها و هیدروژئولوژیستها و کارشناسان وزارت نیرو(واحد آب)،شناخته شده‌است‌ونیازی به‌توضیح ندارد،

مع‌هذا جهت یادآوری به‌جنبه تئوریك آن به‌اختصار اشاره خواهد شد :

ـ آزمایش پمپاژ درشرایط ماندگار

اولین کوششهایی که درمورد عملکرد پمپاژ از دیدگاه ریاضی بعمل آمده، برمی‌گردد به‌دوپوئی[9] . شرط آن رسیدن به‌یك حـالت تقریباً تعادل سطح آب در درون چاههای مشاهده‌ای با برداشت‌ثابت درچاه‌پمپاژمی‌باشد. (شکل شماره ۷) .



شکل ۷ـ انجام آزمایشهای پمپاژ در سازند سخت درز وشکافدار تقریباً «ایزوتروپ»

b در سفره آزاد، a در سفره تحت فشار

طبق نظر دوپوئی ، در سفره‌های آزاد رابطه زیر برقرار است:

$$Q = \pi \cdot k_f \frac{H^2 - h^2}{\ln \frac{R}{r}} \; ; \; k_f = \frac{Q \cdot \ln \frac{R}{r}}{\pi \cdot (H^2 - h^2)}$$

وبرای‌سفره‌های تحت فشار معادله زیر صادق است .

9- Dupuit

$$Q = 2.m.\pi.k_f \frac{H-h}{\ln \frac{R}{r}} \; ; \; k_f = \frac{Q \cdot \ln \frac{R}{r}}{2m.\pi.(H-h)}$$

از آنجا که بدست‌آوردن R با مشکلاتی همراه است ، لذا بجای یك چاه مشاهده‌ای ، دوحلقه درنزدیك چاه پمپاژ حفر می کنند ودرنتیجه رابطه دوپوئی بصورت ساده‌تری درمی‌آید .

$$Q = \pi . k_f \frac{h_2^2 - h_1^2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \; ; \; kf = \frac{Q \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}{(h_2^2 - h_1^2)}$$

برای سفره‌های تحت فشار رابطه مزبور بصورت زیر است :

$$Q.2.m.\pi.kf \frac{h_2 - h_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \; ; \; kf = \frac{Q.\ln \frac{r_2}{r_1}}{zm.\pi(h_2 - h_1)}$$

اگر همان‌گونه کـه تیم[10] و ویدرهلد[11] انـجـام داده‌انـد ، بجای $h_1 + h_2 \approx 2m$ قرار دهیم ، در آنصورت $h_2^2 - h_1^2 \approx 2m \cdot (h_2 - h_1) \approx \Delta_s$ خواهد شد ودرنتیجه خواهیم داشت:

$$Q = \frac{\pi.kf}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot 2m \cdot \Delta_s$$

با قراردادن $S_1 - S$ بجای Δ_s و r_1 و r به‌جای فواصل مربوط ، خواهیم داشت .

$$S = [s_1 - \frac{Q}{2\pi.k_f.m} \ln r_1] + \frac{Q}{2\pi.k_f.m} \ln r$$

اگر به‌جای لگاریتم نپرین ، لگاریتم معمولی (درپـایه ده) را بکار بریم $(\ln a = 2,30261 \text{ga})$ حاصل $\frac{2,3026}{2\pi}$ می‌شود ۰/۳۶۶۵ وبـا قراردادن آن درفرمول زیر ، حاصل می‌شود :

$$s = [s_1 - 0,3665 \frac{Q}{kf.m} \lg r_1] + 0,3665 . \frac{Q}{kf.m} \lg r$$

10- Thiem 11- Wiederhold

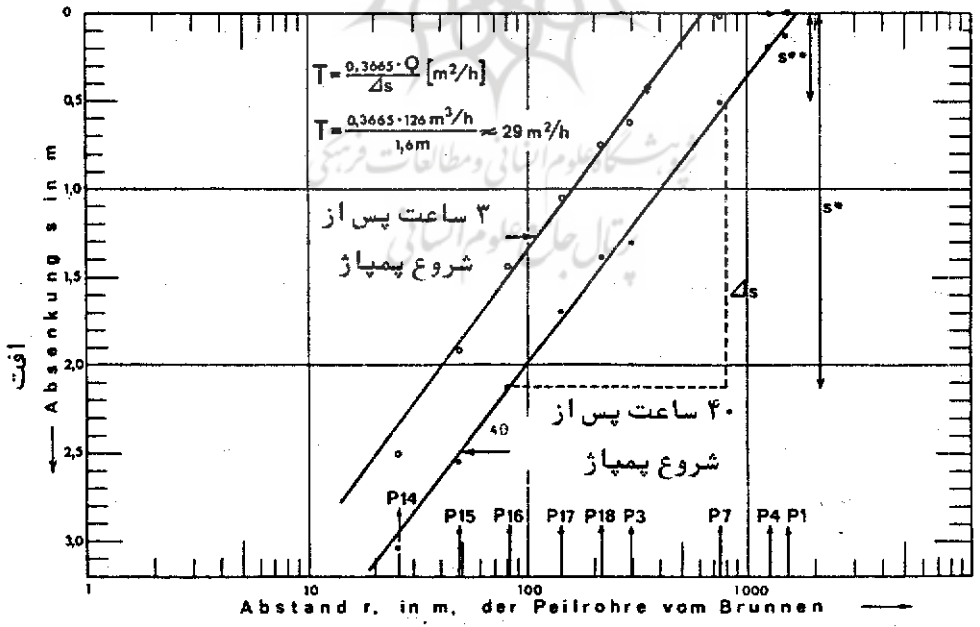
ازاین‌رابطه برای‌محاسبه قابلیت انتقال T وضریب قابلیت نفوذ (kf) استفاده می‌کنند . به‌این‌صورت کـه روی یك برگ کـاغذ نیمه‌لگاریتمی (محور × لگاریتمی) مقدار افت هرچاه مشاهده‌ای را با فاصله r آن معین می‌کنند . ازاین نقاط سرانجام خطی بصورت شکل شماره ۸ عبورمی‌دهند. شیب این خط $0,3665 \frac{Q}{kf.m}$ است. برای تعیین شیب مزبور از دو نقطه روی خط که درفاصله یك سیکل لگاریتمی r* و r** واقعند ، استفاده می‌شود ودراین فاصله افت سطح آب S* و S** (S** < S*) را می‌خوانند،درنتیجه:

$$S^* - S^{**} = 0,3665 \frac{Q}{kf.m}$$

ویـا

$$T = k_f.m = \frac{0,3665 \cdot Q}{S^* - S^*} = \frac{0,3665 \cdot Q}{\Delta S}$$

$$T = \frac{0,3665 \cdot Q}{\Delta S} \qquad kf = \frac{T}{m}$$



فاصله ۳ به متر از چا هـای مشا هده ای

شکل۸ـ دیاگرام S(r) یك آزمایش پمپاژ $P_1 \ldots P_{18}$ چاههای مشاهده‌ای

مثال ، باتوجه بشکل (شماره ۸) داریم :

$Q = 126\ m^3/h$

m = ضخامت آکیفر $17m$

$S^* - S^{**} = 1{,}6\ m$

$r^* = 80\ m$

$r^{**} = 800\ m$

درنتیجه $T \simeq 29\ m^2/h$ و $kf \simeq 5.10^{-4}\ m/se$

ـ آزمایش پمپاژ درشرایط غیرماندگار

درحین پمپاژ با برداشت ثابت ، اگر شرایط ماندگـار بوجود نیامد ، می‌توان از روابط تایس[۱۲] استفاده کرد .

$$S(r,t) = \frac{Q}{4\pi.kf.m} W\left(\frac{r^2.s}{4kf.m.t}\right)$$

اگر $\frac{r^2.S}{4kf.m.t}$ را مساوی u قرار دهیم، خواهیم داشت:

$$S(r,t) = \frac{Q}{4\pi.kf.m} W(u) \qquad \left(\frac{r^2.s}{4kf.m.t} = u\right)$$

مقدار تابع $W(u)$ ازمنحنی تیپ تایس بدست می‌آید .

ژاکوب[۱۳] رابطه تایس را ساده کرد ودرآن ازلگاریتم معمولی استفاده کرد .

$$S = \frac{2{,}30\ .\ Q}{4\pi\ .\ T} \lg \frac{2{,}25.T.t}{r^2.S}$$

با حل معادله مزبور T و S را می‌توان محاسبه کرد .

12- C. V. Theis 13- C. E. Jacob

$$T = \frac{0,3665.Q}{2\pi.\Delta_s}$$

$$S = 2,25.T\left(\frac{t_o}{r_2}\right)$$

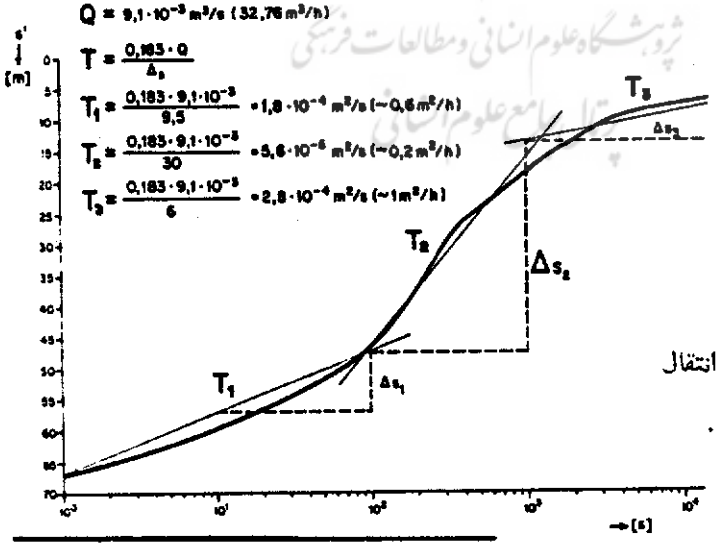
در رابطه فوق

S = ضریب ذخیره

Δ_s = افت در دو نقطه ازیك سیكل لگاریتمی

T = قابلیت انتقال

۳ ـ هولتینگ[۱۴] (۱۹۷۹) درکتاب خود برای برآورد میزان قابلیت انتقال سفره درسازندهای سخت، ازمنحنی برگشت استفاده می‌کند. شکل ۹ که منحنی برگشت یك حلقه چاه‌را نشان می‌دهد، به‌بخشهای مختلف تقسیم وبرای هربخش قابلیت انتقال محاسبه شده است . منحنی مزبور با اندازه‌گیری برگشت سطح آب درچاه، بصورت تابعی از زمان روی یك برگ کاغذ نیمه‌لگاریتمی رسم شده است . بعلاوه از روی منحنی می‌توان باتوجه به‌تفاوتهایی که در روند صعودی منحنی دیده می‌شود ، به‌وضعیت نفوذ



شکل ۹ــ محاسبه قابلیت انتقال براساس منحنی برگشت .

14- Hoelting

پذیری لایه‌ها پی برد، زیرا شیب زیـاد دال برنفوذپذیری کم وشیب ملایم مؤید نفوذپذیری خوب لایه‌هاست .

پس از محاسبه قابلیت انتقال T می‌توان با استفاده از رابطه $k_f = \frac{T}{m}$ میزان قابلیت نفوذ هرلایه (درصورتی‌که بتوان ضخامت آنرا تعیین کرد) را محاسبه کرد .

٤ ـ آزمایش پمپاژ با آب ردیابی‌شده

دریك منطقه آهك و دولومیتی (کرتاسه) درکشور اسرائیل چـاهی بمنظور استحصال آب شرب حفر شد ومورد آزمایش قرار گرفت . مقدار نفوذپذیری مؤثر دراین سازندها توسط هالوی و نی‌یر[15] با استفاده ازروش مزبور تعیین شده است .

دراین آزمایش از دو حلقه چاه که در فاصله r ازیکدیگر قراردارند استفاده می‌شود ، یکی بعنوان چاه تزریق ودیگری بعنوان چاه پمپاژ . اگر Vp حجم آبی که تا رسیدن ماده ردیاب به‌چاه پمپاژ ، بهره‌برداری می‌شود و b ضخامت آکیفر را در رابطه زیر قرار دهیم، نفوذپذیری مؤثر بدست می‌آید .

$$S = \frac{V_p}{r^2 . \pi . b}$$

S = نفوذپذیری مؤثر

V_p = حجم آب خارج‌شده

b = ضخامت آکیفر

r = فاصله بین دوچاه

15- Halevy and Nir

۵ ـ آزمایش با لوله‌های نوك‌باز (Open - End - Test)

اغلب برای تعیین ضریب نفوذپذیری (k_f) ازاین روش و روش پاکر (Packer) استفاده‌می‌کنند. انجام این روش ومقایسه آنها با روشهای‌دیگر مفید است ، بویژه درشرایطی که درز وشکافها ، عمدگی دارند.

در روش مزبور که در چاههای بدون لوله جدار انجام می‌شود ، چاه باید تا عمق سفره حفاری شده باشد. ازسوی دیگر باید شعاع r دهانه چاه بمراتب کوچکتر از ارتفاع ستون آب در چاه باشد . با ریختن مقدارمعینی Q (m^3/se) آب درچاه، ستون آب به‌اندازه h بالا می‌آید و بـا استفاده از رابطه زیر می‌توان مقدار نفوذپذیری مؤثر سنگ را محاسبه کرد :

$$k_f = \frac{Q}{5,5.r.h} \quad [m/se]$$

مثال :

اگر Q برابر ۵ لیتر درثانیه یـا ۰/۰۰۵ متر مکعب در ثـانیه و r مساوی ۳۰۰ میلیمتر و h برابر ۲ متر باشد، مقدار k_f برابر خواهد بود با

$$k_f = \frac{0,005}{5,5.0,3.2} = 1,5.10^{-3} \quad m/se$$

۶ ـ آزمایش پاکر (Packer tests)

این روش را درچاهی بکار می‌برند که تـا زیر سطح ایستابی لوله‌گذاری شده باشد. در داخل لوله جدار، لوله‌ای با قطر کمتر قرار می‌دهند وبین دو لوله را محکم می‌کنند (شکل شماره ۱۰) . در داخل لوله باریك مقدار معینی آب Q (m^3/se) می‌ریزند . درنتیجه سطح آب بالا می‌آید واز رابطه صفحه بعد مقدار k_f را محاسبه می‌کنند :

$$k_f = 0,3665 \cdot \frac{Q}{L.h} \lg \frac{L}{r} \quad [m/se]$$

در رابطه فوق :

L = قسمتی ازچاه که بدون لوله است (متر)

h = ارتفاع سطح آب پس ازریختن آب در لوله (متر)

r = شعاع لوله داخلی (میلی‌متر)

رابطه فوق هنگامی صادق است که $L \geq 10\ m$ متر باشد

مثال :

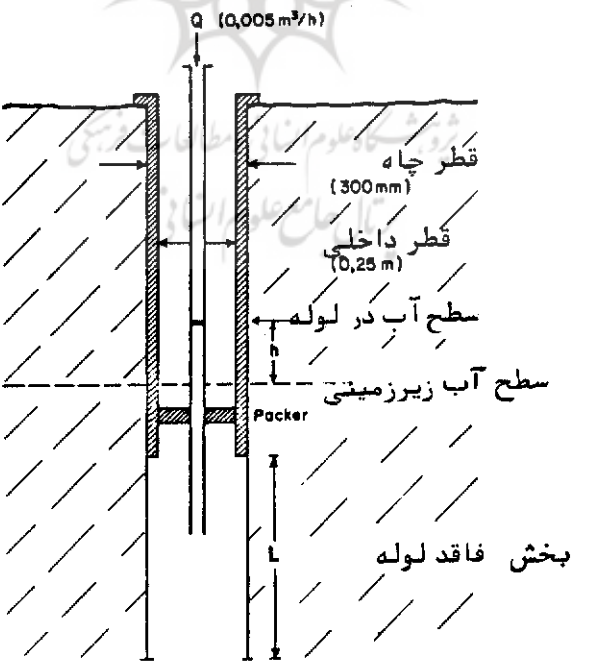
Q = ۰/۰۰۵ متر مکعب در ثانیه

L = ۸ متر

h = ۲ متر

r = ۰/۲۵ متر

$$k_f = 0,3665 \frac{0,005}{8.2} \cdot 1g \frac{8}{0,25} = 1,7.10^{-4}\ m/se$$



شکل ۱۰ــ تعیین قابلیت نفوذ (Kf) با آزمایش پاکر.

۷ـ در پمپاژهایی که درشرایط غیرماندگار در سازنـد سخت صورت می‌گیرد، می‌توان مقداری آب درمدتی کوتاه ازچاه پمپاژکرد وسپس فوراً بالاآمدن سطح آب درچاه را اندازه گرفت (برگشت). ویا این که مقداری آب وارد چاه کرد وپایین‌رفتن سطح آب را اندازه گرفت وبـا استفاده از رابطه زیر مقدار (k_f) را محاسبه کرد:

$$k_f = \frac{r^2}{2.L\ (t_2 - t_1)} .5,3\ \lg\ (\frac{L}{r})\ .\mathrm{Lg}\ (\frac{h_1}{h_2})$$

رابطه فوق‌الذکر وقتی صادق است که $\frac{L}{r} > 8$ باشد.

در رابطه فوق:

L = ضخامت سفره (فیلتر)

r = شعاع چاه

h_1 = افت سطح آب تا زیر سطح ایستابی در زمان t_1

h_2 = افت سطح آب درزمان t_2

مثال:

L = ۸ متر

r = ۰/۳ متر

$t_2 - t_1$ = ۱۸۰ ثانیه (۳ دقیقه)

h_1 = ۹ متر

h_2 = ۶/۵ متر

$$k_f = \frac{(0,3)^2}{2.8.180} . 5,3\ \lg \frac{8}{0,3} . \lg \frac{9}{6,5} = 3,3.10^{-5}\ \mathrm{m/se}$$

ماروتس[16] درسال ۱۹۶۸ طی آزمایشهایی که درخصوص تعیین رابطه

16- Marotz

بین ضریب قابلیت نفوذ (k_f) وتخلخل مفید انجام داد، به‌رابطه زیر دست یافت:

$$P = 0,462 + 0,045 \ln kf$$

P = تخلخل مفید

k_f = ضریب قابلیت نفوذ (متر درثانیه)

مثال: $9,0.10^{-5}$ m/se = kf $(\ln 9,0.10^{-5} = 9,316)$

$P = 0,462 + 0,045.(-9,316) = 0,043$ (4,3 درصد)

باتوجه به‌این‌که درسفره‌های (آکیفر) آزاد مقدارتخلخل مفید معادل ضریب ذخیره است، لذا باتوجه به‌رابطه ماروتس ومیزان قابلیت نفوذ که از آزمایشهای پمپاژ حاصل می‌شود، می‌توان میزان تخلخل مفید یا ضریب ذخیره را تعیین کرد،مشروط برآن‌که فضاهای خالی مفید در سازند سخت عمدتاً از درز وشکاف تشکیل شده باشد وازنظر تراکم وپراکندگی معادل فضاهای خالی مفید یا تخلخل درسفره‌های آبرفتی بوده باشد.

میلانوویچ[17] درکتاب کارست هیدروژئولوژی صفحه ۳۳۶ تحت‌عنوان تعیین حجم آکیفر کارست می‌نویسد: «حجم آب داخل آکیفر در نقاط مختلف آن و در زمانهای مختلف بطور مرتب درتغییر است. در جزء زمانی dt تغییرات حجم برابر dv است که بستگی به‌رابطه بین آب ورودی به‌آکیفر و آب خروجی ازآن دارد. به‌عبارت دیگر:

$$(Q_d - Q_i)\ dt = dv$$

دراین فرمول

Qd = جریان ورودی به‌داخل آکیفر (آب تغذیه‌شده)

Qi = جریان خروجی از آکیفر (آب تخلیه‌شده)

در دوره‌های خشکی که جریان ورودی به‌آکیفر وجود ندارد، یعنی

17- Milanovic

درشرایط فروکش جریان، خواهیم داشت :

$$Q_i \, dt = -dv \qquad (1)$$

اگر جریان خروجی از آکیفر را برای دوره زمانی t حساب کنیم $Q_i = Qt$ خواهد بود . با واردکردن معادله مایه، معادله 1 بصورت زیر درمی‌آید :

$$Q_o e^{-\alpha (t-t_o)} . dt = -dv \qquad (2)$$

با انتگرال‌گیری از معادله 2 معادله زیر حاصل می‌شود:

$$\int_{vt}^{o} dv = \int_{t}^{\infty} Q_o^{e^{-\alpha (t = t_o)}} dt = 0 - vt = \frac{1}{\alpha} Q_o \left[e^{-\alpha(t-t_o)} \right]_t^{\infty}$$

خروجی طولانی مدت آب ازآکیفر درمرحله فروکش باعث تخلیه کامل آن می‌شود ، به‌عبارت دیگر به‌ازای $t = \infty$ مقدار $V = o$ است . بنابراین انتگرال فوق بصورت زیر درمی‌آید :

$$- V_t = \frac{1}{\alpha} Q_o \left[o - e^{-(t - t_o)} \right]$$

یا

$$V_t = \frac{Q}{\alpha} e^{-(t - t_o)} \qquad (5)$$

چون $Qt = Q_o , e^{-\alpha(t - t_o)}$ است ، لذا حجم آکیفر کارست در زمان t برابر است با

$$V_t = \frac{Q_t}{\alpha}$$

ازاین معادله چنین نتیجه گرفته می‌شود که ضریب دبی (α) برابر است با

$$\alpha = \frac{Q_t}{V_t}$$

به‌عبارت دیگر مقدار آن با حجم دینامیك آکیفر (حجمی که دربالای‌سطح

آب چشمه قرار گرفته است) نسبت عکس دارد .

حجم آکیفر درزمانی که جریان خروجی با دبی Q_o شروع می‌شود (t_o) برابر است با:

$$V = \frac{86400\ Q_o}{\alpha}$$

که ۸۶۴۰۰ تعداد ثانیه‌های یك روز است . درشرایط پیچیده که مقادیر α متفاوت است، خواهیم داشت :

$$Vo = Vo + Vo_2 + Vo_3 + \ldots + Von$$

$$Vo = 86400\left[\frac{Q_{on}}{\alpha_1} + \frac{Q_{o2}}{\alpha_2} + \frac{Q_{o3}}{\alpha_3} + \ldots + \frac{Q_{on}}{\alpha_n}\right]$$

برحسب مترمکعب هریك از اجزای این معادله نشان‌دهنده حجم ذخیره آب به‌ازای یك‌نوع مشخصی از تخلخل است .

ـ قابلیت انتقال وتخلخل مؤثر

دو خاصیت بسیار مهم آکیفرها ازنظر هیدرولوژی عبارتند ازقابلیت انتقال (T) وتخلخل مؤثر (S) . دربحث مربوط به‌آکیفرهای کارست گفته شد که خصوصیات هیدرولوژیکی آکیفر را نباید فقط با یکی از دو خاصیت فوق بیان کرد. متمرکزشدن جریان خروجی آکیفر ازیك نقطه این امکان را فراهم می‌سازد که قابلیت‌انتقال وتخلخل مؤثر را بطور توأم برای کل آکیفر بتوان تحلیل کرد. برای این منظور لازم است حداقل یك پیزومتر را در آکیفر حفر (نصب) کرد تا بتوان نوسانات سطح آب را اندازه‌گیری کرد . البته درشرایط کارستی تجربه نشان داده است که حفر فقط یك چاه باعث ایجاد اشتباه درمحاسبات می‌شود . بنابراین باید چند پیزومتر را درآکیفر حفر کرد ویکی ازآنها راکه بهترین نمایندهٔ تغییرات سطح آب در آکیفر است ، انتخاب نمود. گاهی اوقات میانگین تمام

پیزومترها به‌عنوان نوسانات سطح آب آکیفر انتخاب می‌شود . بـرای این منظور لازم است سطح حوضه به‌دقت اندازه گیری شود .

تغییرات سطح آب آکیفر درطی دوره تخلیه درزمان $t = t_o$ ازفرمول زیر محاسبه می‌شود :

$$\Delta h_o = \frac{V_o}{A} = \frac{86,4\ Q_o}{\alpha A}$$

دراین رابطه:

Δh_o = ارتفاع معادل آبی که درطی تخلیه کامل از آکیفر خارج‌می‌شود (میلیمتر) .

V_o = کـه برابر $\frac{Q_o}{\alpha}$ 86400 است ، برابر است بـا حجم دینامیك آب موجود در آکیفر (متر مکعب) .

۸٦٤۰۰ = تعداد ثانیه‌های یك‌روز (se)

Q_o = دبی خروجی د رزمان t_o (متر مکعب در ثانیه)

α = ضریب منحنی فروکش کردن دبی

A = سطح حوضه آبگیر آکیفر . دراینجا فرض شده است کـه سطح حوضه آبگیر وسطح آکیفر برابر باشند (کیلومترمربع) .

۸٦/٤ = مقدارساده‌شده ۸٦٤۰۰ باتوجه به‌واحدهای h_o (میلیمتر).

Q_o = (مترمکعب درثانیه) و A (کیلومترمربع) .

به‌ازاء $t \neq t_o$

$$\Delta h_t = \frac{V_t}{A} = \frac{86,4\ Q_t}{\alpha A}$$

اختلاف ($\Delta h_o - \Delta h_t$)بین‌مقدار(h_o)یاارتفاع معادل آب داخل آکیفر درشروع و (h_t) یا سطح آب آکیفر درخاتمه عمل تخلیه را ، که نشانگر تغییرات سطح آب موجود در آکیفر است با ΔR نشان می‌دهیم .

$$\Delta R = \Delta h_o - \Delta h_t \quad (mm) \qquad (11)$$

$$\Delta R = \frac{86,4\ (Q_o - Q_t)}{\alpha A}$$

که Q_t = دبی چشمه درانتهای دوره تخلیه (مترمکعب درثانیه)

t = تعداد روز هائیکه تخلیه صورت می‌پذیرد .

دبی یك چشمه کارستی را می‌توان مشابه آزمایش پمپاژ با دبی متغیّر دانست که درآن ΔH کاهش غیرماندگار جریـان آب درطی دوره تخلیه است .

بهترین معادله‌ای‌که ازنظر ریاضی می‌توان این نوع جریان را با آن نشان داد عبارت است از:

$$y = a\ (\lg b + \lg t)$$

که تایس[۱۸] درسال ۱۹۳۵ آن را توصیف کرده است . هرچند این معادلـه مربوط به‌جریان غیرماندگار وشعاعی آب دریك محیط متخلخل با وسعت نامحدود وقابلیت انتقال ثابت است ، ولی افراد زیادی این فرمول را برای آکیفرهای کارست نیز بکار برده‌اند که بصورت زیر خواهد بود :

$$\Delta H = \frac{0,183\ Q}{T}\ (\log \frac{2,25\ T}{x^2 S} + \lg t)$$

در رابطه مزبور :

ΔH = افت سطح آب آکیفر (متر) درچـاه گمانه یا آزمـایشی نسبت به‌زمانهای مختلف t

Q = دبی چشمه (متر مکعب در ثانیه)

x = فاصله بین مظهر چشمه تا چاه گمانه (متر)

18- Theis

t = زمان درموقع اندازه گیری دبی

T = قابلیت انتقال آکیفر کارست (متر مربع درثانیه)

S = تخلخل مفید (درصد)

اگر در یك دستگاه محور مختصات نیمه‌لگاریتمی ، روی محور افقی مقادیر t و روی محور عمودی ΔH را بیاوریم ، معادله فوق بصورت یك خط درمی‌آید .

ضریب ثابت

$$\frac{0,183\ Q}{T} = \frac{\partial(\Delta H)}{\partial(\lg t)} \qquad \text{و} \qquad a = 0,183\ \frac{Q}{T}$$

را برای تابع خطی ΔH نسبت به‌زمان t درسیستم مختصات نیمه‌لگاریتمی ضریب مربوط به‌جهت گویند .

ـ قابلیت انتقال (T) :

قابلیت انتقال از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$T = \frac{0,183\ Q_a}{C} \quad m^2/se$$

که Q_α = میانگین دبی برای آن قسمت از منحنی فروکش (نقصان هیدروگراف) که با ضریب دبی α (متر مکعب درثانیه) مشخص می‌شود.

C = برابر است با ΔH منها ی دوره‌ای که برای‌آن $\lg t = 1$(m) می‌باشد.

$$C = \frac{\Delta R}{\lg t_2 - \lg t_1} = \frac{\Delta R_2 - \Delta R_1}{\lg t_2 - \lg t_1} \quad (m)$$

که ΔR = تغییرات ذخیره دینامیك آکیفر کارست که برحسب میلی‌متر بار پیزومتری توصیف می‌شود .

t = دوره زمانی که در آن تغییرات ΔR صورت می گیرد .

ـ تخلخل مفید (S) :

تخلخل مفید* عبارت است از $S = \frac{2,25\ Tt_o}{x^2}(\%)$

که t_o = زمان، درهنگامی که $\Delta H = o$ است یا حجم آب آکیفر در شرایطی که $\Delta H = o$ و یا $\Delta R = o$ باشد.

تخلخل مفید را از رابطه زیر می‌توان محاسبه کرد.

$$S = \frac{\Delta R}{DH} \cdot 100 \quad (\text{درصد})$$

یعنی نسبت تغییرات ذخیره آکیفر (ΔR) در دوره‌ای که آب آکیفر کاهش می‌یابد به‌تغییرات ΔH. باید درنظر داشت که برای آبراهه‌های کارستی اندازه‌گیری تغییرات سطح آب آکیفر بسیار مشکل است. لذا در آکیفرهای کارست نوع دینامیك مقادیر تقریبی حداکثر وحداقل سطح‌آب را درمحاسبات بکار می‌برند. درهرحال هم حداکثر وهم حداقل سطح آب باید ازآمار موجود تخمین زده شود.

از فرمول زیر نیز می‌توان مقدار درصد تخلخل مفید را محاسبه کرد:

$$S = \frac{V_w}{V_r} \cdot 100$$

که V_w = حجم آبی که از آکیفر خارج می‌شود.

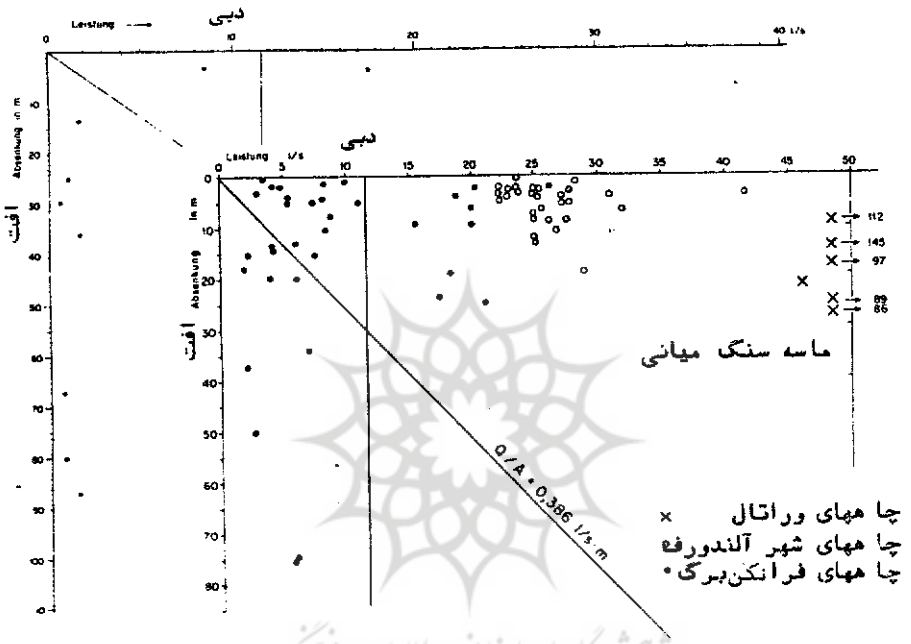
V_r = حجم سنگ که آب ازآن خارج می‌شود (حجم آکیفر).

۹ ــ ازجمله امکان دیگری کـه درمورد کسب اطلاع ازوضعیت چاه در سازند سخت وجود دارد، تعیین رابطه بین قدرت آبدهی وافت سطح‌آب درچاه است. معمولاً پس ازهر آزمایش پمپاژ می‌توان این رابطه را بدست آورد. با اینکار می‌توان چاههای حفرشده درسازند سخت را ازنظرآبدهی با یکدیگر مقایسه کرد وچاههایی را که مناسب تشخیص داده شدند مورد

* ــ منظور تخلخل درزی یا درز وشکاف مفید درسازند سخت می‌باشد ــ م.

بهره‌برداری قـرار داد . شکل شماره ۱۱ نمونه‌ای ازآن را نشان می‌دهد . به‌منظور دستیابی به‌مقادیر عددی رابطه زیر را بکار می‌برند :

$$L_q = \frac{QB_r}{A}$$



شکل ۱۱ــ رابطه دبی ویژه ــ افت درچاههای حفر شده درکوههای شیستی راین، سمت چپ بالا مربوط بسازندهای سخت شیستی و راست پائین ماسه سنگهـای میانی (اقتباس از هولتینگ، ۱۹۷۹) .

در رابطه مزبور :

1_q = دبی ویژه(قدرت آبدهی چاه)

Q_{B_r}= دبی‌متوسط چاه(لیتر در ثانیه)

A = افت سطح آب درچاه (متر)

مقدار دبی ویژه تنها در چاههای حفرشده درسفره‌های تحت فشار ، ثـابت است ، چون فقط دراین مورد منحنی افت خطی است. درآکیفرهای

آزاد، بسته به‌مقدار برداشت وافت ، می‌تواند مقادیر مختلفی داشته باشد. از آنجا که آزمایشهای پمپاژ اغلب تا افت نهایی پیش می‌رود ، درنتیجه دبی ویژه چاهها درسنگهای مختلف بـا یکدیگر تفاوت دارند . بـاتوجه به‌این تفاوتها وباتوجه به‌ملاحظات عمومی منطقه، می‌توان زمینه‌ای برای مقایسه بدست آورد (هولتینگ و تیوز[19]، ۱۹۷۶) .

استفاده دیگری که ازمنحنی دبی ویژه ـ افت می‌شود این است کـه می‌توان براساس آن درمورد اقتصادی‌بودن ویا نبودن‌چاه اظهارنظر نمود. اگر برای مثال یك حلقه چـاه بهره‌برداری، دارای ۱۰۰۰ متر مکعب در روز یا ۱۱/۵۷ لیتر درثانیه دبی وحداکثر ۳۰ متر افت باشد، دبـی ویژه آن برابـر $1_q = \frac{11,57}{30} = 0,386\ R/x$ خواهد بود . حال چاههایی که دبـی ویژه آنها کمتر ازاین مقدار باشد ، ازنظر بهره‌برداری اقتصادی نیستند و تنها چاههایی کـه دبی ویژه آنها ازاین مقدار بیشتر است، مقرون به‌صرفه هستند (مراجعه شود به شکل شماره ۱۱).

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

منابع

Boegli. A. (1965): The role of corrosion by Mixedwater in cave forming.

Halevy. E, Nir. A. (1958): Use of radioisotops in studies of groundwater flow, Geneve.

Hoelting. B. (1979): Ein. in d. ally. U. angewandte Hydrogeologie (stuttgart).

Jacob. C. E. (1950): Flow of groundwater in engineering hydraulic. Wiley.

Maillet. E. (1905): Mecanique et physique duglobe, Paris.

Marotz. G. (1968): Technische Grundlagen einer Wasserspeicherung im naturlichen

19- Hoelting and Thews

untergrund - Hamburg.

Milanovic, P. T. (1981): Karsthydrogeology. Translated by J. J. Buhac, P. E. Water Resources publications P. O. Box 2841. littleton, Colorado 80161, U. S. A.

Prandt. L. (1969): Fuhrer durch die stromungslehre, vieweg.

Richter. W und W. Lillich, (1975): Abriss der Hydrogeologie, stuttgart.

Simeoni. G. P. (1973): Etude de la region alimentaire de la nappede la plaine du Bodeli, Neuchatel.

Strayle. G. (1970): Karsthydrologische untersuchungen auf der Ebiger Alb.

Theis. C. V. (1935): The relation between the lowering of the Pizometric surface and the rate and duration of a well using groundwater storage. Trans. Amer. geophys. Union 16.

Thiem. G. (1906): Hydrogeologische Methoden, Leipzig.

Weidenbach. F. (1954): Uber unige Wasserbohrungen im Jura, stuttgart.

Wiederhold. W. (1965): Theorie und Praxis des hydrologischen pumoversuches, Munchen.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی