وزارت نیرو

۱۷۹-الف

استاندارد

دستورالعمل آزمایشهای پمپاژ

شماره استاندارد مهندسی آب کشور ۱۳۸۰ - ۱۷۹ - الف
مهر ماه ۱۳۸۰

پیشگفتار

امروزه نقش و اهمیت ضوابط، معیارها و استانداردها و آثار اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی ناشی از بکارگیری مناسب و مستمر آنها در پیشرفت جوامع، تهیه و کاربرد آنها را ضروری و اجتناب ناپذیر کرده است. نظر به گستردگی دامنه علوم و فنون در جهان امروز، تهیه ضوابط، معیارها و استانداردها در هر زمینه به مجامع فنی تخصصی واگذار شده است.

با درنظر گرفتن موارد بالا و باتوجه به شرایط اقلیمی و محدودیت منابع آب در ایران، تهیه استاندارد در بخش آب از اهمیت ویژه ای برخوردار است و از اینرو، طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب وزارت نیرو با همکاری سازمان مدیریت و برنامه ریزی اقدام به تهیه استانداردهای مهندسی آب کرده است.

استانداردهای مهندسی آب با درنظر داشتن موارد زیر تهیه و تدوین شده است:

- استفاده از تخصصها و تجربه های کارشناسان و صاحبنظران شاغل در بخش عمومی و خصوصی
- استفاده از منابع و مآخذ معتبر و استانداردهای بین المللی
- بهره گیری از تجارب دستگاههای اجرایی، سازمانها، نهادها، واحدهای صنعتی، واحدهای مطالعه ، طراحی و ساخت
- ایجاد هماهنگی در مراحل تهیه، اجرا، بهره برداری و ارزشیابی طرحها
- پرهیز از دوباره کاریها و اتلاف منابع مالی و غیرمالی کشور
- توجه به اصول و موازین مورد عمل مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و سایر مؤسسات معتبر تهیه کننده استاندارد

امید است ، مجریان و دست اندرکاران بخش آب با به کارگیری استانداردهای یاد شده، برای پیشرفت و خودکفایی این بخش از فعالیتهای کشور تلاش نموده و صاحبنظران و متخصصان نیز با اظهارنظرهای سازنده، در تکامل این استانداردها همکاری کنند.

ترکیب اعضای کمیته

اعضای کمیته فنی شماره ۱۲ - گروه هیدرولیک (شاخه آزمایشهای پمپاژ) که در تهیه و تنظیم این پیش‌نویس استاندارد مشارکت داشته‌اند به شرح زیر است :

آقای محمدحسین رشیدی	کارشناس آزاد	فوق‌لیسانس مهندسی زمین‌شناسی
آقای حسین رئوفی	شرکت مهاب قدس	لیسانس زمین‌شناسی
آقای محمود صداقت	عضو هیئت علمی دانشگاه پیام نور	فوق‌لیسانس مهندسی آب‌شناسی
خانم کیاندخت کباری	طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور	لیسانس راه و ساختمان

فهرست مطالب

عنوان		صفحه
مقدمه		۱
۱-	**تعاریف**	۳
۱-۱	آبخوان، لایه نیمه‌تراوا، لایه کم تراوا، لایه ناتراوا	۳
۱-۲	انواع آبخوانها	۳
۱-۳	ضرایب هیدرودینامیک آبخوان	۴
۱-۴	سطح استاتیک	۷
۱-۵	افت	۷
۱-۶	مخروط افت	۷
۱-۷	منطقه تاثیر و شعاع تاثیر	۸
۱-۸	سطح دینامیک	۸
۱-۹	جریان ماندگار یا دائم	۸
۱-۱۰	جریان غیرماندگار یا موقت	۹
۲-	**نکات ضروری برای انجام آزمایش**	۹
۲-۱	جمع‌آوری اطلاعات اولیه برای مقایسه با نتایج آزمایش پمپاژ	۹
۲-۲	انتخاب محل مناسب	۱۰
۲-۳	محل تخلیه آب پمپاژ شده	۱۲
۲-۴	توسعه و شستشوی چاه بوسیله پمپ توربینی	۱۳
۲-۵	ساختمان چاه مناسب برای آزمایش پمپاژ	۱۴
۲-۶	مشخصات پیزومترهای شعاع تأثیر	۱۶
۲-۷	فاصله پیزومترها از چاه اصلی	۱۷
۲-۸	طول مدت آزمایش پمپاژ	۱۸
۲-۹	فواصل زمانی اندازه‌گیریها	۲۰
۳-	**وسایل و تجهیزات لازم برای آزمایش پمپاژ**	۲۲
۳-۱	موتور پمپ واجد شرایط	۲۲
۳-۲	وسایل اندازه‌گیری	۲۳
۳-۳	سایر وسایل مورد نیاز	۳۳
۳-۴	مسائل و مشکلات	۳۴

فهرست مطالب

عنوان		صفحه
۴-	**تحلیل نتایج آزمایشهای پمپاژ :**	۳۶
۴-۱	معادلات جریان ماندگار	۳۶
۴-۲	معادلات جریانهای غیرماندگار:	۳۸
۴-۲-۱	راه‌حل ترسیمی تیس برای محاسبه T و S	۴۰
۴-۲-۲	روش کوپر - ژاکوب	۴۸
۴-۲-۳	روش چاو	۵۱
۴-۲-۴	آزمایش برگشت	۵۳
۴-۲-۵	آبدهی تأخیری	۵۵
۴-۲-۶	آبخوانهای نشتی	۶۱
۴-۲-۷	روش پاپادوپولوس -کوپر	۷۰
۴-۲-۸	محاسبه ضریب قابلیت انتقال در چاههای ناقص	۷۳
۴-۲-۹	برآورد ضریب قابلیت انتقال آبخوان با استفاده از داده‌های ظرفیت ویژه چاه	۷۵
۴-۲-۱۰	تعیین مرزهای محدودکننده یک آبخوان	۸۱
۴-۲-۱۱	محاسبه ضرایب هیدرودینامیک در نزدیک مرز تغذیه	۸۹
۴-۲-۱۲	برآورد T با استفاده از شبکه خطوط هم‌پتانسیل و خطوط جریان	۹۳
۴-۲-۱۳	تعیین T با استفاده از مطالعات ژئوفیزیک	۹۵
۴-۳	انتخاب روش تحلیل	۹۸
۴-۳-۱	خصوصیات آبخوان	۹۸
۴-۳-۲	ساختمان چاه	۹۹
۴-۳-۳	نوع جریان	۱۰۰
۴-۳-۴	شرایط مرزی	۱۰۰
۴-۳-۵	اطلاعات دیگر	۱۰۱
۵-	**آزمایش چاه**	۱۰۲
۵-۱	افت آبخوان و تلفات چاه	۱۰۲
۵-۲	آزمایش افت و برگشت پله‌ای	۱۰۶

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۵-۳ تجزیه و تحلیل نتایج اندازه‌گیریهای آزمایش افت پله‌ای	۱۰۶
۵-۳-۱ روش ترسیمی	۱۰۷
۵-۳-۲ روش Roraubagh	۱۱۰
۵-۴ سرعت و دبی بحرانی	۱۱۴
۵-۵ پمپ و موتور	۱۱۶
۵-۵-۱ پمپهای مورد استفاده در چاههای آب	۱۱۶
۵-۵-۲ انتخاب پمپ و تعیین قدرت موتور	۱۲۷
پیوست ۱- جدولهای اندازه‌گیری آبدهی در چاهها	۱۳۱
پیوست ۲- تحلیل چند آزمایش انجام شده در ایران	۱۴۵
۶- منابع و مآخذ	۱۹۳

مقدمه

امروزه در بسیاری از کشورهای جهان، به ویژه در مناطقی که با کمبود آبهای سطحی مواجهند، بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو مطالعات اصولی منابع آب زیرزمینی در اجرای پروژه‌های عمرانی، به عنوان یک عامل مهم واساسی تلقی می‌شود. بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، بدون بهره‌گیری از این گونه مطالعات، می‌تواند مشکلات و پی‌آمدهای جبران ناپذیری به بار آورد. مدیریت صحیح بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی تنها با شناخت کامل این منابع و آگاهی از شرایط هیدرولیکی لایه‌های آبدار میسر خواهد بود.

تحلیل جریان آب در زیر زمین، تهیه بیلان آب، مدل‌سازی منابع آب زیرزمینی برای پیش‌بینی تحولات آینده و تعیین عکس‌العمل آبخوان در شرایط مختلف برداشت و تغذیه، جلوگیری از افتهای نامتناسب سطح آب زیرزمینی و علاج‌بخشی آن از طریق روشهای تغذیه مصنوعی، جلوگیری از رخدادهای نامطلوب مثل هجوم آب شور به سفره‌های آب شیرین و سرانجام بهره‌برداری بهینه از منبع آب زیرزمینی، قبل از هر چیز مستلزم در دست داشتن پارامترهای هیدرولیکی لایه‌های آبدار است.

ضریب قابلیت انتقال (T)[1]، هدایت هیدرولیکی (K)[2] و ضریب ذخیره (S)[3]، مشخص کننده خصوصیات هیدرولیکی لایه‌های آبدار است که ضرایب هیدرودینامیک نیز خوانده می‌شوند. روشهای مختلفی برای اندازه‌گیری و برآورد ضرایب هیدرودینامیک در آبرفتها و سایر محیطهای متخلخل وجود دارد. گرچه در برخی موارد به کمک روشهای آزمایشگاهی، ردیابها، نتایج مطالعات ژئوفیزیک، شبکه خطوط هم پتانسیل و خطوط جریان یا روشهای دیگر، ضرایب هیدرودینامیک برآورد می‌شوند ولی اساساً مهمترین روش تعیین ضرایب هیدرودینامیک در کارهای عملی، آزمایشهای پمپاژ است. نتایج حاصل از آزمایشهای پمپاژ، گذشته از آن که قابل اعتمادند، فقط نماینده یک نقطه نیستند، بلکه شامل خصوصیات هیدرولیکی منطقه وسیعتری می‌شوند.

در چندین دهه اخیر روشهای مختلفی برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیک لایه‌های آبدار با استفاده از آزمایشهای پمپاژ ارائه شده است. اما تمام این روشها بر فرضیات معینی پایه‌گذاری شده‌اند و در شرایط خاصی کاربرد دارند که در عمل ممکن است همیشه تمام این فرضیات و شرایط تحقق پیدا نکنند. بنابراین باید در هر مورد، براساس شرایط صحرایی، روش و رابطه معینی که با آبخوان موردنظر هماهنگی داشته باشد به کار گرفته شود. به علاوه در هر مورد باید میزان انحراف شرایط واقعی با فرضیات نظری مشخص شود تا میزان اعتبار نتایج حاصل معلوم شود.

1- transmissivity

2- permeability

3- storage coefficient

کوشش تهیه‌کنندگان این دستورالعمل ارائه روشهایی ساده و کاربردی برای آزمایشهای پمپاژ، مشخص کردن شرایط، ضوابط و تجهیزات لازم برای اجرای صحیح این آزمایشها و همچنین انتخاب مناسب‌ترین راهها و فرمولهای تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل بر اساس شرایط صحرایی موجود در محل و سرانجام به دست آوردن مطمئن‌ترین نتایج در مورد خصوصیات هیدرولیکی لایه‌های آبدار و استعداد آبدهی چاههای آب است.

لازم به توضیح است که این دستورالعمل عمدتاً به منظور تعیین خصوصیات هیدرولیکی در رسوبات آبرفتی و سایر سازندهای ناپیوسته و غیرسخت تهیه شده و در بسیاری از موارد در سازندهای سخت کاربردی ندارد.

آزمایشهای پمپاژ برای رسیدن به دو هدف کلی زیر انجام می‌شود :

الف - آزمایش آبخوان [1] : تعیین ضرایب هیدرودینامیک لایه‌های آبدار شامل ضریب قابلیت انتقال، هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره

ب - آزمایش چاه [2] : کسب اطلاعات لازم در مورد میزان آبدهی و افت در چاه، محاسبه ضرایب افت در آبخوان (A) و افت در لوله جدار (B) و تعیین بازده چاه، برآورد آبدهی بحرانی، محاسبه ظرفیت ویژه [3] و انتخاب موتور پمپ مناسب برای بهره‌برداری از چاه

1- aquifer test

2- well test

3- specific capacity

۱- تعاریف

۱-۱ آبخوان، لایه نیمه‌تراوا، لایه کم تراوا، لایه ناتراوا

- آبخوان[1]، لایه یا سازند آبدار نفوذپذیری است که آب داخل آن حرکت کند و آب قابل توجهی به‌صورت طبیعی یا مصنوعی از آن تخلیه شود. به آبخوان، سفره یا مخزن آب زیرزمینی نیز می‌گویند.
- لایه نیمه‌تراوا[2]، لایه‌ای اشباع از آب است که آب در آن خیلی کندتر از آبخوان حرکت می‌کند.
- لایه کم‌تراوا یا ریزسازند[3] یک لایه اساساً نفوذناپذیر است که گرچه می‌تواند آب را به آهستگی جذب کند ولی عملاً قادر به انتقال آب نیست.
- لایه ناتراوا یا بسته سازند[4]، لایه نفوذناپذیری است که قادر به جذب و انتقال آب نیست.

۱-۲ انواع آبخوانها

آبخوانها را به طور کلی می‌توان به دو دسته آزاد یا نامحصور[5] و تحت فشار و یا محصور[6] تقسیم کرد :

۱-۲-۱ آبخوان نامحصور یا آزاد

«آبخوان نامحصور یا آزاد» عبارت از لایه نفوذپذیری است که در بالای یک لایه نسبتاً نفوذناپذیر قرار گرفته و مرز فوقانی آن را سطح آزاد آب زیرزمینی تشکیل می‌دهد. سطح آزاد آب زیرزمینی سطحی است که در تمام نقاط آن، فشار برابر فشار اتمسفر است. چنین سطحی را «سطح ایستابی[7]» نیز می‌گویند. وقتی چاهی در یک آبخوان آزاد حفر شود سطح آب در چاه نمایانگر سطح ایستابی است. موقعیت سطح ایستابی تحت تأثیر تغذیه و تخلیه آبخوان تغییر می‌کند.

وقتی یک لایه ناتراوا یا نیمه‌تراوا با گسترش محدود (مثلاً یک عدسی رسی) بالای سطح ایستابی آبخوانهای آزاد وجود داشته باشد، ممکن است سفره‌های محدودی تشکیل شود. این گونه آبخوانها را اصطلاحاً آبخوانهای معلق[8] می‌نامند. آبخوانهای معلق ممکن است موقتی باشند و فقط در خلال دوره‌های کوتاهی از سال به وجود آیند.

1- aquifer
2- aquitard
3- aquiclude
4- aquifuge
5- unconfined
6- confined aquifer
7- watertable
8- perched aquifers

۱-۲-۲ آبخوان محصور یا تحت فشار

آبخوان محصور یا تحت فشار لایه آبداری است که بین دو لایه با نفوذپذیری خیلی کمتر قرار گرفته و کاملاً اشباع از آب زیرزمینی است. لایه‌های محصورکننده ممکن است لایه نیمه‌تراوا یا کم‌تراوا باشند. فشار در سطح فوقانی آبخوانهای محصور بیش از فشار اتمسفر است. شرایط فشار در یک آبخوان محصور به وسیله «سطح پیزومتریک»[1] مشخص می‌شود. وقتی پیزومترهایی تا آبخوان تحت فشار حفر شوند آب از مرز فوقانی آن بالاتر می‌آید. ارتفاع آب در این پیزومترها نمایانگر «سطح پیزومتریک» آبخوان تحت فشار است. وقتی سطح پیزومتریک بالاتر از سطح زمین باشد آب خود به خود از دهانه چاهها جریان می‌یابد (چنین چاههایی را اصطلاحاً چاههای سرریز[2] یا آرتزین نیز می‌خوانند). آبخوانی که به وسیله یک یا دو لایه نیمه تراوا، محصور شده باشد آبخوان نشتی[3] نیز خوانده می‌شود. در امتداد لایه‌های نیمه‌تراوا ممکن است مقدار زیادی آب نشت کند.

۱-۳ ضرایب هیدرودینامیک آبخوان

برای شناخت ضرایب هیدرودینامیک ابتدا باید به شرح مختصری از قانون دارسی پرداخت. طبق قانون دارسی میزان جریان در یک لایه نفوذپذیر با اختلاف بار هیدرولیکی[4] (ΔH) نسبت مستقیم و با طول مسیر جریان (L) نسبت معکوس دارد و با رابطه زیر بیان می‌شود :

$$Q = KA \frac{\Delta H}{L} \qquad (۱-۱)$$

در این رابطه :

Q = میزان جریان آب با بعد $\frac{L^3}{T}$ (متر مکعب بر روز)

A = سطح مقطع عمود بر جهت جریان با بعد L^2 (متر مربع)

$i = \frac{\Delta H}{L}$ = گرادیان هیدرولیک[5] یا شیب آبی، بدون بعد

K = هدایت هیدرولیکی[6] که توانایی محیط متخلخل را برای عبور آب نشان می‌دهد و بعد آن $\frac{L}{T}$ است (متر بر روز)

1- piezometric surface
2- flowing well
3- leaky
4- head loss
5- hydraulic gradient
6- hydraulic conductivity

۱-۳-۱ هدایت هیدرولیکی

هدایت هیدرولیکی یا ضریب نفوذپذیری عبارت است از میزان جریان آبی که از واحد سطح مقطع محیط متخلخل تحت گرادیان هیدرولیک واحد، عبور کند.

مقدار هدایت هیدرولیکی در رسوبات آبرفتی به اندازه منافذ و چگونگی ارتباط آنها بستگی دارد. حدود تغییرات هدایت هیدرولیکی در برخی از رسوبات در جدول ۱-۱ آمده است. در عمل نمونه‌های به‌دست آمده از حفاری چاهها معمولاً مخلوطی است از دانه‌بندی‌هایی که در جدول ۱-۱ ارائه شده است. این امر برآورد مقدار K را در یک نمونه مخلوط با دشواری روبرو می‌کند به همین دلیل جدول ۱-۲ برای برآورد K در نمونه‌های مخلوط ارائه شده است.

جدول ۱-۱ حدود تغییرات هدایت هیدرولیکی در برخی از رسوبات و سنگها[1]

نوع رسوب یا سنگ	حدود تغییرات هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)
خاکهای رسی (سطحی)	۰/۰۱ - ۰/۲
لایه‌های رسی عمیق	10^{-8} - 10^{-2}
ماسه دانه ریز	۱ - ۵
ماسه دانه متوسط	۵ - ۲۰
ماسه دانه درشت	۲۰ - ۱۰۰
شن*	۱۰۰ - ۱۰۰۰
مخلوط ماسه و شن*	۵ - ۱۰۰
مخلوط رس، ماسه و شن*	۰/۰۰۱ - ۰/۱
ماسه سنگ	۰/۰۰۱ - ۱
سنگهای آهکی با تخلخل ثانویه	۰/۰۱ - ۱
شیل	10^{-7}
سنگهای آتشفشانی	تقریباً ۱۰۰۰ - ۰
سنگهای خرد شده و هوازده (لایه آبدار)	۰/۰۰۱ - ۱۰
سنگهای خردشده وهوازده(مغزه‌های حفاری)	۰ - ۳۰۰

* منظور ذرات بزرگتر از ۲ میلیمتر است (Gravel)

1- Bouwer 1978 نقل از

جدول ۱-۲ هدایت هیدرولیکی رسوبات مختلف[1]

نوع رسوبات	نفوذپذیری (متر در روز)	گروه دانه‌بندی
رس	۰/۰۰۱-۰/۱	K_1
سیلت - ماسه ریز و سیلت و رس	۱-۲	K_2
مخلوط ماسه ریز و درشت و رس	۵	K_3
ماسه ریز رسی - ماسه خیلی ریز همگن - رس و ماسه و شن	۷	K_4
ماسه رسی - مخلوط ماسه و رس و شن - رس ماسه‌ای و ماسه	۱۰	K_5
مخلوط ماسه ریز و متوسط وکمی رس - مخلوط ماسه رسی وکمی شن - مخلوط ماسه خیلی ریز وکمی شن	۱۲	K_6
ماسه ریز همگن - مخلوط ماسه و رس ماسه‌ای و شن - ماسه خیلی ریز و رس ماسه‌ای وکمی شن و قلوه سنگ	۱۵	K_7
مخلوط ماسه ریز و متوسط و درشت - مخلوط شن ریز و ماسه و رس ماسه‌ای	۲۰	K_8
مخلوط ماسه ریز و متوسط - مخلوط شن ریز و ماسه و قلوه سنگ و رس	۲۵	K_9
ماسه متوسط همگن - مخلوط قلوه سنگ و شن ریز و متوسط و رس ماسه ریز	۳۰	K_{10}
مخلوط ماسه ریز و ماسه درشت باکمی شن	۳۵	K_{11}
مخلوط ماسه متوسط و ماسه درشت وکمی شن - مخلوط قلوه سنگ و ماسه و رس ماسه‌ای وکمی شن	۴۰	K_{12}
ماسه درشت همگن - مخلوط قلوه سنگ و شن و ماسه رسی	۵۰	K_{13}
مخلوط ماسه و شن - مخلوط ماسه متوسط و درشت و شن و قلوه سنگ	۶۰	K_{14}
مخلوط قلوه سنگ و شن ریز و متوسط و ماسه	۷۰	K_{15}
شن ریز همگن - مخلوط قلوه سنگ و شن متوسط و ریز	۹۰	K_{16}
شن متوسط همگن (از نظر ابعاد)	۱۱۰	K_{17}
شن درشت همگن (از نظر ابعاد)	۱۲۰	K_{18}
قلوه سنگ همگن	۱۳۰	K_{19}

۱-۳-۲ ضریب قابلیت انتقال

ضریب قابلیت انتقال عبارت است از میزان جریان آبی که تحت (گرادیان هیدرولیک) واحد از مقطعی به عرض واحد از آبخوان عبور می‌کند. به عبارت دیگر در یک لایه آبدار همگن، ضریب قابلیت حاصلضرب هدایت هیدرولیکی (K) در ضخامت آبخوان (D) است و با علامت T نشان داده‌می‌شود ($T = K_{\circ} D$).

بعد T عبارت است‌از $\frac{L^3}{T.L}$ (توان سوم طول / طول × زمان) یا $\frac{L^2}{T}$ (توان دوم طول / زمان).T را معمولاً برحسب مترمربع بر روز بیان می‌کنند.

1- (United State Geological Survey) U.S.G.S نقل از

۱-۳-۳ ضریب ذخیره

ضریب ذخیره عبارتست از حجم آبی که منشور قائمی از آبخوان به سطح مقطع واحد بازاء واحد افت سطح ایستابی (در آبخوانهای آزاد) یا واحد افت سطح پیزومتریک (در آبخوانهای تحت فشار) می‌تواند آزاد کند. ضریب ذخیره با علامت S نشان داده می‌شود و بدون بعد است. در آبخوانهای آزاد، ضریب ذخیره همان آبدهی ویژه[1] است. مقدار ضریب ذخیره در آبخوانهای آزاد معمولاً بین ۰/۰۲ تا ۰/۳ و در آبخوانهای تحت فشار بین $۱۰^{-۳}$ تا $۱۰^{-۵}$ تغییر می‌کند.

۱-۴ سطح استاتیک

سطح آب اولیه در چاه را قبل از پمپاژ و خارج از حوزه تاثیر چاههای مجاور که درحال آبکشی هستند، سطح استاتیک گویند. در واقع سطح استاتیک نمایانگر سطح ایستابی در آبخوانهای آزاد یا سطح پیزومتریک در آبخوانهای تحت فشار است.

۱-۵ افت

اختلاف سطح آب در هر لحظه بعد از شروع آبکشی با سطح استاتیک را افت سطح آب[2] می‌گویند.

۱-۶ مخروط افت

تغییرات شکل سطح ایستابی و پیزومتریک در اطراف یک چاه درحال پمپاژ به‌صورت فرورفتگی مخروطی شکلی است که قاعده آن در بالا و رأس آن منطبق بر محور چاه است. این فرورفتگی را مخروط افت[3] گویند.
شکل مخروط افت و سرعت رشد آن دراطراف چاه درحال پمپاژ به عوامل متعددی مثل زمان پمپاژ، ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان، آبدهی بهره‌برداری از چاه، میزان تغذیه، شرایط زمین‌شناسی و مرزهای فیزیکی لایه آبدار بستگی دارد.

هرچه زمان آبکشی از چاه بیشتر باشد مخروط افت گسترش و عمق بیشتری پیدا می‌کند. سرعت گسترش و عمیقتر شدن مخروط افت در ابتدای پمپاژ زیاد است، ولی با ادامه پمپاژ این سرعت کاسته می‌شود. پس از مدتی پمپاژ

1- specific yield
2- drawdown
3- cone of depression

با آبدهی ثابت، مخروط افت ممکن است تقریباً ثابت شود. مخروط افت وقتی به حالت تعادل می‌رسد که مقدار آبکشی معادل تغذیه طبیعی آبخوان در محدوده مخروط افت باشد. دربعضی از چاهها ممکن است شرایط تعادل چند ساعت پس از پمپاژ ظاهر شود و در برخی دیگر این شرایط بعد از روزها یا هفته‌ها ظاهر شود.

ابعاد مخروط افت به ضریب قابلیت انتقال (T) نیز بستگی دارد. هرچه T آبخوان کمتر باشد، مخروط افت عمق بیشتر و گسترش کمتری پیدا می‌کند. به عکس هرچه T زیادتر باشد، مخروط افت عمق کمتر و گسترش بیشتری دارد (شعاع تأثیر چاه بیشتر می‌شود). افزایش ضریب ذخیره (S) آبخوان نیز در کاهش افت دخالت دارد. میزان افت در اطراف چاه درحال پمپاژ متناسب با آبدهی پمپاژ است. با افزایش بده، میزان افت در هر نقطه معین در اطراف چاه نیز افزوده می‌شود.

مخروط افت وقتی شکل متقارن نسبت به محور چاه دارد که آبخوان گسترش نسبتاً زیادی داشته و همگن و ایزوترپ باشد. چاههایی که درنزدیک مرزهای محدودکننده آبخوان مثلاً درنزدیک رودخانه یا سنگهای نفوذناپذیر حفر شده باشند، مخروط افت نامتقارنی دارند.

۱-۷ منطقه تاثیر و شعاع تاثیر

حد منطقه‌ای را که سطح قاعده مخروط افت با سطح ایستابی یا پیزومتریک اولیه مماس می‌شود، منطقه تأثیر[1] یا دایره تأثیر[2] و شعاع آن را شعاع تأثیر[3] می‌گویند.

۱-۸ سطح دینامیک

زمانی‌که به ازای آبدهی معین پمپاژ، افت در چاه به تعادل برسد، تراز آب در چاه اصطلاحاً سطح دینامیک نامیده می‌شود.

۱-۹ جریان ماندگار یا دائم

جریانی که سرعت و فشار در یک نقطه معین ازآن برحسب زمان ثابت باشد، جریان ماندگاریا دائم[4] نامیده می‌شود.

1- area of influence
2- circle of influence
3- raduis of influence
4- steady flow

۱-۱۰ جریان غیرماندگار یا موقت

جریانی که سرعت و فشار در آن برحسب مختصات مکان و زمان تغییر کند، جریان غیر ماندگار یا موقت[1] نامیده می‌شود.

۲- نکات ضروری برای انجام آزمایش

۲-۱ جمع‌آوری اطلاعات اولیه برای مقایسه با نتایج آزمایش پمپاژ

قبل از انجام آزمایش پمپاژ بهتر است اطلاعات حفاری و لوله‌گذاری چاه مورد آزمایش جمع‌آوری شده باشد تا از دانه‌بندی رسوبات تشکیل‌دهنده لایه آبدار و همچنین وضعیت لوله‌گذاری چاه، نظیر عمق و قطر لوله جدار و موقعیت لوله‌های مشبک یا اسکرین و درصد شبکه‌ها و غیره شناختی حاصل شود. با این نوع اطلاعات می‌توان در زمینه‌های زیر نتیجه‌گیری کرد :

۲-۱-۱ با بررسی نتایج به‌دست آمده از حفاری شامل کنترل نمونه‌های خاک و سرعت حفاری در طبقات و عمق برخورد به آب می‌توان پیش‌بینی‌های لازم را جهت انتخاب موتور پمپ آزمایشی مناسب انجام داد (اطلاعات حفاری را می‌توان از مسئولین مربوطه کسب کرد).

۲-۱-۲ در صورتی‌که هدف از انجام آزمایش پمپاژ محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان باشد، بهتر است نمونه‌های خاک تشکیل‌دهنده آبخوان به منظور تعیین دقیق اندازه متوسط دانه‌ها، دانه‌بندی، درجه فشردگی و تعیین درصد مقدار رس آنها به آزمایشگاه ارسال شود. با دردست داشتن نتایج آزمایشگاهی می‌توان تصوری از هدایت هیدرولیکی و تخلخل مفید قبل از آزمایش پمپاژ به‌دست آورد. بدین‌ترتیب با بررسی اجزاء تشکیل‌دهنده لایه آبدار و تقسیم آن به گروههای مختلف نظیر سیلت و ماسه و شن و یا مخلوطی از آنها، هدایت هیدرولیکی تقریبی هر گروه را با استفاده از جدول ۱-۲ تعیین و سپس با ضرب کردن ضخامت هر لایه در هدایت هیدرولیکی مربوط به آن قابلیت انتقال آن لایه را به‌دست آورده و با جمع‌کردن آنها قابلیت انتقال تقریبی آبخوان در محل چاه را برآورد کرد. برای مثال چنانچه ضخامت لایه‌های تشکیل‌دهنده $D_1, D_2, D_3, ...$ بوده و هدایت هیدرولیکی آنها به ترتیب $K_1, K_2, K_3, ...$ باشد، ضریب قابلیت انتقال سفره در این چاه عبارت خواهد بود از :

$$T = K_1D_1 + K_2D_2 + K_3D_3 + ... \qquad (۱-۲)$$

1- unsteady flow

این عمل را می‌توان برای کلیه چاههای حفرشده انجام داده و قابلیت انتقال متوسط آبخوان منطقه را برآورد کرد و نتیجه را با مقادیری از قابلیت انتقال که از آزمایشهای پمپاژ حاصل می‌شود مقایسه کرد و چنانچه اختلاف کلی مابین نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود می‌توان درصد این اختلاف راتعیین و چنانچه امکان به‌دست آوردن ضریب قابلیت از طریق آزمایش پمپاژ در نقاطی با پراکندگی مناسب وجود نداشت با اعمال ضریب تغییرات مزبور که به روش دانه‌بندی حاصل شده، ضریب قابلیت انتقال را در آن نقاط تخمین زد. برداشت نمونه‌های صحرایی دست نخورده که بتواند "معرف کامل طبقات باشد کاری بس دشوار است و گاهی ممکن است نمونه‌های ارسال شده معرف کامل طبقات مورد مطالعه نباشد.

در بعضی موارد به‌خصوص در مواقعیکه لایه از شن‌های درشت تشکیل شده باشد، ممکن است اشتباهات بزرگی در تعیین قابلیت انتقال لایه مورد آزمایش رخ دهد، بنابراین مناسب‌ترین روش برای تخمین ضرایب هیدرودینامیک آبخوان آزمایشهای پمپاژ خواهد بود.

بدیهی است تعیین ضریب قابلیت انتقال در دشتهای وسیع از طریق آزمایشهای پمپاژ مستلزم صرف هزینه‌های سنگین است. بنابراین در این گونه مواقع می‌توان از روش یاد شده در فوق و یا از نقشه‌های مقاومت عرضی (RT) تصحیح شده حاصل مطالعات ژئوفیزیک، برآورد T با استفاده از شبکه‌های خطوط هم‌پتانسیل و خطوط جریان (روش لوله‌های جریان) یا برآورد T با استفاده از ظرفیت ویژه $\frac{Q}{s}$ مبادرت به تهیه نقشه‌های هم T کرد.

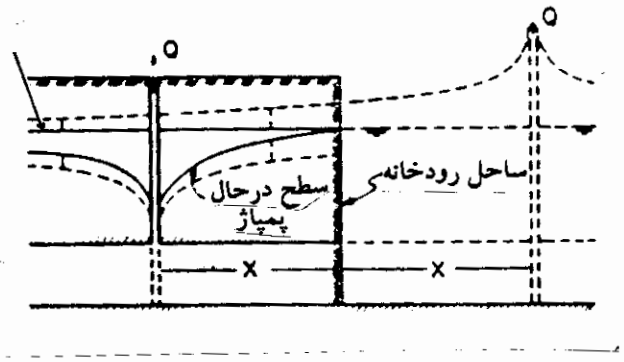
۲-۲ انتخاب محل مناسب

در صورتی‌که هدف از آزمایش پمپاژ شناخت ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان وسیعی باشد، در انتخاب محل آزمایش پمپاژ باید نکات زیر رعایت شود.

۲-۲-۱ شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی محل آزمایش باید معرف قسمت وسیعی از آبخوان بوده و این شرایط در فاصله کوتاهی از محل آزمایش تغییر نکند و به علاوه دارای پراکندگی مناسبی باشد.

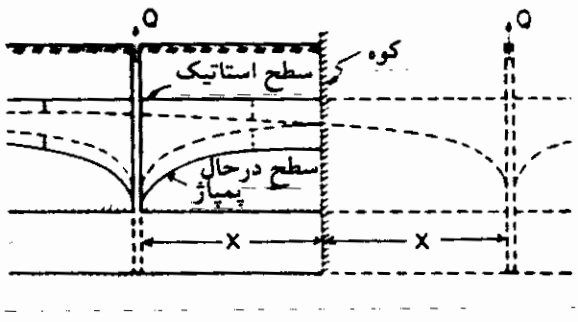
۲-۲-۲ محل آزمایش تاحد امکان در مناطقی که آبخوان در نزدیک رودخانه، دریاچه، گسل و طبقات نفوذناپذیر یا به طورکلی مرزهای تغذیه و نفوذناپذیر است، انتخاب نشود. با توجه به اینکه اساساً معادلات جریانهای شعاعی بر پایه این عقیده بنا نهاده شده که آبخوان دارای گسترش نامحدود است، وجود مرزهای محدودکننده (مرزهای تغذیه یا نفوذناپذیر) در بکارگیری معادله پیچیدگی به‌وجود می‌آورد.

پنابراین قراردادن یک چاه مجازی برای شبیه‌سازی هیدرولیکی رژیم جریان و برقراری شرایط آبخوان نامحدود که شرط اصلی برای به‌کارگیری این معادلات است، الزامی است. به‌عنوان مثال برای تحلیل تأثیر یک مرز تغذیه، یک چاه فرضی در طرف دیگر مرز مزبور و با فاصله یکسان از مرز نسبت به چاه حقیقی (چاه مورد آزمایش) قرار داده می‌شود، (x) این چاه فرضی آب را به همان میزانی که چاه مورد آزمایش از آبخوان تخلیه می‌کند، به آن وارد کرده و در نتیجه سطح آب به سبب ازبین رفتن افت (s_x)، ناشی از تغذیه به‌وسیله چاه فرضی در مرز بالا می‌آید. (شکل ۲-۱)



شکل ۲-۱ مرز تغذیه (تغذیه ناشی از یک چاه فرضی)

شبیه چنین وضعیتی در مرز غیرقابل نفوذ بدین صورت است که یک چاه پمپاژی (تخلیه کننده) فرضی در فاصله‌ای برابر با فاصله چاه حقیقی نسبت به مرز و در طرف دیگر آن قرار دارد (شکل ۲-۲).



شکل ۲-۲ مرز نفوذناپذیر (افت مضاعف ناشی از پمپاژ چاه فرضی)

۲-۲-۳ محل آزمایش در نزدیک چاههای بهره‌برداری انتخاب نشود چون ممکن است آبکشی از آنها بر روی چاه مورد آزمایش تاثیر کند و چنانچه چاههایی در اطراف چاه مورد آزمایش موجود باشند باید مدتی قبل از شروع آزمایش پمپاژ، آبکشی از آنها متوقف شود به‌طوری‌که سطح آب آنها به حالت اولیه برگردد و چنانچه توقف آنها امکان‌پذیر نباشد در طول مدت آزمایش، آبکشی از آنها به‌طور یکنواخت ادامه یابد بدیهی است که در این شرایط نتایج به دست آمده دقت زیادی ندارد.

۲-۲-۴ محل چاه باید طوری درنظر گرفته شود که انتقال تجهیزات پمپاژ و نصب آنها به سهولت امکان‌پذیر باشد.

۲-۲-۵ محل آزمایش نباید در نزدیکی راه‌آهن، جاده‌ها و خطوط انتقال آب، گاز و .... باشد.

۲-۳ محل تخلیه آب پمپاژ شده

قبل از شروع آزمایش پمپاژ باید در مورد محل تخلیه آب پمپاژ شده پیش‌بینی‌های لازم به عمل آید. آب پمپاژ شده نباید مشکلی برای جاده‌ها، مناطق مسکونی و تأسیسات مختلف دیگر ایجاد کند. به منظور جلوگیری از ایجاد خطا در افت‌های اندازه‌گیری شده باید از نفوذ مجدد آب تخلیه شده به آبخوان ممانعت شود. اینکار به روشهای متعددی ازجمله انتقال آب از طریق احداث خط لوله‌های فلزی، پی.وی.سی[1] یا پلاستیکی، هدایت آب به کانالهای بتنی آبرسان و یا ایجاد نهر یا کانالهای کم‌عمق که کف آنها عایق‌بندی شده باشد، امکان‌پذیر است.

درحالتی که پمپاژ در آبخوان محصور انجام می‌شود، حتی اگر آب به زمین نفوذ کند امکان نفوذ مجدد آن به آبخوان در زمان پمپاژ ممکن است وجود نداشته باشد و بنابراین تمهیداتی برای جلوگیری از نفوذ مجدد موردنیاز نیست. اما در صورتی‌که پمپاژ در آبخوان آزاد انجام می‌شود، انجام تمهیداتی برای جلوگیری از نفوذ مجدد آب تخلیه شده به آبخوان لازم است.

در صورتی‌که در نزدیکی محل آزمایش خاک رس وجود داشته باشد، با احداث یک کانال کم عمق تا فاصله حدود پانصد متری از چاه مورد آزمایش با پخش کردن خاک رس در کف کانال و کوبیدن آن با غلطک‌های دستی و یا هر وسیله دیگر کف کانال عایق‌بندی می‌شود. با هدایت آب تخلیه شده به کانال مزبور خاک رس پخش شده در کف کانال با جذب آب کاملاً غیرقابل نفوذ شده و بدین طریق از نفوذ مجدد آب به آبخوان جلوگیری خواهد شد.

طریقه دیگر عایق‌بندی کف کانال احداث شده، استفاده از ورقه‌های پلاستیکی است. نحوه پهن کردن هر ورقه پلاستیک به طریقی است که ورقه‌های پلاستیکی در محل اتصال به یکدیگر باید حدود نیم متر پوشش داشته باشند. پوشش دادن دو ورقه بدین ترتیب است که ورقه پائین‌دستی باید در زیر ورقه بالادستی قرار داده شود. با پوشش دادن ورقه‌های پلاستیک به طریقه فوق امکان نفوذ آب از محل اتصال آنها ازبین خواهد رفت.

1- Polyvenile Choloride

در حالتی که برای انتقال آب تخلیه شده از لوله‌های فلزی، پی. وی. سی و یا پلاستیکی استفاده می‌شود، ابتدا باید آب تخلیه شده به حوضچه‌ای سیمانی هدایت شود و لوله‌های مزبور به خروجی حوضچه وصل شود. اتصال لوله‌ها به هم با بوشن و یا چسب مخصوص پی.وی.سی انجام می‌گیرد.

درصورتی‌که در محل آزمایش جوی و یا کانالهای بتنی وجود داشته باشد، آب تخلیه شده به درون آنها هدایت و از محل آزمایش دور خواهد شد. درصورت لزوم می‌توان با اندازه‌گیری آبدهی جریان در بالادست و پائین‌دست این نهرها تغییرات آبدهی آنها را کنترل کرد. اگر میزان آبدهی در طول مسیر کاهش نشان دهد دلیل بر نفوذ آب به زمین است که باید از آن جلوگیری کرد.

آبهای منتقل شده توسط هریک از روشهای فوق حتی‌الامکان باید به گودالها، دریاچه‌ها و آبراههای طبیعی که ارتباط هیدرولیکی مستقیم با آبخوان ندارند، هدایت شود.

۴-۲ توسعه و شستشوی چاه بوسیله پمپ توربینی

هدف از توسعه چاه[1]، ایجاد یک صافی شنی طبیعی در اطراف لوله‌های مشبک یا اسکرین[2] است، که نهایتاً از ورود ذرات ریز به داخل چاه هنگام پمپاژ جلوگیری شود و منطقه‌ای با دانه‌بندی درشت و قابل نفوذ تراز خود آبخوان در اطراف لوله مشبک و یا اسکرین ایجاد شود. توسعه و شستشوی چاه ازنظر افزایش تخلخل مفید و قابلیت نفوذپذیری لایه‌های آبدار در محدوده اطراف چاه موثر است و عبور جریان آب از آبخوان به طرف چاه آسان‌تر صورت می‌گیرد.

اساس توسعه و شستشوی چاه ایجاد جریان متناوب از آبخوان به چاه و بالعکس است. بدین وسیله ذرات ریز از لابلای دانه‌های درشت‌تر که ممکن است در مقابل جریان یک‌طرفه مقاومت نمایند آزاد شده و از چاه خارج می‌شود. برای این کار ابتدا با دور کم و ثابت موتور، آبکشی از چاه با حداقل آبدهی پمپ شروع و آنقدر ادامه می‌یابد تا جریان آب کاملاً تمیز و شفاف و عاری از مواد دانه‌ریز شود. در این شرایط با کلاچ زدن موتور و قطع پمپاژ و برگشت ستون آب به داخل چاه، شستشوی معکوس[3] موجب سهولت و سرعت شستشو و توسعه چاه می‌شود. برای اینکه این عمل بهتر انجام شود می‌توان از پمپهای توربینی پروانه باز که در دو جهت چرخش می‌کنند، استفاده کرد، تا در جهت چرخش معکوس پمپ، جریان آب داخل لوله آبده با سرعت و فشار زیاد وارد آبخوان شده تا عمل شستشو سریع‌تر انجام شود.

1- well development

2- screen

3- back washing

پس از مدتی آبکشی با دور حداقل و کلاچ زدن مداوم در خاتمه این مرحله باید جریان آب خروجی از پمپ کاملاً شفاف و عاری از مواد معلق باشد. سپس دور موتور را افزایش داده تا چاه با آبدهی بیشتر پمپاژ شود. در این مرحله نیز ممکن است جریان آب خروجی گل‌آلود و حاوی مواد دانه‌ریز و معلق باشد در این مرحله نیز مانند مرحله اول پمپاژ با همان دور ثابت آنقدر ادامه می‌یابد تا آب خروجی از پمپ صاف و شفاف شود و سپس با کلاچ زدن و شستشوی معکوس این عمل آنقدر ادامه می‌یابد تا جریان آب عاری از مواد دانه‌ریز و معلق شود. این عملیات با افزایش دور موتور تا حداکثر آبدهی چاه با توان موتور پمپ آزمایشی ادامه می‌یابد.

هدف توسعه و شستشو بستگی به شرایط چاه و ساختمان آبخوان داشته و در مواردی‌که چاه با روش دورانی و گردش گل، حفاری شده است بستگی به توسعه و شستشوی قبلی در مرحله حفاری دارد. هر اندازه توسعه و شستشوی چاه با دقت و زمان بیشتری انجام شود، در افزایش ظرفیت ویژه چاه مؤثرتر است. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد برای توسعه و شستشو چاه در مرحله پمپاژ باید حتماً از پمپ‌های توربینی شافت و غلافدار و موتور دیزل استفاده شود.

۲-۵ ساختمان چاه مناسب برای آزمایش پمپاژ

بهترین چاه برای انجام آزمایش پمپاژ به منظور محاسبه ضرایب هیدرودینامیک، چاهی است که تا انتهای آبخوان مورد نظر حفر و تکمیل شود و با حفر یک یا چند حلقه پیزومتر در همان آبخوان اقدام به انجام آزمایش پمپاژ شود. حالت فوق برای آبخوانهای آزاد به سهولت امکان‌پذیر است ولی در آبخوانهای محصور یا نیمه‌محصور باید کلیه آبخوانهای دیگر به استثنای آبخوان مورد نظر در هنگام حفاری از طریق تزریق سیمان تفکیک شوند و پیزومترهای مربوطه نیز باید شرایط مشابه چاه را داشته باشند. ولی در عمل بعلت نبودن شناخت کافی از آبخوانهای موجود معمولاً چاه اکتشافی تا سنگ کف حفاری و تکمیل می‌شود و ممکن است یک یا چند آبخوان را قطع کرده باشد، بنابراین نتایج حاصل از آزمایش پمپاژ نمایانگر خصوصیات کلیه آبخوانهای حفر شده به منزله یک آبخوان واحد است. برای آگاهی ازحفاری، لوله‌گذاری و تکمیل چاههای آب به دستورالعمل حفاری چاههای آب نشریه شماره ۱۰۱ مهندسی آب مراجعه شود که جزئیات ساختمان چاه در آن تشریح شده است. دراینجا فقط به ذکر چند نکته اصلی اکتفا می‌شود.

۲-۵-۱ قطر چاه

قطر چاه و لوله جدار باید طوری انتخاب شود که باتوجه به آبدهی پیش‌بینی شده چاه، فضای کافی برای نصب پمپ واجد شرایط با ظرفیت آبدهی موردنظر را داشته باشد و به علاوه اندازه‌گیری تغییرات سطح آب یا نصب لوله ترمی در آن امکان‌پذیر و بازده هیدرولیکی کافی داشته باشد.

افزایش قطر چاه در ازدیاد آبدهی آن چندان مؤثر نیست. اگر سایر شرایط یکسان باشد دو برابر کردن قطر چاه فقط حدود ۱۰٪ آبدهی را زیاد می‌کند. اما تجربه نشان داده است که در بعضی چاهها به دلیل وجود افت شبکه، با دو برابر کردن قطر چاه، در شرایط یکسان، آبدهی بیش از ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. این افزایش آبدهی ناشی از افزایش سطح آبگیری چاه و در نتیجه کاهش افت شبکه است.

۲-۵-۲ عمق چاه

عمق چاه اکتشافی معمولاً باتوجه به وضعیت زمین‌شناسی محل چاه در هنگام حفاری تعیین می‌شود. برای دستیابی به حداکثر آبدهی، بهتر است چاه تا انتهای آبخوان حفر شود زیرا در این حالت تمام ضخامت بخش اشباع مورد استفاده قرارگرفته و آبدهی چاه حداکثر است. همچنین در این حالت امکان داشتن افت بیشترکه خود توام با افزایش آبدهی است نیز فراهم خواهد شد.

با توجه به مسائل اقتصادی و هزینه‌های سنگین حفاری در چاه عمیق، برای دستیابی به ظرفیت ویژه کافی و مورد انتظار در یک چاه، حفر حدود ۶۵ درصد ضخامت بخش اشباع کافی است. در این شرایط نیز می‌توان با آزمایش‌های پمپاژ ضرایب هیدرودینامیک را با دقت قابل قبول محاسبه کرد.

۲-۵-۳ لوله مشبک

برای دستیابی به آبدهی مطلوب بهتر است طول لوله‌های مشبک یا اسکرین در حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد ضخامت آبخوان را بپوشاند ولی در آبخوانهای آزاد چون در هنگام پمپاژ دراثر افت، قسمت‌های فوقانی لوله مشبک خارج از آب می‌ماند لذا پوشش حداقل ۷۵ درصد قسمت‌های تحتانی لایه آبدار کافی است. ضمناً شبکه‌های لوله جدار یا اسکرین باید طوری انتخاب شود که با توجه به دانه‌بندی طبقات آبدار ضمن اینکه جریان آب بطرف چاه به سهولت انجام می‌شود از ورود ذرات دانه‌ریز به داخل چاه جلوگیری شود.

پوشش کافی اسکرین در ضخامت لایه آبدار باعث می‌شود که جریان آب از آبخوان بطرف چاه بیشتر افقی بوده و اختلاف سطح آب در سفره و چاه کمتر شده و جریان عمودی وجود نداشته باشد و در نتیجه فرضی که در کلیه معادلات مربوط به آزمایش پمپاژ (جریان افقی) درنظرگرفته شده رعایت می‌شود و به تصحیح مقدار افت احتیاجی نیست و نتایج حاصل از محاسبات به مقدار واقعی نزدیک‌تر خواهد بود.

۲-۵-۴ صافی شنی[1]

ایجاد صافی شنی اصولاً در چاه‌ها به‌منظور ایجاد یک ناحیه نفوذپذیرتر در اطراف آن، افزایش ظرفیت ویژه، به حداقل رسانیدن ماسه دهی در آبخوانهای دانه‌ریز، کمک به استحکام ساختمان چاه و به حداقل رسانیدن میزان پوسته‌گذاری در چاههائی که خصوصیات شیمیائی آب زیرزمینی، پتانسیل رسوب‌گذاری دارد، انجام می‌گیرد. برای اطلاع بیشتر از چگونگی ایجاد صافی شنی به نشریه شماره ۱۰۱ مهندسی آب مراجعه شود.

۲-۶ مشخصات پیزومترهای شعاع تأثیر

برای انجام آزمایشهای پمپاژ، داده‌های افت را می‌توان هم در چاه اصلی و هم در پیزومترهای مجاور چاه، که در محلهای مناسبی حفر شده باشند، اندازه‌گیری کرد. اما دقت اندازه‌گیریها در چاه پمپاژی، به علت آشفتگی ناشی از کارکرد پمپ، کمتر قابل اعتماد است. قابلیت انتقال آبخوان را می‌توان براساس داده‌های افت در چاه پمپاژی یا در پیزومترها محاسبه کرد، اما برای محاسبه ضریب ذخیره وجود حداقل یک پیزومتر ضرورت دارد.

۲-۶-۱ تعداد پیزومتر

به طور کلی باید گفت که هرچه تعداد پیزومترها بیشتر باشد، نتایج به‌دست آمده اعتبار بیشتری خواهد داشت. اما انتخاب تعداد پیزومترها به اطلاعات مورد نیاز، دقت موردنظر و امکانات مالی وابسته است. به علاوه باید گفت که با وجود چند پیزومتر در فواصل مختلف می‌توان داده‌های به‌دست آمده را هم با استفاده از رابطه زمان - افت و هم فاصله - افت تحلیل کرد. بنابراین بهتراست تا آنجاکه شرایط و امکانات اجازه می‌دهد تعداد پیزومترها بیشتر باشد. تجربه نشان داده که وجود سه پیزومتر در فواصل مختلف برای به دست آوردن نتایج دقیق لازم است. نتایج حاصل از این پیزومترها میانگین شرایط آبخوان را نشان می‌دهد. برای مطالعات دقیقتر حتی تعداد بیشتری پیزومتر نیز توصیه شده است. البته در عمل حفر تعداد زیاد پیزومتر معمول نیست و به یک یا دو پیزومتر اکتفا می‌شود. گاهی نیز می‌توان از چاههای موجود در محل، در صورتی که شرایط نسبتاً مناسبی داشته باشند، نیز به عنوان پیزومتر در آزمایشهای پمپاژ استفاده کرد.

۲-۶-۲ ساختمان پیزومتر

قطر پیزومترها باید فقط آنقدر باشد که بتوان به دقت و با سرعت سطح آب را در آن اندازه‌گیری کرد. پیزومترهای با

1- gravel pack

قطر کوچک بهتراست، زیرا حجم آب در یک پیزومتر با قطر بزرگ ممکن است موجب تأخیر زمانی در تغییرات افت شود. وقتی اندازه‌گیریهای سطح آب با عمق‌یابهای دستی انجام می‌شود، نیازی نیست که قطر پیزومترها بیش از ۴ اینچ باشد.

عمق پیزومترها به عمق چاه پمپاژی بستگی دارد ولی در هر شرایط عمق آن باید طوری انتخاب شود که با آبخوان مورد پمپاژ ارتباط هیدرولیکی داشته باشد. عمق پیزومترها، در آبخوانهای آزاد باید تا وسط بخش اشباع لایه آبدار و در آبخوانهای تحت فشار تا سقف آبخوان (زیر لایه محصورکننده) باشد. بخش مشبک پیزومترها باید طوری باشد که نمایانگر سطح ایستابی یا سطح پیزومتریک واقعی آبخوان باشد. در آبخوانهای تحت فشار، پیزومتر تا سطح فوقانی آبخوان باید دارای لوله غیر مشبک باشد.

۲-۷ فاصله پیزومترها از چاه اصلی

پیزومترها باید در فاصله‌ای از چاه اصلی حفر شوند که بهترین نتایج را به‌دست دهند. این فاصله نباید آنقدر زیاد باشد که تغییرات سطح ایستابی یا پیزومتریک ناچیز و در نتیجه اندازه‌گیری افت دقت زیادی نداشته باشد و نه آن قدر کم باشد که تحت تأثیر مولفه‌های قائم جریان در آبخوان قرار گیرد. به علاوه در نزدیک چاه در حال پمپاژ داده‌های افت تحت تأثیر لایه‌بندی سفره قرار می‌گیرد، چون لایه‌بندی توزیع بار هیدرولیکی و افت در نزدیک چاه درحال پمپاژ را بر هم می‌زند.

در انتخاب فاصله پیزومترها باید به نکات زیر توجه کرد :

- نوع آبخوان : در آبخوانهای تحت فشار، افت بار هیدرولیکی براثر پمپاژ به سرعت منتشر می‌شود. بنابراین اندازه‌گیریهای افت را می‌توان در فواصل نسبتاً دورتری نسبت به آبخوانهای آزاد نیز انجام داد (مثلاً تا چند صد متری چاه اصلی). در آبخوانهای آزاد، انتشار افت بارهای هیدرولیکی نسبتاً آهسته است و این افتها در فواصل کوتاهی از چاه اصلی قابل اندازه‌گیری است (معمولاً خیلی بیشتر از ۱۰۰ متر نیست).
- هدایت هیدرولیکی : وقتی هدایت هیدرولیکی زیاد باشد مخروط افت پهن و گسترده و زمانی که نفوذپذیری کم باشد مخروط پر شیب و کوچک است. بنابراین درحالت اول پیزومترها را می‌توان در فواصل دورتری قرار داد. به هر حال برآوردی از هدایت هیدرولیکی آبخوان قبل از آزمایش پمپاژ به انتخاب بهتر فاصله پیزومترها کمک می‌کند.
- آبدهی چاه : هرچه آبدهی چاه زیادتر باشد میزان افت در هر نقطه بیشتراست، بنابراین فاصله پیزومترها می‌تواند بیشتر اختیار شود.
- طول لوله مشبک نسبت به ضخامت آبخوان : اگر چاه در تمام ضخامت آبخوان حفر شده باشد، جریان آب به

سمت چاه اساساً افقی است. بنابراین می‌توان از پیزومترهای نزدیک چاه اصلی نیز استفاده کرد. ولی وقتی چاه در تمام ضخامت سفره نفوذ نکرده باشد، به علت مؤلفه‌های قائم جریان در نزدیک چاه، نتایج حاصل از پیزومترهای نزدیک چاه اصلی ممکن است دقیق نباشد.

به طورکلی توصیه می‌شود که نزدیکترین پیزومترها حداقل ۱ تا ۱/۵ برابر ضخامت آبخوان از چاه اصلی فاصله داشته باشد. درچنین فاصله‌ای جریان اساساً افقی فرض می‌شود.

- لایه‌بندی : در آبخوانهای غیر همگن، هرچه فاصله پیزومترها بیشتر باشد، اثر لایه‌بندی بر روی توزیع افت کمتر می‌شود. در نزدیک چاه پمپاژی، لایه‌بندی موجب برهم زدن توزیع بارهای هیدرولیکی و افت می‌شود.

با توجه به توضیحات فوق، انتخاب فاصله پیزومترها به عوامل متعددی بستگی دارد و قانون مشخصی در این مورد نمی‌توان بیان کرد. تجربه نشان می‌دهد که به طور کلی استقرار پیزومترها در فاصله ۱۰ تا ۱۰۰ متری چاه اصلی در اغلب موارد نتایج خوبی به دست می‌دهد. برای آبخوانهایی که ضخیم یا به طور بارزی لایه لایه‌اند، فاصله پیزومترها تا چاه اصلی باید ۱۰۰ تا ۲۵۰ متر یا حتی بیشتر باشد تا نتایج مطمئنی به دست آید.

در مواقعی که چاه تمامی ضخامت آبخوان را حفر نکرده باشد، فاصله تا نزدیکترین چاه پیزومتر توسط رابطه زیر نیز بیان شده است[1] :

$$r > 1.5\ M\ (\frac{K_r}{K_z})^{1/2} \qquad (۲-۲)$$

در این فرمول :

r = فاصله پیزومتر از چاه اصلی (متر)

M = ضخامت آبخوان (متر)

K_r = هدایت هیدرولیکی افقی (متر بر روز)

K_z = هدایت هیدرولیکی قائم (متر بر روز)

۲-۸ طول مدت آزمایش پمپاژ

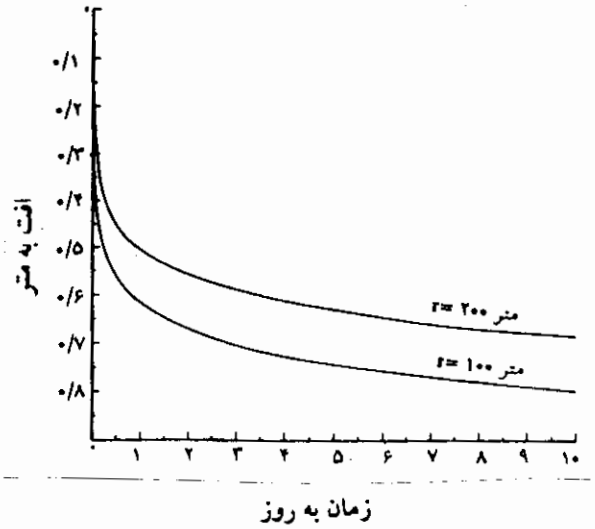
طول زمان لازم برای انجام آزمایش پمپاژ به نوع آبخوان و دقت موردنظر بستگی دارد. مطمئن‌ترین نتایج وقتی به دست می‌آید که آزمایش پمپاژ تا رسیدن به حالت ماندگار ادامه یابد. برای رسیدن به چنین شرایطی باید پمپاژ آن قدر ادامه پیدا کند تا سطح آب در چاه و پیزومترها ثابت شود و دیگر افتی روی ندهد.

1- graund water manual 1981

در ابتدای پمپاژ سطح ایستابی و پیزومتریک در اطراف چاه به سرعت افت می‌کند، ولی به تدریج با گذشت زمان سرعت افت کاهش می‌یابد. پس از مدتی پمپاژ، تغییرات افت در فواصل زمانی کوتاه قابل توجه نیست و این موضوع غالباً باعث می‌شود که نتیجه بگیریم مخروط افت به حالت تعادل رسیده است. ولی تعادل واقعی بـه نـدرت روی می‌دهد. برای ایجاد حالت تعادل، مخروط افت باید آن قدر رشد کند که مقدار آبدهی پمپاژ، معادل تغذیه آبخوان شود. به هرحال وقتی شرایط ماندگار برقرار شد، علاوه بر روابط جریانهای غیرماندگار (روابط تایس، ژاکوب و ...) از معادله تعادل یا تیم[1] نیز می‌توان برای محاسبه قابلیت انتقال استفاده کرد.

نکته قابل توجه این است که اگر اندازه‌گیری در دو پیزومتر به فواصل مختلف از چاه اصلی انجام گیرد، پس از مدتی از شروع پمپاژ سطح آب در چاههای پیزومتر تقریباً با سرعت ثابتی پایین می‌رود، یعنی مقدار اختلاف افت در دو پیزومتر $(s_1 - s_2)$ مقدار ثابتی می‌شود، درحالی که سطح آب در پیزومترها هنوز درحال افت است. بنابر این در چنین شرایطی نیز می‌توان از رابطه تعادل برای به‌دست آوردن T استفاده کرد :

$$T = \frac{Q \ln (r_2/r_1)}{2\pi (s_1-s_2)} \qquad (۳-۲)$$



شکل ۲-۳- تغییرات افت نسبت به زمان در پیزومترهایی که به فاصله ۱۰۰ و ۲۰۰ متری یک چاه بهره‌برداری فرضی قرار دارند.

1- equillibrium or Theim equation

مدت لازم برای رسیدن به شرایط ماندگار در نقاط مختلف متفاوت است. شرایط تعادل در بعضی چاهها پس از چندین ساعت از شروع پمپاژ و در بعضی دیگر ظرف چند روز یا چند هفته ایجاد می‌شود. در برخی از چاهها نیز حتی پس از سالها پمپاژ، شرایط تعادل برقرار نمی‌شود.

بنابراین در شرایط مناسب توصیه می‌شود که پمپاژ تا ثابت شدن سطح آب در پیزومترها ادامه پیدا کند. در آبخوانهای تحت فشار مخروط افت به سرعت گسترش می‌یابد، چون برداشت آب تنها منجر به کاهش فشار می‌شود. در این گونه آبخوانها معمولاً مدت ۲۴ ساعت آزمایش پمپاژ برای به‌دست آوردن نتایج مطلوب کافی است.

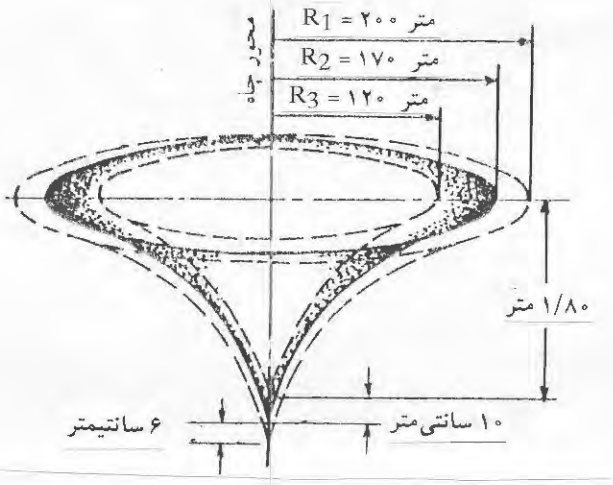
در آبخوانهای آزاد چون مخروط افت به آهستگی رشد می‌کند به زمان طولانی‌تری برای آزمایش پمپاژ نیاز است. در این گونه آبخوانها زمان بیشتری برای تخلیه لایه آبدار لازمست. زیرا در اغلب رسوبات لایه لایه نفوذ عمقی به آهستگی انجام می‌گیرد (آبخوانهای آزاد دارای آبدهی تأخیری است). بنابراین در آبخوانهای آزاد معمولاً آزمایش پمپاژ باید به مدت ۷۲ ساعت ادامه پیدا کند. البته در صورتی که شرایط ماندگار زودتر از ۷۲ ساعت برقرار شود روشن است که نیازی به ادامه پمپاژ نیست.

آزمایشهای پمپاژ طولانی مدت می‌تواند وجود مرزهای هیدرولیکی ناشناخته آبخوان را مشخص کند.

۲-۹ فواصل زمانی اندازه‌گیریها

در حین آزمایش پمپاژ اندازه‌گیریهای دقیق عمق سطح آب در چاه اصلی و پیزومترها و اندازه‌گیری آبدهی چاه ضروری است. با شروع پمپاژ، در سطح ایستابی یا پیزومتریک اطراف چاه یک مخروط افت تشکیل می‌شود. هرچه مدت و مقدار آبکشی بیشتر باشد مخروط افت گسترش و عمق بیشتری پیدا می‌کند. اما با گذشت زمان سرعت گسترش و عمیقتر شدن مخروط افت کاهش می‌یابد.

مثلاً در شکل ۲-۴ مخروطهای افت در اطراف چاهی فرضی که با آبدهی ثابت پمپاژ می‌شود در سه مرحله نشان داده شده است. به طوری که در شکل دیده می‌شود پس از یک ساعت از شروع پمپاژ شعاع مخروط افت ۱۲۰ متر و عمق آن در چاه اصلی ۱/۸۰ متر است. در پایان ساعت دوم، شعاع مخروط افت به ۱۷۰ متر و عمق آن به ۱/۹۰ متر می‌رسد. یعنی شعاع مخروط افت ۵۰ متر و عمق آن فقط ۱۰ سانتی‌متر افزایش پیدا می‌کند. در ساعت سوم پمپاژ ۳۰ متر به شعاع مخروط افت و ۶ سانتی متر به عمق آن افزوده می‌شود.



شکل ۲-۴ تغییرات شعاع و عمق مخروط افت در فواصل زمانی مساوی پس از شروع پمپاژ با آبدهی ثابت
(اندازه‌ها به مقیاس نیست)

با توجه به مطالب فوق اندازه‌گیری عمق سطح آب در چاه اصلی و پیزومترها در مراحل اولیه آزمایش پمپاژ، در طی یک یا دو ساعت اول باید در فواصل زمانی کوتاه انجام گیرد و با گذشت زمان فواصل اندازه‌گیری می‌تواند به تدریج بیشتر شود.

در صورت امکان بهتر است اندازه‌گیریهای عمق سطح آب به وسیله دستگاههای خودکار ثبات انجام گیرد که به طور پیوسته تغییرات سطح آب را نشان می‌دهند. در صورتی‌که این دستگاهها در دسترس نباشد اندازه‌گیریها باید با عمق‌یابهای الکتریکی معمولی انجام گیرد.در این صورت توصیه می‌شود که فواصل زمانی اندازه‌گیریها در چاه اصلی و پیزومترها به صورت زیر باشد :

زمان صفر تا ۱۰ دقیقه : ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳، ۴، ۵، ۶/۵، ۸، ۱۰ دقیقه
زمان ۱۰ تا ۱۰۰ دقیقه : ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۵، ۸۰ و ۱۰۰ دقیقه
و از ۱۰۰ دقیقه به بعد هر یک یا دو ساعت یک بار.

البته این فواصل زمانی پیشنهادی را نباید قطعی تلقی کرد و رعایت دقیق آن الزامی نیست. باتوجه به شرایط آبخوان در محل و امکانات موجود می‌توان تغییراتی در آن داد. چون معمولاً تحلیل آزمایشها بر روی کاغذهای لگاریتمی و نیمه‌لگاریتمی انجام می‌گیرد بهتر است تعداد افتهای اندازه‌گیری شده در هر سیکل لگاریتمی زمان حداقل ۱۰ بار باشد. در آبخوانهای آزاد به علت تأخیر در افت سطح آب، فواصل زمانی در پیزومترها در ابتدای آزمایش می‌تواند بیشتر باشد (مثلاً حدود ۲ دقیقه).

پس از قطع پمپاژ، در زمان برگشت آب نیز سطح آب باید در چاه اصلی و پیزومترها اندازه‌گیری شود. این عمل به ویژه در چاه اصلی دارای اهمیت بیشتری است زیرا که در زمان پمپاژ، اندازه‌گیریهای افت در چاه اصلی دقت کمتری دارد. فواصل زمانی اندازه‌گیریهای سطح آب در زمان برگشت نیز مثل آزمایش افت است. دقت اندازه‌گیریهای سطح آب باید حداقل در حد سانتی‌متر باشد.

در حین آزمایش پمپاژ اندازه‌گیری و کنترل آبدهی چاه نیز ضروری است. گرچه در معادلات جریانهای شعاعی فرض بر ثابت بودن آبدهی است ولی آبدهی چاه عملاً ممکن است به علت تغییرات ولتاژ در موتورهای الکتریکی یا تغییرات دما، رطوبت و تغییر ترکیب سوخت در موتورهای دیزلی و بنزینی، تغییرات ناخواسته‌ای داشته باشد. به این جهت در حین آزمایش پمپاژ لازم است که وسیله دقیقی برای اندازه‌گیری آبدهی و تغییرات آن و همچنین وسیله‌ای برای کنترل و تنظیم بده، که تا حد ممکن ثابت باشد، مورد استفاده قرار گیرد. بهتر است برای اندازه‌گیری آبدهی از روزنه[1] یا وسایل دیگری استفاده شود که به‌طور مداوم اندازه‌گیری آبدهی امکان‌پذیر باشد. استفاده از شیر فلکه (والو) در لوله آبده نیز بهترین وسیله کنترل آبدهی است. شیر باید به صورت نیمه‌باز باشد. اندازه شیر و لوله باید طوری باشد که وقتی نصف یا سه چهارم شیر باز باشد پمپ در آبدهی موردنظر کار کند.

۳- وسایل و تجهیزات لازم برای آزمایش پمپاژ

۳-۱ موتور پمپ واجد شرایط

برای پمپاژ و تخلیه آب از چاه می‌توان از انواع پمپ‌ها استفاده کرد. درصورتیکه هدف انجام آزمایش پمپاژ با آبدهی ثابت باشد موتور پمپ باید بتواند چاه را حداقل دو تا سه روز مداوم با آبدهی ثابت پمپاژ کند، حتی در بعضی موارد زمان آزمایش ممکن است خیلی بیشتر باشد. به علاوه قدرت موتور پمپ باید متناسب با ظرفیت آبدهی چاه انتخاب شود که بتواند افت کافی و قابل اندازه‌گیری را در چاه اصلی و چاههای پیزومتر مجاور، ایجاد کند.

چون در آزمایشهای افت پله‌ای لازم است که در حین آزمایش دور موتور تغییر کند از پمپهای توربینی شافت و غلافدار که نیروی محرکه آنها را موتور دیزل با قدرت کافی تأمین می‌کند، استفاده می‌شود زیرا با افزایش یا کاهش دور موتور می‌توان آبدهی چاه را به میزان دلخواه تنظیم کرده و آزمایشهای افت و یا برگشت پله‌ای را به راحتی انجام داد. در صورتی که به جای موتور دیزل از الکتروموتور استفاده شود، به علت آن که تغییر دور الکتروموتور امکان‌پذیر نیست، بنابراین آزمایشهای افت پله‌ای تنها با استفاده از شیر فلکه برای تنظیم آبدهی انجام می‌گیرد.

1- oriffice

معمولاً در چاههایی که تازه حفاری و تکمیل شده‌اند، اعم از بهره‌برداری و یا اکتشافی، آزمایش پمپاژ به وسیله پمپ‌های توربینی شافت و غلافدار مجهز به موتور دیزل انجام می‌شود. زیرا در اینگونه چاهها قبل از انجام آزمایش پمپاژ باید عمل توسعه و شستشو چاه صورت گیرد که مستلزم تغییر دور موتور است. قدرت آبکشی پمپ به تناسب آبدهی آبخوان و ارتفاع رانش تعیین می‌شود. برای این کار از انواع پمپهای با لوله آبده ۶ یا ۸ اینچ و در شرایطی که آبدهی چاه بیش از ۱۰۰ لیتر بر ثانیه برآورد شود از پمپ ۱۰ اینچ استفاده می‌شود.

۳-۲ وسایل اندازه‌گیری

مهمترین قسمت در یک آزمایش پمپاژ، اندازه‌گیریهای تغییرات سطح آب در پیزومترها و چاه پمپاژی و اندازه‌گیری بده چاه است. این اندازه‌گیریها باید به دفعات زیاد و با حداکثر دقت در حین آزمایش انجام شود. زیرا این دو عامل پایه و اساس تمام محاسبات پمپاژ برای به‌دست آوردن ضرایب هیدرودینامیک آبخوان و ضرایب هیدرولیکی چاه هستند. بنابراین برای انجام صحیح و دقیق این اندازه‌گیریها باید پیش‌بینی‌های لازم قبل از شروع پمپاژ به‌عمل آید. لوازم و تجهیزاتی که برای این اندازه‌گیریها مورد نیاز است عبارتند از وسایل اندازه‌گیری آبدهی و وسایل اندازه‌گیری سطح آب.

۳-۲-۱ وسایل اندازه‌گیری آبدهی

برای اندازه‌گیری آبدهی چاه در هنگام آزمایشهای پمپاژ از وسائل مختلفی استفاده می‌شود که مناسب‌ترین آنها "روزنه[1]" است، زیرا علاوه بر دقت کافی در تعیین میزان آبدهی چاه، با مشاهده ارتفاع آب در لوله روزنه و استفاده از جداول استاندارد شده، آبدهی آزمایش (Q) را درهر لحظه می‌توان مشخص کرد. بنابراین نصب روزنه بر روی لوله خروجی پمپهای آزمایشی الزامی است. در صورتی‌که آزمایش پمپاژ به‌طور موردی و با استفاده از موتور پمپ نصب شده بر روی چاه انجام شود، چنانچه روزنه در دسترس نباشد می‌توان از وسایل دیگری مانند خط‌کش جت یا روش حجمی آبدهی چاه را برآورد کرد. اکنون روشهای مختلف اندازه‌گیری آبدهی شرح داده می‌شود.

۳-۲-۱-۱ روش حجمی

بهترین روش اندازه‌گیری آبدهی چاه در صورت امکان، استفاده از شمارنده (کنتور) حجمی مجهز به وسیله اندازه‌گیری آبدهی لحظه‌ای است. ساختمان شمارنده‌ها متفاوت است و اغلب آنها حجم آب عبوری را به طور تجمعی نشان می‌دهد (شبیه کنتور آب منازل). ولی در آزمایشهای پمپاژ اندازه‌گیری مداوم آبدهی لحظه‌ای چاه، در طول آزمایش موردنظر است. بنابراین باید از انواع شمارنده‌هایی که آبدهی لحظه‌ای را نشان می‌دهند استفاده شود. در بعضی موارد این شمارنده‌ها مجهز به دستگاه ثبات هستند که برای کنترل تغییرات آبدهی در طول مدت آزمایش مفید

1- orifice

است. شمارنده باید متناسب با ظرفیت آبدهی چاه انتخاب شود بعلاوه به نحوی روی لوله خروجی پمپ نصب شود که مقدار آبدهی لحظه‌ای را دقیق نشان دهد.

یک روش حجمی ساده دیگر عبارت از اندازه‌گیری زمان لازم برای پرشدن ظرفی با حجم معین (مثلاً بشکه ۲۲۰لیتری) است. سنجش زمان باکرونومتر صورت می‌گیرد. مقدار آبدهی لحظه‌ای (Q) برابر است با :

$$Q = \frac{V}{t}$$

V = حجم ظرف به لیتر

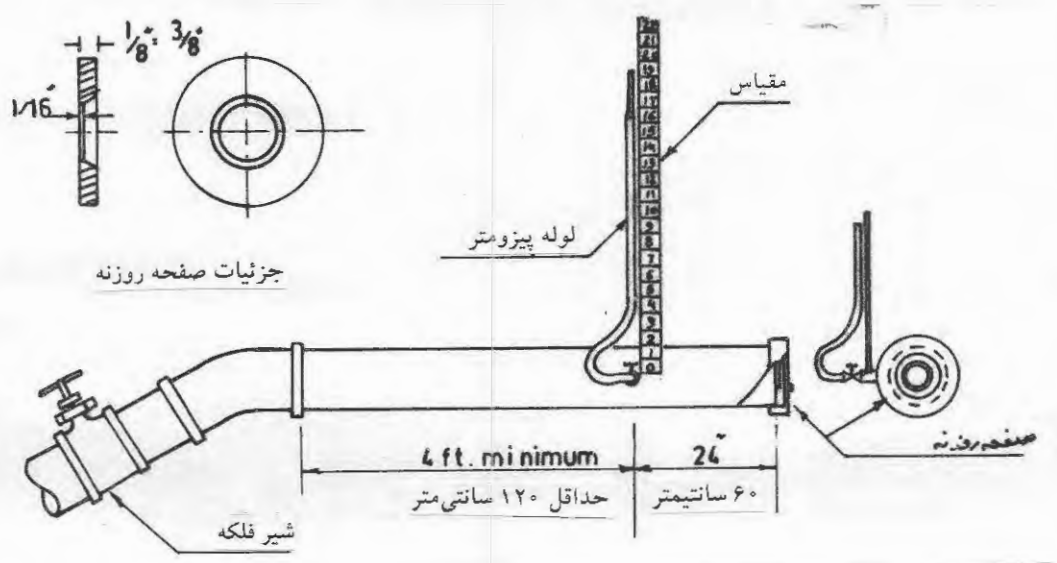
t = زمان پرشدن به ثانیه

Q = آبدهی برحسب لیتر بر ثانیه

این روش برای آبدهی کم، دقت کافی دارد ولی در آبدهی‌های زیاد، خطای اندازه‌گیری نسبتاً زیاد است. در مواردی‌که زمان پرشدن ظرف (معمولاً بشکه ۲۲۰لیتری) از ده ثانیه بیشتر باشد اندازه‌گیری‌ها از دقت کافی برخوردار است.

۳-۲-۱-۲ روزنه

روزنه عبارتست از یک صفحه فلزی مدور با سوراخ گردی در وسط آن که در انتهای لوله تخلیه، به منظور کاهش قطر لوله، نصب می‌شود. یک لوله پیزومتر (لوله پلاستیکی شفاف)، برای اندازه‌گیری فشار، در فاصله معینی (معمولاً ۶۰سانتیمتر) از صفحه روزنه بر روی لوله آبده نصب می‌شود. برای دقت بیشتر در اندازه‌گیری نیز شیر فلکه‌ای به منظور کنترل آب خروجی در مسیر لوله آبده مطابق شکل شماره (۳-۱) قرار داده می‌شود.

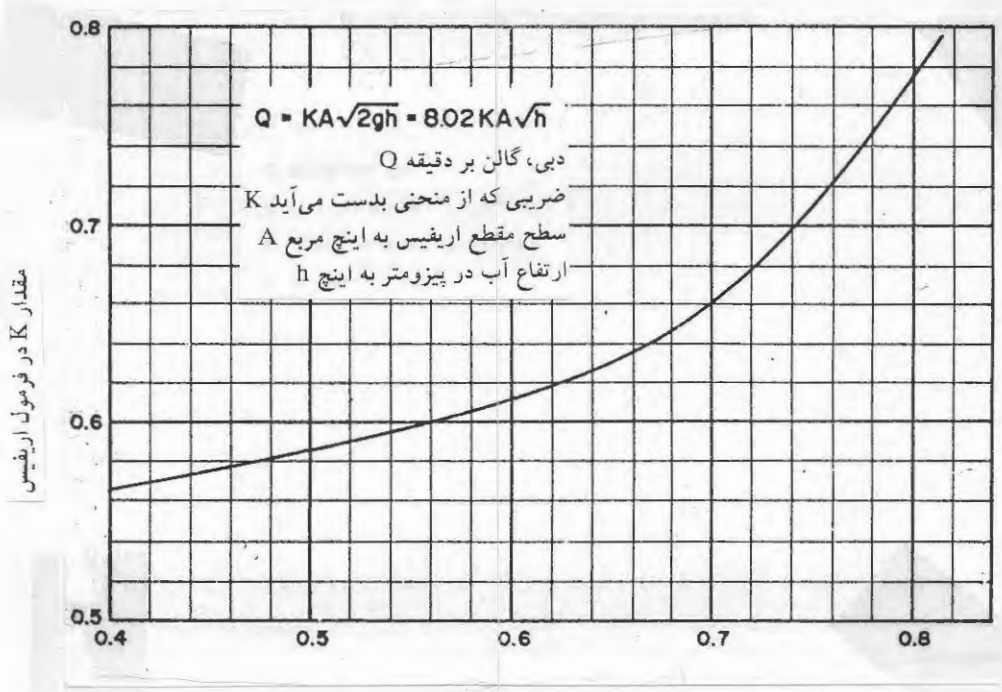


شکل ۳-۱ روزنه و اجزاء لازم دیگر برای اندازه‌گیری آبدهی چاه

بر اثر کاهش قطر لوله آبده و افزایش فشار، آب در لوله پیزومتر بالا می‌آید. مقدار فشار (ارتفاع آب در پیزومتر) با بده‌خروجی (Q) متناسب است. بدین‌ترتیب آبدهی چاه با اندازه‌گیری ارتفاع آب در لوله پلاستیکی و با استفاده از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$Q = KA\sqrt{2gH} = 8.02\ KA\sqrt{H} \qquad (۱-۳)$$

که در آن Q آبدهی چاه برحسب گالن بر دقیقه، A سطح مقطع روزنه برحسب اینچ مربع و H ارتفاع آب در لوله اریفیس برحسب اینچ و g شتاب ثقل زمین برابر ۳۲/۲ فوت بر مجذور ثانیه و K ضریبی است که به نسبت قطر به اریفیس قطر لوله آبده بستگی دارد (شکل ۳-۲). برای دقت بیشتر بهتر است نسبت قطر اریفیس به قطر خارجی لوله آبده از ۰/۷ تجاوز نکند.



شکل ۳-۲ تغییرات مقادیر ضریب K در فرمول اریفیس

نکات زیر هنگام استفاده از اریفیس باید مورد توجه قرار گیرد:

- لوله خروجی باید کاملاً افقی قرار گرفته باشد.
- لوله پلاستیکی (پیزومتر) بایداز هوا، شن، ماسه و گل و لای خالی باشد.

- دهانه صفحه اریفیس باید لب تیز، صاف و بدون زائده باشد و طوری نصب شود که جریان آب مماس بر لبه نازک آن عبور کند.
- هنگام بستن صفحه اریفیس به دهانه لوله تخلیه نباید از محل اتصال آب خارج شود و بهتر است از واشر لاستیکی استفاده شود.
- اندازه‌گیری آبدهی با اریفیس هنگامی صحیح است که آب از اریفیس به‌طور کامل و پرجریان داشته باشد.
- فاصله محل اتصال لوله پیزومتر تا صفحه روزنه باید حداقل سه برابر قطر اریفیس باشد مثلاً هنگام استفاده از اریفیس ۸ اینچ، معمولاً فاصله لوله پیزومتر از اریفیس ۲ فوت است و طول بخش افقی لوله آبده نباید از ۶ فوت کمتر باشد.
- اریفیس مقدار آبدهی را با خطایی حدود ۱/۵ درصد اندازه‌گیری می‌کند.

جداول استاندارد زیادی وجود دارد که به کمک آنها می‌توان با داشتن ارتفاع آب در لوله پلاستیکی و نسبت تبدیل روزنه به لوله آبده، مقدار آبدهی چاه را به دست آورد (جدول ۱ پیوست)

۳-۲-۱-۳ اندازه‌گیری آبدهی براساس پرش آب

با اندازه‌گیری مقدار پرش یا فوران آب در لوله‌های آبده افقی، مایل یا قائم می‌توان به طور غیرمستقیم آبدهی چاه را برآورد کرد. در صورتی که اندازه‌گیری آبدهی با هیچ یک از روشهای یاد شده امکان‌پذیر نباشد، می‌توان از این روش استفاده کرد:

الف - اندازه‌گیری آبدهی در لوله‌های آبده افقی

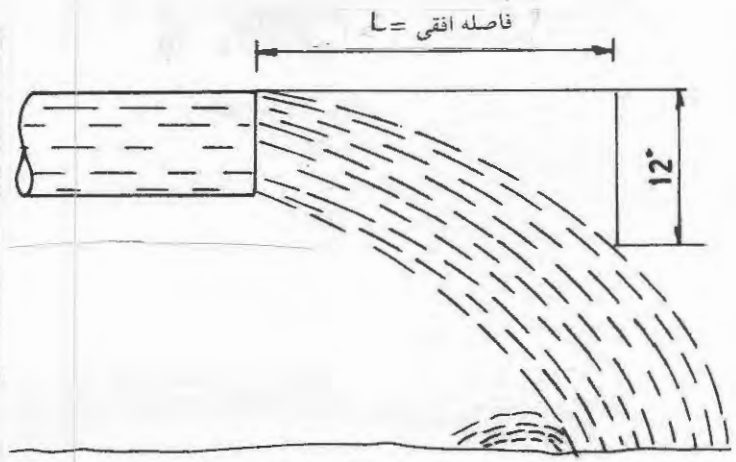
در این طریقه از یک گونیای فلزی یا چوبی استفاده می‌شود که بازوی کوتاه آن به طول ثابت یک فوت (۳۰/۴۸ سانتی‌متر) و بازوی بلند آن معمولاً ۱ تا ۱/۵ متر است. برای اندازه‌گیری آبدهی بازوی بلند را روی لوله آبده افقی قرار داده و آنقدر آن را به جلو و عقب حرکت می‌دهند تا نوک بازوی کوتاه با سطح آبی که از لوله بیرون می‌ریزد مماس شود. (شکل ۳-۳). با اندازه‌گیری فاصله افقی جهش آب (L) و با درنظرگرفتن قطر لوله آبده میزان آبدهی چاه با استفاده از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$Q = K.L.D^2 \qquad (۲-۳)$$

در این رابطه، L طول پرش آب و D قطر لوله آبده است. اگر L برحسب سانتیمتر و D برحسب اینچ باشد با استفاده از ضریب K مطابق جدول ۳-۱ آبدهی برحسب لیتر بر ثانیه به دست می‌آید. (مقدار K برای لوله‌های آبده با قطرهای مختلف کمی متفاوت است).

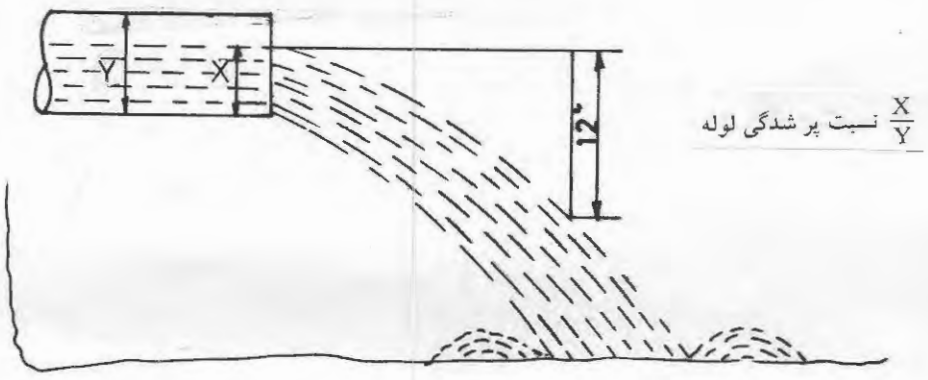
جدول ۳-۱ مقدار ضریب K برای قطرهای مختلف لوله آبده

مقدار ضریب K	قطرلوله آبده(inch)(D)
۰/۰۲۱۲۳۰	۲
۰/۰۲۰۷۰۰	۳
۰/۰۲۰۰۵۵	۴
۰/۰۲۰۲۵۵	۶
۰/۰۱۹۷۴۱	۸
۰/۰۱۹۸۷۴	۱۰
۰/۰۱۹۷۸۶	۱۲



شکل ۳-۳- اندازه‌گیری آبدهی در لوله افقی بطریقه جت

برای محاسبه آبدهی به روش جت در لوله‌های آبده افقی می‌توان از جدول شماره ۲ ضمیمه نیز استفاده کرد.
رابطه (۳-۲) وقتی به کار می‌رود که لوله کاملاً از آب پر باشد. وقتی که لوله آبده نیمه پر باشد مقادیر به دست آمده از این روابط باید در نسبت $\frac{x}{y}$ ضرب شود، که x ارتفاع آب از کف لوله آبده و y قطر لوله آبده است (شکل ۳-۴). البته این محاسبه به شرطی صحیح است که ضلع افقی خط کش جت روی سطح آب در داخل لوله قرار داده شود. درصورتی‌که ضلع افقی گونیا روی لوله قرار داده شود، باید به ضلع قائم گونیا اختلاف y-x نیز اضافه شود.

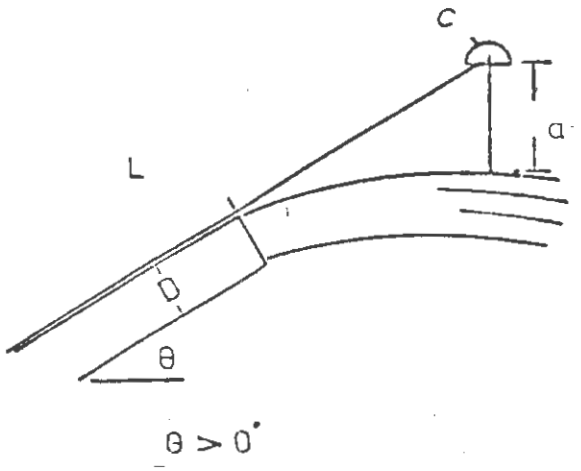


شکل ۳-۴ نحوه اندازه‌گیری دبی با گونیای جت در لوله‌های نیمه پر

ب - اندازه‌گیری آبدهی در لوله‌های مایل (سر بالا)

اگر لوله آبده مایل باشد، با استفاده از خط‌کش مخصوص که زاویه بین بازوهای بلند و کوتاه آن متغیر است، اندازه‌گیری آبدهی بدین‌ترتیب انجام می‌شود که با قرار دادن بازوی بلند در راستای لوله آبده، بازوی کوتاه باید درجهت قائم قرار گیرد (شکل شماره ۳-۵) و طول پرش در این حالت اندازه‌گیری می‌شود. سپس با اندازه‌گیری شیب لوله نسبت به سطح افق و استفاده از نمودار شکل شماره ۳-۶ که رابطه شیب لوله با مقدار a (مقدار تصحیح که به L اضافه می‌شود) و بهره‌گیری از جدول شماره ۳-۲ و رابطه شماره ۳-۳ آبدهی بر حسب لیتر بر ثانیه به‌دست خواهد آمد. در این رابطه k ضریب لوله و L طول پرش تصحیح شده است.

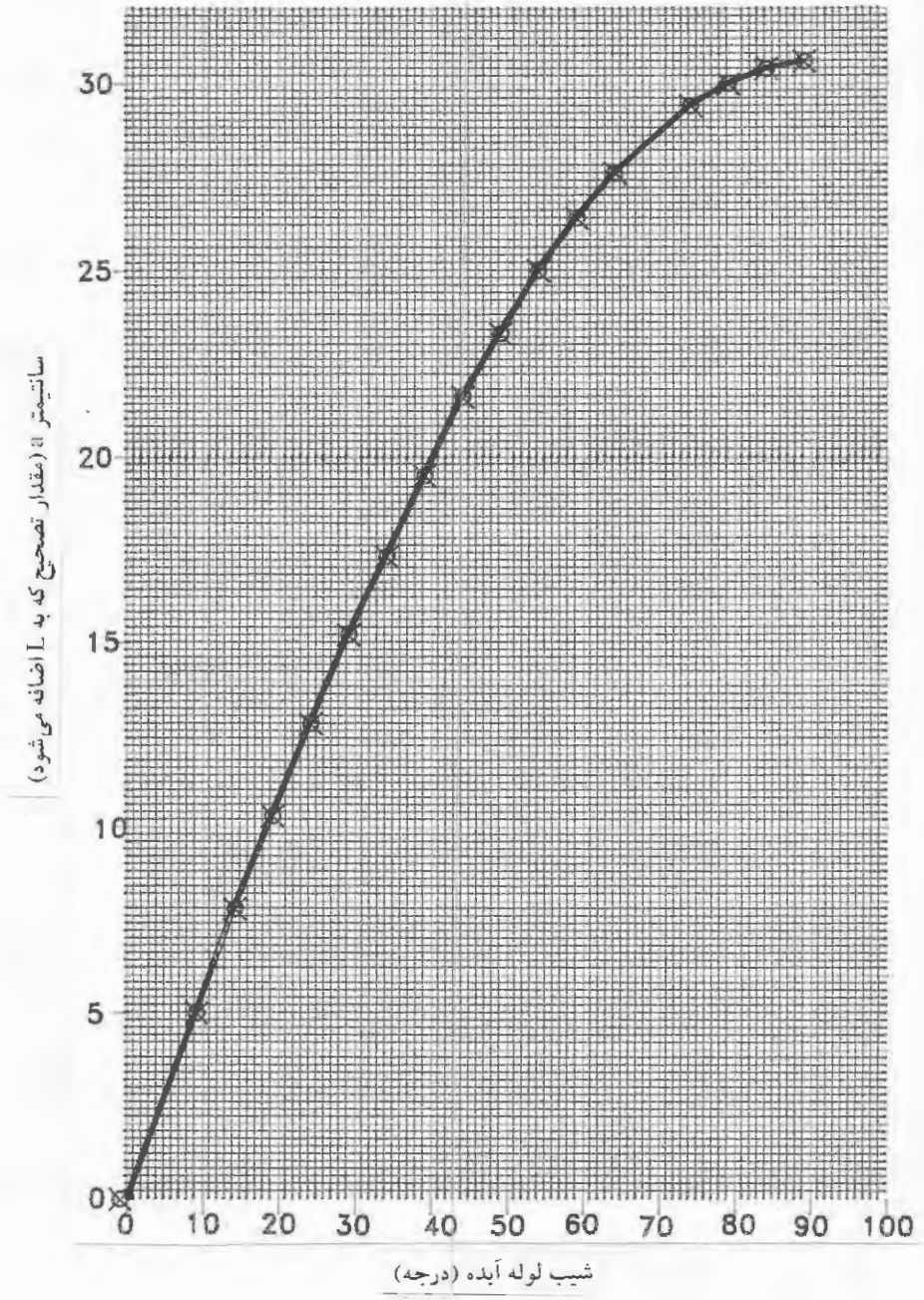
$$Q = 0.02484\ kL \qquad (۳-۳)$$



شکل ۳-۵ نحوه اندازه‌گیری آبدهی در لوله‌های مایل

جدول ۳-۲ ضریب k در لوله‌های مایل

قطر داخلی لوله(اینچ)	k	قطر داخلی لوله	k	قطر داخلی لوله	k	قطر داخلی لوله	k	قطر داخلی لوله	k	قطر داخلی لوله	k
۲	۳/۳	۴	۱۳/۱	۶	۲۹/۴	۸	۵۲/۳	۱۰	۸۱/۷	۱۲	۱۱۶/۰
۲ ۱/۴	۴/۱	۴ ۱/۴	۱۴/۷	۶ ۱/۲	۳۱/۹	۸ ۱/۴	۵۵/۵	۱۰ ۱/۴	۸۵/۹	۱۲ ۱/۲	۱۲۸/۰
۲ ۱/۲	۵/۱	۴ ۱/۲	۱۶/۵	۶ ۱/۲	۳۴/۵	۸ ۱/۲	۵۹/۰	۱۰ ۱/۲	۹۰/۱	۱۳	۱۳۸/۰
۲ ۳/۴	۶/۲	۴ ۳/۴	۱۸/۶	۶ ۳/۴	۳۷/۲	۸ ۳/۴	۶۲/۵	۱۰ ۳/۴	۹۴/۴	۱۳ ۱/۲	۱۴۹/۰
۳	۷/۳	۵	۲۰/۱	۷	۴۰/۰	۹	۶۵/۲	۱۱	۹۸/۹	۱۴	۱۶۰
۳ ۱/۴	۸/۶	۵ ۱/۴	۲۲/۵	۷ ۱/۴	۴۲/۹	۹ ۱/۴	۶۹/۹	۱۱ ۱/۴	۱۰۳/۰	۱۴ ۱/۲	۱۷۲
۳ ۱/۲	۱۰/۰	۵ ۱/۲	۲۴/۷	۷ ۱/۲	۴۵/۴	۹ ۱/۲	۷۳/۷	۱۱ ۱/۲	۱۰۸/۰	۱۵	۱۸۴
۳ ۳/۴	۱۱/۵	۵ ۳/۴	۲۷/۰	۷ ۳/۴	۴۹/۰	۹ ۳/۴	۷۷/۷	۱۱ ۳/۴	۱۱۳/۰	۱۶	۲۰۹



شکل ۳-۶ منحنی برآورد مقدار a در شرایطی که مقدار پرش آب از لوله شیب‌دار با خط کش جت معمولی اندازه‌گیری شده باشد.

مثلاً اگر طول پرش آب $e = ۴۰cm$ باشد و شیب لوله نسبت به سطح افق ۳۰° باشد. مقدار $a = ۱۵cm$ خواهد شد. بنابراین $L = ۴۰ + ۱۵ = ۵۵cm$ است.

ملاحظه می‌شود که با استفاده از رابطه شماره (۳-۳) و جدول شماره (۳-۲) می‌توان آبدهی را در لوله‌های افقی بدون در نظر گرفتن D (قطر لوله) در روابط قبلی نیز محاسبه کرد.

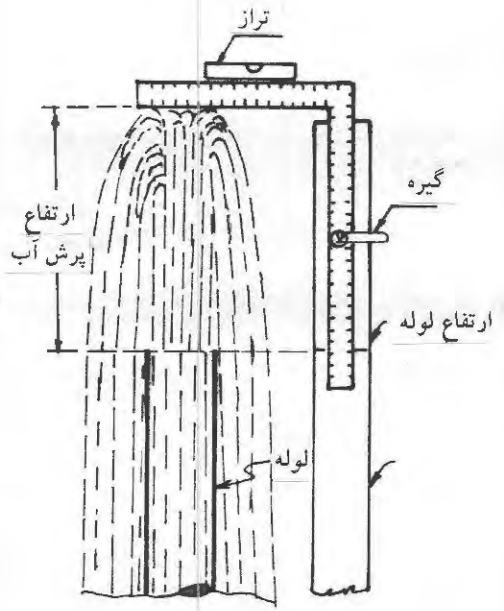
ج - اندازه‌گیری آبدهی در لوله‌های آبده قائم

وقتی که لوله آبده قائم باشد، می‌توان با اندازه‌گیری ارتفاع پرش آب از دهانه لوله نیز آبدهی را اندازه‌گیری کرد. برای این کار بازوی افقی گونیا با سطح آب در حال فوران مماس می‌شود و افقی بودن آن با یک تراز دستی کنترل می‌شود (شکل ۳-۷).

برای اندازه‌گیری مقدار آبدهی لوله‌های قائم، از رابطه زیر استفاده می‌شود :

$$Q = KD^2 \sqrt{h} \qquad (۴-۳)$$

که در آن K ضریب ثابت و برابر ۰/۲۲۲۷، D قطر لوله آبده برحسب اینچ، h ارتفاع جهش قائم آب از لوله برحسب سانتیمتر است و Q برحسب لیتر بر ثانیه به‌دست می‌آید.



شکل شماره ۳-۷ اندازه‌گیری آبدهی در لوله آبده قائم با استفاده از گونیای جت

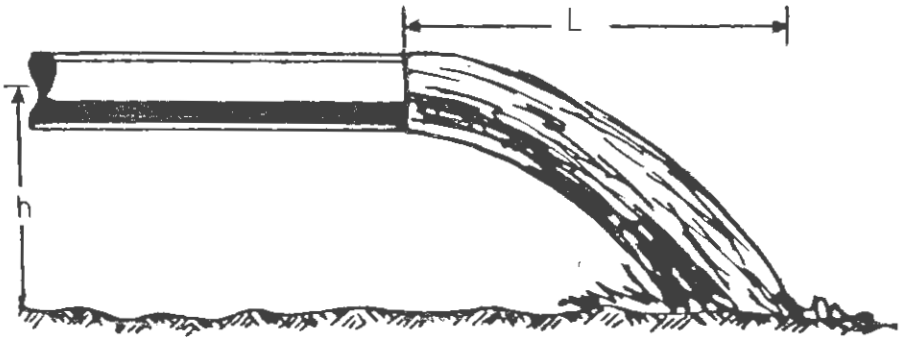
در جدول ۳ ضمیمه مقدار آبدهی در لوله‌های آبده قائم برحسب لیتر بر ثانیه ارائه شده است.

۳-۲-۱-۴ اندازه‌گیری آبدهی براساس رابطه سقوط آزاد اجسام

براساس رابطه سقوط آزاد اجسام نیز می‌توان مقدار آبدهی را برآورد کرد. با توجه به ارتفاع لوله آبده و فاصله افقی جهش آب (شکل ۳-۸) مقدار آبدهی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = A \frac{L}{\sqrt{(h/4.905)}} \qquad (۵-۳)$$

در این رابطه A سطح مقطع لوله آبده به متر مربع، L پرش افقی آب به متر، h فاصله عمودی از محور لوله آبده تا سطح زمین برحسب متر و Q آبدهی برحسب متر مکعب بر ثانیه است.



شکل ۳-۸ اندازه‌گیری آبدهی با توجه به رابطه سقوط آزاد اجسام

۳-۲-۱-۵ روشهای دیگر اندازه‌گیری آبدهی

برای اندازه‌گیری آبدهی در کانالها از روشهای مختلفی می‌توان استفاده کرد که مهمترین آنها عبارتند از :

- اندازه‌گیری آبدهی با استفاده از شناور
- اندازه‌گیری آبدهی به‌طریق سرریزها
- اندازه‌گیری آبدهی به‌طریق پارشال فلوم
- اندازه‌گیری آبدهی به‌طریق جریان‌سنج[1] (مولینه)

در آزمایشهای پمپاژ، اندازه‌گیری آبدهی با شناور از دقت کافی برخوردار نیست، ولی از روشهای دیگر به ویژه پارشال فلوم در شرایط مناسب می‌توان استفاده کرد.

1- Current - meter

از دیگر روشهای جدید اندازه‌گیری آبدهی، که در حال حاضر گران و در دسترس همگان نیست، می‌توان از شمارنده التراسونیک نام برد. این کنتور توسط الکترودهایی بر روی لوله خروجی چاه بسته می‌شود. هنگامی که لوله کاملاً پر باشد، سرعت آبی که از لوله عبور می‌کند مشخص و سپس آبدهی خروجی محاسبه می‌شود.

۳-۲-۲ وسایل اندازه‌گیری عمق سطح آب

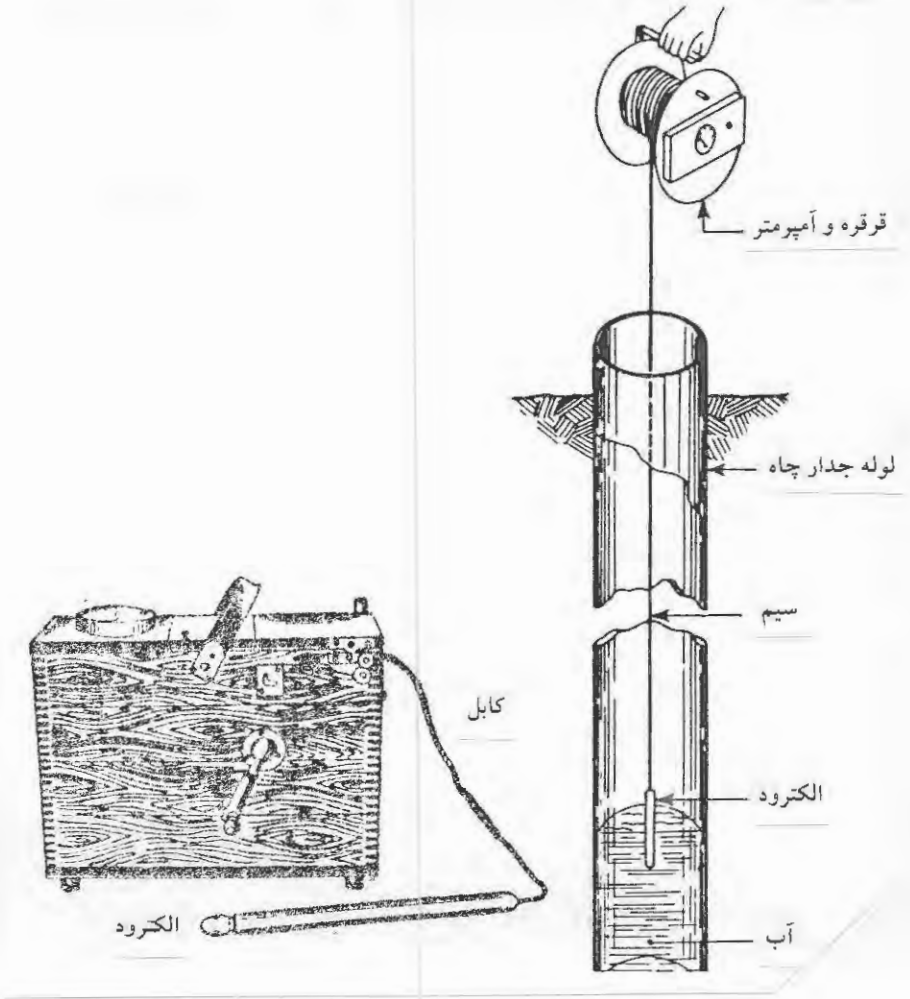
اندازه‌گیری دقیق و سریع عمق سطح آب در چاه اصلی و پیزومترها از ضروریات اساسی در آزمایشهای پمپاژ است. برای اندازه‌گیری عمق آب، وسایل مختلفی وجود دارد که از آن جمله می‌توان عمق‌یابهای الکتریکی و دستگاههای اندازه‌گیری خودکار را نام برد. برای اندازه‌گیری تقریبی عمق سطح آب نیز می‌توان از وسایلی مانند نوار مرطوب و لوله هوا استفاده کرد که به سبب نداشتن دقت کافی چندان کاربردی ندارد.

گرچه برای اندازه‌گیری تغییرات عمق سطح آب در چاه پمپاژی و یا پیزومترهای شعاع تأثیر ممکن است از دستگاههای خودکار و یا ثبات استفاده نمایند، ولی در اغلب موارد مخصوصاً درکشور ما برای انجام این اندازه‌گیریها از عمق‌یاب الکتریکی استفاده می‌شود. بنابراین باید چند دستگاه عمق‌یاب الکتریکی باتوجه به تعداد پیزومترها و با طول سیم کافی متناسب با عمق آب در چاه، بدون نقص فنی و کنترل شده در محل چاه تهیه و آماده شود.

معمولی‌ترین وسیله اندازه‌گیری عمق آب در چاهها در اغلب موارد عمق‌یاب (ژرفاسنج) الکتریکی است. طرز کار این دستگاه ساده است. الکترودی متصل به یک کابل، شامل یک جفت سیم عایق‌دار، به داخل چاه فرستاده می‌شود. وقتی الکترود با سطح آب تماس پیدا کند، جریان برق از سیم عبور می‌کند و یک آمپرمتر، چراغ یا بوق در سرچاه عبور جریان را نشان می‌دهد. باطریهای خشک معمولی نیز جریان را در سیم برقرار می‌سازند. گاهی به جای دو سیم از یک سیم عایق‌دار استفاده و سیم دوم به لوله جدار یا به زمین متصل می‌شود و بنابراین جریان برق از طریق این سیم و لوله جدار (یا زمین) برقرار می‌شود. با برخورد الکترود به سطح آب و بسته‌شدن مدار، عقربه آمپرمتر به حرکت در می‌آید، یا چراغ روشن می‌شود یا بوق به صدا در می‌آید. در این حال طول سیمی را که در داخل چاه است از بالای لوله جدار یا هر نقطه نشانه دیگر باید اندازه‌گیری کرد و به این ترتیب عمق آب را در چاه به دست آورد.

فواصل در طول سیم معمولاً برحسب متر یا نیم‌متر علامت‌گذاری شده است. عمق دقیق سطح آب (در حد سانتی‌متر) با استفاده از متر نواری فولادی از نزدیکترین نقطه علامت‌گذاری شده در روی سیم اندازه‌گیری می‌شود. برای بالابردن دقت اندازه‌گیریها باید در طول آزمایش پمپاژ، الکترود و کابل در چاه آویزان باقی بماند. این کار از هرگونه اشتباه ناشی از پیچ و تاب خوردن سیم براثر بالا کشیدن و پایین دادن مکرر آن، که می‌تواند موجب تغییر جزیی طول آن شود، جلوگیری می‌کند.

معمولاً برای جلوگیری از بروز اشتباه در اندازه‌گیریهای عمق سطح آب در چاههای پمپاژی با نصب لوله‌های فلزی به قطر خارجی $\frac{3}{4}$ اینچ (لوله‌های ترمی) در داخل چاه تا نزدیک توربین اندازه‌گیریهای عمق سطح آب با دقت بیشتری انجام می‌گیرد.



شکل ۳-۹ دو نوع عمق‌یاب الکتریکی

۳-۳ سایر وسایل مورد نیاز

علاوه بر تجهیزات مذکور لوازم دیگری از قبیل کرنومتر، متر نواری، دورسنج، برگه ثبت اندازه‌گیری‌ها (جدول شماره ۳-۳) کاغذهای لگاریتمی و نیمه‌لگاریتمی نیز لازم است. همچنین وجود وسایلی مانند دماسنج، هدایت‌سنج، pHمتر، بطری نمونه‌برداری آب برای ارسال نمونه به آزمایشگاه در حین آزمایش پمپاژ از نظر مطالعه دیگر خصوصیات آبخوان بسیار مفید است.

۳-۴ مسائل و مشکلات

۳-۴-۱ درصورت وجود روغن بر روی‌آب که مانع از اندازه‌گیری سطح آب می‌شود تمهیدات زیر به‌عمل می‌آید:

- با کنترل شیر قطره‌چکان از ریزش روغن اضافی در چاه جلوگیری شود.
- اگر سطح ایستابی نزدیک به سطح زمین باشد (کمتر از ۵ متر) با بستن پارچه کتان در سر میله‌ای و پائین فرستادن میله، روغن جذب پارچه کتان شده و سطح ایستابی قابل اندازه‌گیری خواهد شد (اصولاً وجود روغن در شروع پمپاژ مانع از اندازه‌گیری می‌شود).
- در حالتی که سطح ایستابی در عمق بیش از ۵ متری سطح زمین قرار گرفته باشد با نصب چوب‌پنبه‌ای در انتهای لوله ترمی و پائین بردن آن تا سطح ایستابی، اندازه‌گیری امکان‌پذیر می‌شود.

۳-۴-۲ در صورت توقف پمپاژ به علت نقص فنی موتور و یا قطع برق در حین آزمایش به صورت زیر عمل می‌شود:

اگر از زمان آزمایش حدود ۱ تا ۲ ساعت گذشته باشد آزمایش باید تکرار شود.

چنانچه زمان بیشتری از شروع آزمایش گذشته باشد، زمان و میزان افت در لحظه توقف آزمایش یادداشت می‌شود. پس از رفع نقص فنی و شروع مجدد پمپاژ تا زمان رسیدن به میزان افت قبلی، اندازه‌گیری لحظه‌ای ضرورت ندارد. پس از آن اندازه‌گیری افت سطح آب به صورت لحظه‌ای تا رسیدن به سطح دینامیک ادامه می‌یابد.

۳-۴-۳ تأثیرات جزر و مد : با اندازه‌گیری سطح ایستابی در چند روز قبل از شروع آزمایش تأثیرات جزر و مد که به‌صورت افت و خیز بر سطح آب تأثیر می‌گذارد و یادداشت مقدار آن، افت‌های اندازه‌گیری شده تصحیح می‌شود و سپس افت‌های تصحیح شده برای تجزیه و تحلیل بکار گرفته خواهد شد.

۳-۴-۴ نکات زیر هنگام استفاده از عمق‌یابهای الکتریکی باید مورد توجه قرار گیرد :

- برای اندازه‌گیری عمق سطح آب سعی شود از ابتدا تا خاتمه آزمایش از یک دستگاه عمق‌یاب استفاده شود تا از بروز خطاهای احتمالی جلوگیری به عمل آید.
- قبل از شروع اندازه‌گیریها باید از سالم بودن دستگاه عمق‌یاب اطمینان حاصل کرد
- در چاههای پمپاژی بدون لوله ترمی باید عمق‌یاب به آرامی داخل چاه شود، به ویژه در چاههایی که عمق سطح آب زیاد است، سریع فرستادن عمق‌یاب موجب پیچیدن سیم به دور لوله آبده پمپ خواهد شد
- در چاههای پمپاژی بهتر است طول وزنه‌های الکترود از ۵ سانتی‌متر بیشتر نباشد
- در مواردی که الکترود به مانعی در چاه برخورد کند وزن سیم داخل چاه نسبت به طول آن کمتر احساس می‌شود
- در مواقعی که سیم عمق‌یاب در داخل چاه گیر کند. باید با دقت و بدون کشیدن زیاد با تکان دادن ملایم سیم آن را آزاد کرد، در این حالت کلاچ زدن لحظه‌ای موتور در آزاد کردن سیم مؤثر است.

جدول شماره ....

برگ آزمایش پمپاژ

پروژه : ..... **تعداد پیزومتر :** ..... **عمق چاه :** .....

نام محل : ..... **موقعیت پیزومتر :** ..... **ارتفاع محل :** .....

نام مالک : ..... **فاصله پیزومتر از چاه :** ..... **نقطه نشانه اندازه‌گیری :** .....

شماره چاه (U.T.M) : ..... **نوع آزمایش :** ..... **عمق سطح استاتیک :** .....

زمان			عمق سطح آب (m)	افت s (m)	روش اندازه‌گیری :		آبدهی Q (lit/s)	افت تصحیح شده s_c (m)	$\frac{r^2}{t}$ مترمربع (m^2/min)	افت باقیمانده s' (m)	$\frac{t}{t'}$	ملاحظات نسبت تبدیل روزنه دور پمپ و ...
تاریخ	ساعت (hr)	دقیقه (min)			ارتفاع (in)	طول پرش (cm)						

نام آزمایش کننده : .....

۴- تحلیل نتایج آزمایشهای پمپاژ:

خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوانها که عمدتاً ضریب قابلیت انتقال و ضریب ذخیره هستند، از طریق ارزیابی نتایج آزمایشهای پمپاژ به‌دست می‌آیند. این آزمایشها به دو صورت آزمایش افت و آزمایش برگشت (جبران) انجام می‌شوند. در آزمایش افت، آبخوان با آبدهی ثابت آبکشی شده و در آزمایش برگشت با خاموش کردن پمپ بالا آمدن سطح آب در چاه اندازه‌گیری می‌شود. تغییرات سطح آب در آبخوان به صورت مخروط افت و یا بالاآمدگی تظاهر می‌کند. این مخروطها هم‌شکل و مشابه بوده و گسترش جانبی آنها در طول زمان و از لحظه شروع آزمایش، به حجم آب تخلیه شده و یا افزوده شده و همچنین به اختصاصات هیدرولیکی آبخوان بستگی دارد. لذا تحلیل نتایج اندازه‌گیریهای مستمر تغییرات سطح آب، اختصاصات هیدرودینامیکی آبخوان را به‌دست خواهد داد.

برای تحلیل نتایج به‌دست آمده از آزمایشها دو روش عمومی در تعیین اختصاصات هیدرودینامیکی آبخوان وجود دارد، اول روش تحلیل به‌وسیله معادلات جریان ماندگار که ضریب قابلیت انتقال و نفوذپذیری آبخوان محاسبه می‌شود و دوم روش تحلیل توسط معادلات جریان غیرماندگار که افزون بر عوامل جریان ماندگار، ضریب ذخیره و شرایط مرزی آبخوان را نیز می‌توان به‌دست آورد.

۴-۱ معادلات جریان ماندگار[1]

این معادلات توسط تیم - فورش هایمر[2] ارائه و بر مبنای فرضیات ذیل بنا نهاده شده است:

- آبخوان در تمامی ضخامت همگن، همسان و دارای ضخامت یکنواخت است و به‌طور نامحدود گسترش دارد.
- چاه در تمام ضخامت آبخوان حفر شده و از تمامی آن آب دریافت می‌کند.
- آزمایش با آبدهی ثابت انجام می‌شود.
- ضریب قابلیت انتقال آبخوان نسبت به زمان و مکان ثابت است.
- جریان به طرف چاه افقی، شعاعی و آرام است.

در این آزمایش اندازه‌گیری افت سطح آب حداقل در دو پیزومتر که در نزدیکی چاه اصلی قرار گرفته‌اند، در طول دوره آزمایش و در فواصل زمانی معین تا ثابت شدن سطح آب ادامه می‌یابد.
برای تعیین مقدار نفوذپذیری (K) و ضریب قابلیت انتقال (T) از معادلات ذیل استفاده می‌شود:

- در آبخوان محصور:

$$K = \frac{Q\ln(r_2/r_1)}{2\pi M(s_1 - s_2)} \qquad (۴-۱)$$

1- steady state equations

2- Theim - Forchheimer

$$T = \frac{Q\ln(r_2/r_1)}{2\pi(s_1 - s_2)} \qquad (۲-۴)$$

که در آنها :

ln = لگاریتم طبیعی = ۲/۳ × لگاریتم اعشاری

K = هدایت هیدرولیکی یا هدایت هیدرولیکی آبخوان، $(\frac{L}{T})$

Q = آبدهی چاه مورد آزمایش، $(\frac{L^3}{T})$

M = ضخامت بخش اشباع آبخوان، (L)

T = KM = ضریب قابلیت انتقال ، $(\frac{L^2}{T})$

$r_n, \ldots, r_2, r_1$ = فواصل افقی چاههای پیزومتر از چاه اصلی، (L)

$s_n, \ldots, s_2, s_1$ = افت در چاههای پیزومتر در فواصل $r_n, \ldots, r_2, r_1$ از چاه اصلی، (L)

با استفاده از معادلات فوق مقادیر K و T را می‌توان با به‌کارگیری افت (s) و در یک زمان معین در دو چاه پیزومتر یا بیشتر که در فواصل مختلف نسبت به چاه اصلی قرار گرفته‌اند، محاسبه کرد.

مثال :

اطلاعات ذیل مربوط به یک آزمایش پمپاژ با دو پیزومتر است :

ضخامت بخش اشباع آبخوان (متر) M = ۱۰۰

مترمکعب بر روز ۸۶۴۰ ⇐ لیتر بر ثانیه Q = ۱۰۰

فواصل پیزومترها ۱۰۰ و ۲۰۰ متر و افت‌های اندازه‌گیری شده در زمانی که سطح آب در پیزومترها ثابت شده به ترتیب برابر ۵ و ۴ متر است.

حل :

$$T = \frac{۸۶۴۰ \times \ln(۲۰۰/۱۰۰)}{۲\pi \times (۵-۴)} = ۹۵۳$$ مترمربع بر روز

در آبخوانهای آزاد که افت‌ها کمتر از ده درصد ضخامت آبخوان باشد، می‌توان برای تعیین مقدار نفوذپذیری (K) و ضریب قابلیت انتقال (T) از معادلات ذیل استفاده کرد.

$$K = \frac{Q\ln(r_2/r_1)}{\pi(h^2_2 - h^2_1)} \qquad (۳-۴)$$

$$T = \frac{QM\ln(r_2/r_1)}{\pi(h^2_2 - h^2_1)} \qquad (۴-۴)$$

که در آنها :

$h_1, h_2, \ldots, h_n$ = ارتفاع سطح ایستابی آبخوان نسبت به سطح مبنا در فواصل $r_1, r_2, \ldots, r_n$ از چاه مورد آزمایش، (L) است.

توضیح دیگر نمادهای به‌کار رفته در بالا آمده است.

افت‌های بیش از ده درصد ضخامت آبخوان، مناسب برای تحلیل نبوده و محاسبات ضریب قابلیت انتقال و نفوذپذیری به‌دست آمده قابل قبول نیست.

۲-۴ معادلات جریانهای غیرماندگار[1]:

این معادلات برای تحلیل خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوانهائی که آزمایشهای آنها با زمان در تغییر است، به‌کار می‌رود. فرضیاتی که این معادلات براساس آنها بنا نهاده شده عبارتند از :

- چاه با آبدهی ثابت پمپاژ شود.
- آبخوان محصور، افقی، همگن، ایزوتروپ و دارای ضخامت یکنواخت است و به‌طور نامحدود در ناحیه گسترش دارد.
- قطر چاه مورد آزمایش ناچیز است. چاه در تمامی ضخامت آبخوان حفر شده است.
- جریان به طرف چاه، شعاعی، افقی و آرام است.
- آب خارج شده، بلافاصله از ذخیره آبخوان در محدوده تحت تأثیر پمپاژ بیرون آمده و موجب افت بار فشار در آبخوان می‌شود.
- ضریب قابلیت انتقال و ضریب ذخیره آبخوان در زمان و مکان ثابت است.

معادلات شرایط غیرماندگار یا گذرا مستقیماً برای آبخوانهای محصور کاربرد دارد و با محدودیت‌هائی می‌توان از این معادلات در آبخوانهای نامحصور استفاده کرد. این محدودیت‌ها مربوط به درصد افت‌های اندازه‌گیری شده در چاههای پیزومتر در مقابل کل ضخامت آبخوان است. چنانچه افت اندازه‌گیری شده بیش از ۲۵ درصد مجموع ضخامت آبخوان نامحصور باشد، نمی‌توان از معادلات جریانهای غیرماندگار استفاده کرد. اما چنانچه افت اندازه‌گیری شده کمتر از ۱۰ درصد مجموع ضخامت آبخوان باشد، خطای ناچیز و قابل چشم‌پوشی در محاسبات به‌وجود می‌آورد. در شرایطی که افت اندازه‌گیری شده بین ۱۰ تا ۲۵ درصد مجموع ضخامت آبخوان نامحصور باشد با تصحیح افت اندازه‌گیری شده که توسط ژاکوب به صورت رابطه ذیل ارائه شده، این معادلات برای تحلیل آزمایش کاربرد دارد.

1- unsteady state equations

$$s = s' - \frac{s^2}{2M} \qquad (۵-۴)$$

که در آن :

s = افت اندازه‌گیری شده در پیزومترها (متر)

M = ضخامت بخش اشباع آبخوان قبل از آزمایش (متر)

s' = افت تصحیح شده (متر)

معادله جریان غیرماندگار کاربرد گسترده‌ای داشته و توسط تیس [1] ارائه شده که عبارتست از :

$$s = \frac{Q}{4\pi T}\int_{u}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u}\,du$$

معادله بالا را می‌توان با سری نامحدود جایگزین کرد. در نتیجه معادله تیس به صورت زیر در می‌آید:

$$s = \frac{Q}{4\pi T}\left[-0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2\times 2!} + \frac{u^3}{3\times 3!} + \frac{u^4}{4\times 4!} + \ldots\right] \qquad (۶-۴)$$

که در آن :

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \qquad (۷-۴)$$

و

s = افت در پیزومتر (متر)

Q = آبدهی ثابت چاه (مترمکعب بر روز)

T = قابلیت انتقال آبخوان (مترمربع بر روز)

r = فاصله پیزومتر از چاه اصلی (متر)

S = ضریب ذخیره آبخوان

t = زمان از شروع پمپاژ (روز)

عبارت داخل کروشه در (معادله ۴-۶) را "تابع چاه [2]" می‌خوانند و با نماد W(u) نشان می‌دهند. به این ترتیب (معادله ۴-۶) را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد :

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \qquad (۸-۴)$$

1- Theis

2- well function

گرچه برآورد مقادیر $W(u)$ از طریق محاسبه مشکل نیست، ولی معمولاً تغییرات آن را برحسب مقادیر مختلف u به صورت جدول نمایش می‌دهند (جدول ۴-۱)

معادله عدم تعادل تیس (معادله ۴-۶)، امکان محاسبه ضرایب T و S را به وسیله آزمایش پمپاژ با آبدهی ثابت (Q) و اندازه‌گیری تغییرات افت سطح آب (s) نسبت به زمان (t) در پیزومتر یا پیزومترهایی که به فاصله r از چاه اصلی قرار گرفته‌اند، فراهم می‌کند. این معادله مورد استفاده وسیعی دارد و عموماً به معادله تعادل ترجیح داده می‌شود، چون که می‌توان اولاً مقدار S را نیز محاسبه کرد، ثانیاً با وجود یک پیزومتر نیز انجام آزمایش امکان‌پذیر است (حتی بدون پیزومتر و فقط با آزمایش در چاه اصلی نیز می‌توان فقط T را برآورد کرد)، ثالثاً در زمان کوتاه‌تری می‌توان آزمایش پمپاژ را انجام داده و نیازی به ادامه پمپاژ تا رسیدن به حالت ماندگار نیست.

۴-۲-۱ راه‌حل ترسیمی تیس برای محاسبه T و S

برای پیداکردن T و S (معادلات ۴-۶ و ۴-۸) را به صورت زیر بازنویسی می‌کنیم :

$$T = \frac{Q}{4\pi s} W(u) \qquad (۴-۹)$$

$$S = \frac{4Tu}{r^2/t} \qquad (۴-۱۰)$$

از آنجاکه u و $W(u)$ خود تابعی از T و S هستند. بنابراین روابط فوق را نمی‌توان مستقیماً حل کرد. تیس راه‌حلی ترسیمی برای برآورد T و S ارائه داده است.

پس از انجام آزمایش پمپاژ با آبدهی ثابت در فاصله‌ای از زمان (مثلاً یک روز)، مقادیر افت در یک یا چند پیزومتر اطراف چاه اصلی، و احتمالاً در خود چاه، نسبت به زمان اندازه‌گیری می‌شود. فواصل زمانی اندازه‌گیری به صورتی است که در مباحث قبل بدان اشاره شد. نتایج آزمایش به صورت جداولی که تغییرات افت را نسبت به زمان نشان می‌دهد در سر چاه تهیه می‌شود (جدول شماره ۴-۲). آنگاه با داشتن داده‌های آزمایش پمپاژ به صورت زیر عمل می‌کنیم :

اولین قدم، تهیه منحنی تغییرات $W(u)$ نسبت به u در روی محورهای مختصات لگاریتمی است. این منحنی را می‌توان به صورت دستی با استفاده از (جدول ۴-۱)، یا داشتن نرم افزار لازم با استفاده از برنامه کامپیوتری رسم کرد. این منحنی را اصطلاحاً منحنی نمونه تیس (شکل ۴-۱) می‌نامند. منحنی نمونه تیس معمولاً از قبل بر روی کاغذ شفاف رسم شده است. می‌توان به جای منحنی فوق منحنی تغییرات $W(u)$ نسبت به $\frac{1}{u}$ را رسم کرد که به آن منحنی نمونه معکوس تیس می‌گویند.

جدول ۴-۱ مقادیر W(u) بر حسب (u)

N \ u	$N\times10^{-15}$	$N\times10^{-14}$	$N\times10^{-13}$	$N\times10^{-12}$	$N\times10^{-11}$	$N\times10^{-10}$	$N\times10^{-9}$	$N\times10^{-8}$	$N\times10^{-7}$	$N\times10^{-6}$	$N\times10^{-5}$	$N\times10^{-4}$	$N\times10^{-3}$	$N\times10^{-2}$	$N\times10^{-1}$	N
1.0	33.9616	31.6590	29.3564	27.0538	24.7512	22.4486	20.1460	17.8435	15.5409	13.2383	10.9357	8.6332	6.3315	4.0379	1.8229	0.2194
1.1	33.8662	31.5637	29.2611	26.9585	24.6559	22.3533	20.0507	17.7482	15.4456	13.1430	10.8404	8.5379	6.2363	3.9436	1.7371	.1860
1.2	33.7792	31.4767	29.1741	26.8715	24.5689	22.2663	19.9637	17.6611	15.3586	13.0560	10.7534	8.4509	6.1494	3.8576	1.6595	.1584
1.3	33.6992	31.3966	29.0940	26.7914	24.4889	22.1863	19.8837	17.5811	15.2785	12.9759	10.6734	8.3709	6.0695	3.7785	1.5889	.1355
1.4	33.6251	31.3225	29.0199	26.7173	24.4147	22.1122	19.8096	17.5070	15.2044	12.9018	10.5993	8.2968	5.9955	3.7054	1.5241	.1162
1.5	33.5561	31.2535	28.9509	26.6483	24.3458	22.0432	19.7406	17.4380	15.1354	12.8328	10.5303	8.2278	5.9266	3.6374	1.4645	.1000
1.6	33.4916	31.1890	28.8864	26.5838	24.2812	21.9786	19.6760	17.3735	15.0709	12.7683	10.4657	8.1634	5.8621	3.5739	1.4092	.08631
1.7	33.4309	31.1283	28.8258	26.5232	24.2206	21.9180	19.6154	17.3128	15.0103	12.7077	10.4051	8.1027	5.8016	3.5143	1.3578	.07465
1.8	33.3738	31.0712	28.7686	26.4660	24.1634	21.8608	19.5583	17.2557	14.9531	12.6505	10.3479	8.0455	5.7446	3.4581	1.3089	.06471
1.9	33.3197	31.0171	28.7145	26.4119	24.1094	21.8068	19.5042	17.2016	14.8990	12.5964	10.2939	7.9915	5.6906	3.4050	1.2649	.05620
2.0	33.2684	30.9658	28.6632	26.3607	24.0581	21.7555	19.4529	17.1503	14.8477	12.5451	10.2426	7.9402	5.6394	3.3547	1.2227	.04890
2.1	33.2196	30.9170	28.6145	26.3119	24.0093	21.7067	19.4041	17.1015	14.7989	12.4964	10.1938	7.8914	5.5907	3.3069	1.1829	.04261
2.2	33.1731	30.8705	28.5679	26.2653	23.9628	21.6602	19.3576	17.0550	14.7524	12.4498	10.1473	7.8449	5.5443	3.2614	1.1454	.03719
2.3	33.1286	30.8261	28.5235	26.2209	23.9183	21.6157	19.3131	17.0106	14.7080	12.4054	10.1028	7.8004	5.4999	3.2179	1.1099	.03250
2.4	33.0861	30.7835	28.4809	26.1783	23.8758	21.5732	19.2706	16.9680	14.6654	12.3628	10.0603	7.7579	5.4575	3.1763	1.0762	.02844
2.5	33.0453	30.7427	28.4401	26.1375	23.8349	21.5323	19.2298	16.9272	14.6246	12.3220	10.0194	7.7172	5.4167	3.1365	1.0443	.02491
2.6	33.0060	30.7035	28.4009	26.0983	23.7957	21.4931	19.1905	16.8880	14.5854	12.2828	9.9802	7.6779	5.3776	3.0983	1.0139	.02185
2.7	32.9683	30.6657	28.3631	26.0606	23.7580	21.4554	19.1528	16.8502	14.5476	12.2450	9.9425	7.6401	5.3400	3.0615	.9849	.01918
2.8	32.9319	30.6294	28.3268	26.0242	23.7216	21.4190	19.1164	16.8138	14.5113	12.2087	9.9061	7.6038	5.3037	3.0261	.9573	.01686
2.9	32.8968	30.5943	28.2917	25.9891	23.6865	21.3839	19.0813	16.7788	14.4762	12.1736	9.8710	7.5687	5.2687	2.9920	.9309	.01482
3.0	32.8629	30.5604	28.2578	25.9552	23.6526	21.3500	19.0474	16.7449	14.4423	12.1397	9.8371	7.5348	5.2349	2.9591	.9057	.01305
3.1	32.8302	30.5276	28.2250	25.9224	23.6198	21.3172	19.0146	16.7121	14.4095	12.1069	9.8043	7.5020	5.2022	2.9273	.8815	.01149
3.2	32.7984	30.4958	28.1932	25.8907	23.5880	21.2855	18.9829	16.6803	14.3777	12.0751	9.7726	7.4703	5.1706	2.8965	.8583	.01013
3.3	32.7676	30.4651	28.1625	25.8599	23.5573	21.2547	18.9521	16.6495	14.3470	12.0444	9.7418	7.4395	5.1399	2.8668	.8361	.008939
3.4	32.7378	30.4352	28.1326	25.8300	23.5274	21.2249	18.9223	16.6197	14.3171	12.0145	9.7120	7.4097	5.1102	2.8379	.8147	.007891
3.5	32.7088	30.4062	28.1036	25.8010	23.4985	21.1959	18.8933	16.5907	14.2881	11.9855	9.6830	7.3807	5.0813	2.8099	.7942	.006070
3.6	32.6806	30.3780	28.0755	25.7729	23.4703	21.1677	18.8651	16.5625	14.2599	11.9574	9.6548	7.3526	5.0532	2.7827	.7745	.006160
3.7	32.6532	30.3506	28.0481	25.7455	23.4429	21.1403	18.8377	16.5351	14.2325	11.9300	9.6274	7.3252	5.0259	2.7563	.7554	.005448
3.8	32.6266	30.3240	28.0214	25.7188	23.4162	21.1136	18.8110	16.5085	14.2059	11.9033	9.6007	7.2985	4.9993	2.7306	.7371	.004820
3.9	32.6006	30.2980	27.9954	25.6928	23.3902	21.0877	18.7851	16.4825	14.1799	11.8773	9.5748	7.2725	4.9735	2.7056	.7194	.004267
4.0	32.5753	30.2727	27.9701	25.6675	23.3649	21.0623	18.7598	16.4572	14.1546	11.8520	9.5495	7.2472	4.9482	2.6813	.7024	.003779
4.1	32.5506	30.2480	27.9454	25.6428	23.3402	21.0376	18.7351	16.4325	14.1299	11.8273	9.5248	7.2225	4.9236	2.6576	.6859	.003349
4.2	32.5265	30.2239	27.9213	25.6187	23.3161	21.0136	18.7110	16.4084	14.1058	11.8032	9.5007	7.1985	4.8997	2.6344	.6700	.002969
4.3	32.5029	30.2004	27.8978	25.5952	23.2926	20.9900	18.6874	16.3884	14.0823	11.7797	9.4771	7.1749	4.8762	2.6119	.6546	.002633
4.4	32.4800	30.1774	27.8748	25.5722	23.2696	20.9670	18.6644	16.3619	14.0593	11.7567	9.4541	7.1520	4.8533	2.5899	.6397	.002336
4.5	32.4575	30.1549	27.8523	25.5497	23.2471	20.9446	18.6420	16.3394	14.0368	11.7342	9.4317	7.1295	4.8310	2.5684	.6253	.002073
4.6	32.4355	30.1329	27.8303	25.5277	23.2252	20.9226	18.6200	16.3174	14.0148	11.7122	9.4097	7.1075	4.8091	2.5474	.6114	.001841
4.7	32.4140	30.1114	27.8088	25.5062	23.2037	20.9011	18.5985	16.2959	13.9933	11.6907	9.3882	7.0860	4.7877	2.5268	.5979	.001635
4.8	32.3929	30.0904	27.7878	25.4852	23.1826	20.8800	18.5774	16.2748	13.9723	11.6697	9.3671	7.0650	4.7667	2.5068	.5848	.001453
4.9	32.3723	30.0697	27.7672	25.4646	23.1620	20.8594	18.5568	16.2542	13.9516	11.6491	9.3465	7.0444	4.7462	2.4871	.5721	.001291

ادامه جدول ۴-۱ مقادیر W(u) بر حسب (u)

5.0	32.3521	30.0495	27.7470	25.4444	23.1418	20.8392	18.5366	16.2340	13.9314	11.6289	9.3263	7.0242	4.7261	2.4679	.5598
5.1	32.3323	30.0297	27.7271	25.4246	23.1220	20.8194	18.5168	16.2142	13.9116	11.6091	9.3065	7.0044	4.7064	2.4491	.5478
5.2	32.3129	30.0103	27.7077	25.4051	23.1026	20.8000	18.4974	16.1948	13.8922	11.5896	9.2871	6.9850	4.6871	2.4306	.5362
5.3	32.2939	29.9913	27.6887	25.3861	23.0835	20.7809	18.4783	16.1758	13.8732	11.5706	9.2681	6.9659	4.6681	2.4126	.5250
5.4	32.2752	29.9726	27.6700	25.3674	23.0648	20.7622	18.4596	16.1571	13.8545	11.5519	9.2494	6.9473	4.6495	2.3948	.5140
5.5	32.2568	29.9542	27.6516	25.3491	23.0465	20.7439	18.4413	16.1387	13.8361	11.5336	9.2310	6.9289	4.6313	2.3775	.5034
5.6	32.2388	29.9362	27.6336	25.3310	23.0285	20.7259	18.4233	16.1207	13.8181	11.5155	9.2130	6.9109	4.6134	2.3604	.4930
5.7	32.2211	29.9185	27.6159	25.3133	23.0108	20.7082	18.4056	16.1030	13.8004	11.4978	9.1953	6.8932	4.5958	2.3437	.4830
5.8	32.2037	29.9011	27.5985	25.2959	22.9934	20.6908	18.3882	16.0856	13.7830	11.4804	9.1779	6.8758	4.5785	2.3273	.4732
5.9	32.1866	29.8840	27.5814	25.2789	22.9763	20.6737	18.3711	16.0685	13.7659	11.4633	9.1608	6.8588	4.5615	2.3111	.4637
6.0	32.1698	29.8672	27.5646	25.2620	22.9595	20.6569	18.3543	16.0517	13.7491	11.4465	9.1440	6.8420	4.5448	2.2953	.4544
6.1	32.1533	29.8507	27.5481	25.2455	22.9429	20.6403	18.3378	16.0352	13.7326	11.4300	9.1275	6.8254	4.5283	2.2797	.4454
6.2	32.1370	29.8344	27.5318	25.2293	22.9267	20.6241	18.3215	16.0189	13.7163	11.4138	9.1112	6.8092	4.5122	2.2645	.4366
6.3	32.1210	29.8184	27.5158	25.2133	22.9107	20.6081	18.3055	16.0029	13.7003	11.3978	9.0952	6.7932	4.4963	2.2494	.4280
6.4	32.1053	29.8027	27.5001	25.1975	22.8949	20.5923	18.2898	15.9872	13.6846	11.3820	9.0795	6.7775	4.4806	2.2346	.4197
6.5	32.0898	29.7872	27.4846	25.1820	22.8794	20.5768	18.2742	15.9717	13.6691	11.3665	9.0640	6.7620	4.4652	2.2201	.4115
6.6	32.0745	29.7719	27.4693	25.1667	22.8641	20.5616	18.2590	15.9564	13.6538	11.3512	9.0487	6.7467	4.4501	2.2058	.4036
6.7	32.0595	29.7569	27.4543	25.1517	22.8491	20.5465	18.2439	15.9414	13.6388	11.3362	9.0337	6.7317	4.4351	2.1917	.3959
6.8	32.0446	29.7421	27.4395	25.1369	22.8343	20.5317	18.2291	15.9265	13.6240	11.3214	9.0189	6.7169	4.4204	2.1779	.3883
6.9	32.0300	29.7275	27.4249	25.1223	22.8197	20.5171	18.2145	15.9119	13.6094	11.3608	9.0043	6.7023	4.4059	2.1643	.3810
7.0	32.0156	29.7131	27.4105	25.1079	22.8053	20.5027	18.2001	15.8976	13.5950	11.2924	8.9899	6.6879	4.3916	2.1508	.3738
7.1	32.0015	29.6989	27.3963	25.0937	22.7911	20.4885	18.1860	15.8834	13.5808	11.2782	8.9757	6.6737	4.3775	2.1376	.3668
7.2	31.9875	29.6849	27.3823	25.0797	22.7771	20.4746	18.1720	15.8694	13.5668	11.2642	8.9617	6.6598	4.3636	2.1246	.3599
7.3	31.9737	29.6711	27.3685	25.0659	22.7633	20.4608	18.1582	15.8556	13.5530	11.2504	8.9479	6.6460	4.3500	2.1118	.3532
7.4	31.9601	29.6575	27.3549	25.0523	22.7497	20.4472	18.1446	15.8420	13.5394	11.2368	8.9343	6.6324	4.3364	2.0991	.3467
7.5	31.9467	29.6441	27.3415	25.0389	22.7363	20.4337	18.1311	15.8286	13.5260	11.2234	8.9209	6.6190	4.3231	2.0867	.3403
7.6	31.9334	29.6308	27.3282	25.0257	22.7231	20.4205	18.1179	15.8153	13.5127	11.2102	8.9076	6.6057	4.3100	2.0744	.3341
7.7	31.9203	29.6178	27.3152	25.0126	22.7100	20.4074	18.1048	15.8022	13.4997	11.1971	8.8946	6.5927	4.2970	2.0623	.3280
7.8	31.9074	29.6048	27.3023	24.9997	22.6971	20.3945	18.0919	15.7893	13.4868	11.1842	8.8817	6.5798	4.2842	2.0503	.3221
7.9	31.8947	29.5921	27.2895	24.9869	22.6844	20.3818	18.0792	15.7766	13.4740	11.1714	8.8689	6.5671	4.2716	2.0386	.3163
8.0	31.8821	29.5795	27.2769	24.9744	22.6718	20.3692	18.0666	15.7640	13.4614	11.1589	8.8563	6.5545	4.2591	2.0269	.3106
8.1	31.8697	29.5671	27.2645	24.9619	22.6594	20.3568	18.0542	15.7516	13.4490	11.1464	8.8439	6.5421	4.2468	2.0155	.3050
8.2	31.8574	29.5548	27.2523	24.9497	22.6471	20.3445	18.0419	15.7393	13.4367	11.1342	8.8317	6.5298	4.2346	2.0042	.2996
8.3	31.8453	29.5427	27.2401	24.9375	22.6350	20.3324	18.0298	15.7272	13.4246	11.1220	8.8195	6.5177	4.2226	1.9930	.2943
8.4	31.8333	29.5307	27.2282	24.9256	22.6230	20.3204	18.0178	15.7152	13.4126	11.1101	8.8076	6.5057	4.2107	1.9820	.2891
8.5	31.8215	29.5189	27.2163	24.9137	22.6112	20.3086	18.0060	15.7034	13.4008	11.0982	8.7957	6.4939	4.1990	1.9711	.2840
8.6	31.8098	29.5072	27.2046	24.9020	22.5995	20.2969	17.9943	15.6917	13.3891	11.0865	8.7840	6.4822	4.1874	1.9604	.2790
8.7	31.7982	29.4957	27.1931	24.8905	22.5879	20.2853	17.9827	15.6801	13.3776	11.0750	8.7725	6.4707	4.1759	1.9498	.2742
8.8	31.7868	29.4842	27.1816	24.8790	22.5765	20.2739	17.9713	15.6687	13.3661	11.0635	8.7610	6.4592	4.1646	1.9393	.2694
8.9	31.7755	29.4729	27.1703	24.8678	22.5652	20.2626	17.9600	15.6574	13.3548	11.0523	8.7497	6.4480	4.1534	1.9290	.2647
9.0	31.7643	29.4618	27.1592	24.8566	22.5540	20.2514	17.9488	15.6462	13.3437	11.0411	8.7386	6.4368	4.1423	1.9187	.2602
9.1	31.7533	29.4507	27.1481	24.8455	22.5429	20.2404	17.9378	15.6352	13.3326	11.0300	8.7275	6.4258	4.1313	1.9087	.2557
9.2	31.7424	29.4398	27.1372	24.8346	22.5320	20.2294	17.9268	15.6243	13.3217	11.0191	8.7166	6.4148	4.1205	1.8987	.2513
9.3	31.7315	29.4290	27.1264	24.8238	22.5212	20.2186	17.9160	15.6135	13.3109	11.0083	8.7058	6.4040	4.1098	1.8888	.2470
9.4	31.7208	29.4183	27.1157	24.8131	22.5105	20.2079	17.9053	15.6028	13.3002	10.9976	8.6951	6.3934	4.0992	1.8791	.2429
9.5	31.7103	29.4077	27.1051	24.8025	22.4999	20.1973	17.8948	15.5922	13.2896	10.9870	8.6845	6.3828	4.0887	1.8695	.2387
9.6	31.6998	29.3972	27.0946	24.7920	22.4895	20.1869	17.8843	15.5817	13.2791	10.9765	8.6740	6.3723	4.0784	1.8599	.2347
9.7	31.6894	29.3868	27.0843	24.7817	22.4791	20.1765	17.8739	15.5713	13.2688	10.9662	8.6637	6.3620	4.0681	1.8505	.2308
9.8	31.6792	29.3766	27.0740	24.7714	22.4688	20.1663	17.8637	15.5611	13.2585	10.9559	8.6534	6.3517	4.0579	1.8412	.2269
9.9	31.6690	29.3664	27.0639	24.7613	22.4587	20.1561	17.8535	15.5509	13.2483	10.9458	8.6433	6.3416	4.0479	1.8320	.2231

قدم بعدی پیاده کردن مقادیر s (به متر) بر حسب $\frac{r^2}{t}$ (به متر مربع بر دقیقه) بر روی کاغذ لگاریتمی با همان مقیاس منحنی نمونه تیس است. گرچه در معادله تیس واحد زمان بر حسب روز است ولی معمولاً در روی نمودار برحسب دقیقه در نظر گرفته می‌شود (یعنی همان واحدی که غالباً در صحرا اندازه‌گیری صورت می‌گیرد). اگر از منحنی نمونه معکوس تیس استفاده شود باید نمودار تغییرات s به $\frac{t}{r^2}$ رسم شود.

آنگاه نمودار منحنی نمونه تیس و نمودار داده‌های صحرایی را روی هم قرار داده و با جابه‌جا کردن آنها در جهات افقی و قائم، در حالتی که محورها کاملاً موازی باشند، آنها را بر هم منطبق می‌کنیم (شکل ۴-۱). یک نقطه دلخواه (نقطه انطباق[1]) انتخاب می‌شود. لازم نیست که نقطه انطباق روی منحنی باشد. اگر بتوان محل تقاطع خطهای $W(u)=1$ و $u=1$ را انتخاب کرد، محاسبات راحت‌تر است. مختصات نقطه انطباق را از هر دو منحنی یادداشت می‌شود، در نتیجه چهار مقدار $W(u)$، u، s و $\frac{r^2}{t}$ وابسته به هم به دست می‌آید.

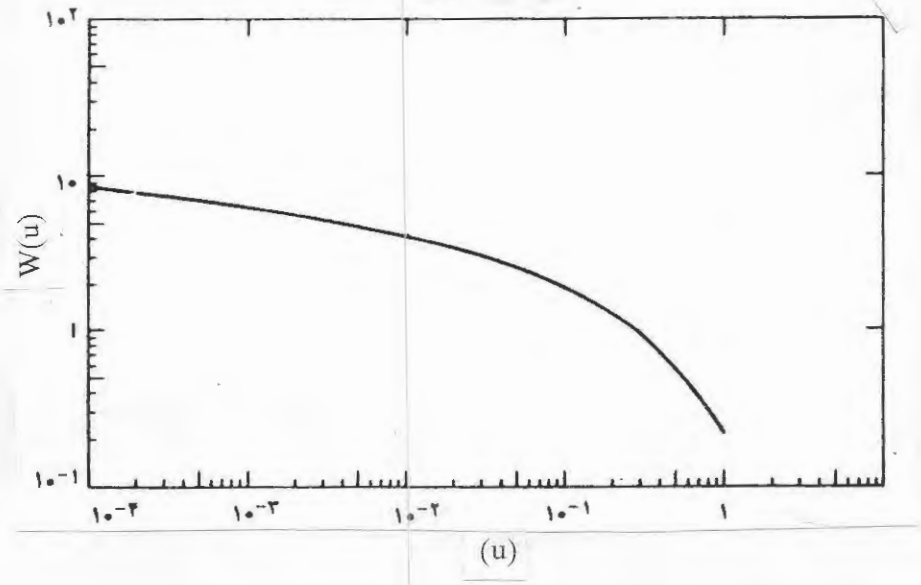
آخرین قدم در روش تیس، قراردادن مقادیر Q، s و $W(u)$ نقطه انطباق در (رابطه ۴-۹) و محاسبه ضریب T است. پس از محاسبه T مقدار آن را همراه با مقادیر $\frac{r^2}{t}$ و u نقطه انطباق در (رابطه ۴-۱۰) قرار می‌گیرند و ضریب ذخیره (S) آبخوان محاسبه می‌شود.

توضیح :

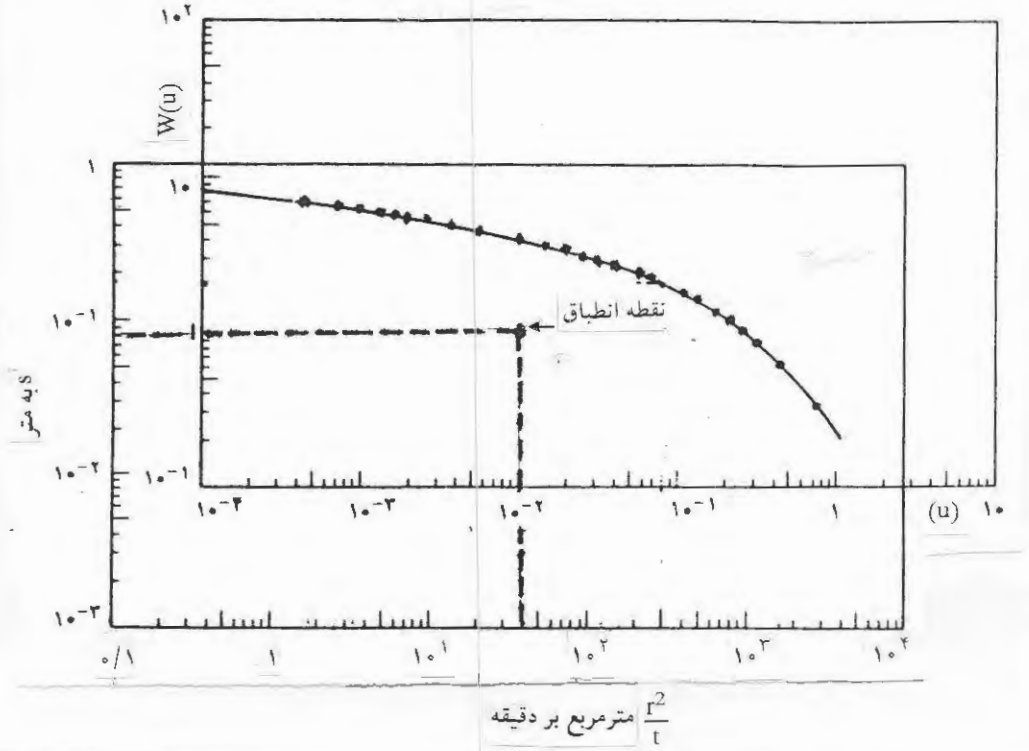
- اگر اندازه‌گیری افت در چاه اصلی انجام شود مقدار $r=1$ فرض می‌شود، در این شرایط محاسبه ضریب ذخیره امکان‌پذیر نیست.
- به جای پیاده کردن مقادیر s به $\frac{r^2}{t}$ یا $\frac{t}{r^2}$ می‌توان مستقیماً s را بر حسب t پیاده کرد.
- اگر اندازه‌گیری افت در چند پیزومتر انجام می‌شود می‌توان برای هریک از پیزومترهای تحلیل جداگانه‌ای انجام داد. مقایسه نتایج به دست آمده نشان خواهد داد که تا چه حد آبخوان موردنظر همگن است.

مثال : چاهی که در یک آبخوان تحت فشار به ضخامت ۴۰ متر حفر شده با آبدهی ثابت ۱۵ لیتر بر ثانیه مورد آزمایش پمپاژ قرار می‌گیرد. داده‌های افت بر حسب زمان در پیزومتری که به فاصله ۵۰ متری چاه اصلی قرار دارد در جدول ۴-۲ نشان داده شده است. با فرض اینکه تمام شرایط پیش‌گفته (در مورد معادلات جریانهای غیر ماندگار) برقرار باشد، ضرایب T، K و S را به روش تیس محاسبه کنید.

1- math point



شکل ۴-۱- الف - منحنی تغییرات $W(u)$ به u از روی داده‌های جدول ۴-۱ (منحنی نمونه تیس)



شکل ۴-۱- ب - انطباق نمودار اندازه‌گیریهای صحرایی (تغییرات s به $\frac{r^2}{t}$) بر روی منحنی نمونه تیس

جدول شماره ۴-۲

برگ آزمایش پمپاژ

پروژه : ..... تعداد پیزومتر : ..... عمق چاه : .....

نام محل : ..... موقعیت پیزومتر : ..... ارتفاع محل : .....

نام مالک : ..... فاصله پیزومتر از چاه : ..... نقطه نشانه اندازه‌گیری : .....

شماره چاه (U.T.M) : ..... **نوع آزمایش :** ..... سطح استاتیک : .....

زمان			عمق سطح آب (m)	افت s (m)	روش اندازه‌گیری :		آبدهی Q (lit/s)	افت تصحیح شده s_c (m)	$\frac{r^2}{t}$ (m^2/min)	افت باقیمانده s' (m)	$\frac{t}{t'}$	ملاحظات نسبت تبدیل اریفیس دور پمپ و ...
تاریخ	ساعت (hr)	دقیقه (min)			ارتفاع (in)	طول پرش (cm)						
		۰		۰			-		∞			
		۱		۰/۰۳			۱۵		$۲/۵\times۱۰^{۳}$			
		۱/۵		۰/۰۵			"		$۱/۶\times۱۰^{۳}$			
		۲		۰/۰۷			"		$۱/۲۵\times۱۰^{۳}$			
		۲/۵		۰/۰۸			"		$۱۰^{۳}$			
		۳		۰/۰۹			"		$۸/۳\times۱۰^{۲}$			
		۴		۰/۱۲			"		$۶/۲۵\times۱۰^{۲}$			
		۵		۰/۱۴			"		$۵/۰\times۱۰^{۲}$			
		۶		۰/۱۶			"		$۴/۲\times۱۰^{۲}$			
		۸		۰/۱۷			"		$۳/۱\times۱۰^{۲}$			
		۱۰		۰/۱۸			"		$۲/۵\times۱۰^{۲}$			
		۱۲		۰/۲۰			"		$۲/۱\times۱۰^{۲}$			
		۱۵		۰/۲۵			"		$۱/۷\times۱۰^{۲}$			
		۲۰		۰/۲۶			"		$۱/۲۵\times۱۰^{۲}$			
		۲۵		۰/۲۸			"		$۱/۰\times۱۰^{۲}$			
		۳۰		۰/۳۰			"		$۸/۳\times۱۰^{۱}$			
		۴۰		۰/۳۱			"		$۶/۲۵\times۱۰^{۱}$			
		۶۰		۰/۳۴			"		$۴/۲\times۱۰^{۱}$			
		۱۲۰		۰/۴۰			"		$۲/۱\times۱۰^{۱}$			
		۱۸۰		۰/۴۱			"		$۱/۴\times۱۰^{۱}$			
		۲۴۰		۰/۴۵			"		$۱/۰\times۱۰^{۱}$			
		۳۶۰		۰/۴۹			"		۶/۹			

نام آزمایش کننده : .....

جدول شماره ۴-۲

برگ آزمایش پمپاژ

پروژه : ..... تعداد پیزومتر : ..... عمق چاه : .....

نام محل : ..... موقعیت پیزومتر : ..... ارتفاع محل : .....

نام مالک : ..... فاصله پیزومتر از چاه : ..... نقطه نشانه اندازه‌گیری : .....

شماره چاه (U.T.M) : ..... **نوع آزمایش :** ..... سطح استاتیک : .....

زمان			عمق سطح آب (m)	افت s (m)	روش اندازه‌گیری :		آبدهی Q (lit/s)	افت تصحیح شده s_c (m)	$\frac{r^2}{t}$ (m^2/min)	افت باقیمانده s' (m)	$\frac{t}{t'}$	ملاحظات نسبت تبدیل اریفیس دور پمپ و ...
تاریخ	ساعت (hr)	دقیقه (min)			ارتفاع (in)	طول پرش (cm)						
		۴۸۰		۰/۵۰			۱۵		۵/۲			
		۷۲۰		۰/۵۳			"		۳/۵			
		۹۶۰		۰/۵۵			"		۲/۶			
		۱۴۴۰		۰/۵۸			"		۱/۷۳			

نام آزمایش کننده : .....

حل : ابتدا مقادیر $\frac{r^2}{t}$ برحسب مترمربع بر دقیقه حساب می‌شود (جدول ۴-۲). سپس مقادیر s بر حسب $\frac{r^2}{t}$ در روی کاغذ لگاریتمی پیاده می‌شود. نمودار حاصله و منحنی نمونه تیس روی هم قرار داده می‌شود (شکل ۴-۲). نقطه انطباق انتخاب می‌شود. این نقطه دارای مختصات زیر است.

$W(u) = ۱$

$u = ۱\times۱۰^{-۲}$

$s = ۸\times۱۰^{-۲}\ m$

$\frac{r^2}{t} =$ مترمربع بر دقیقه ۴۰

ابتدا $\frac{r^2}{t}$ را به مترمربع بر روز تبدیل می‌کنیم.

$\frac{r^2}{t} =$ مترمربع بر دقیقه ۴۰ × ۱۴۴۰ = مترمربع بر روز ۵۷۶۰۰

آبدهی چاه را نیز باید به مترمکعب بر روز تبدیل کنیم.

$Q = ۱۵\ lit/sec \times \frac{۸۶۴۰۰}{۱۰۰۰} =$ مترمکعب بر روز ۱۲۹۶

ضریب قابلیت انتقال برابر است با :

$T = \frac{Q}{۴\pi s} W(u) = \frac{۱۲۹۶}{۴\times\pi\times۸\times۱۰^{-۲}} \cong$ مترمربع بر روز ۱۲۹۰

هدایت هیدرولیکی از تقسیم قابلیت انتقال به ضخامت آبخوان به دست می‌آید :

$K = \frac{T}{D} = \frac{۱۲۹۰}{۴۰} \cong$ متر بر روز ۳۲

ضریب ذخیره (از رابطه ۴-۱۱) محاسبه می‌شود :

$S = \frac{4Tu}{r^2/t} = \frac{۴\times۱۲۹۰\times۱۰^{-۲}}{۵۷۶۰۰} = ۹\times۱۰^{-۴}$

۴-۲-۲ روش کوپر - ژاکوب[1]

ژاکوب براساس معادله عدم تعادل تیس، راه‌حل ساده‌تری ارائه داده است. وقتی که u به قدر کافی کوچک باشد معادله تیس را می‌توان بدون اشتباه مهمی به‌صورت زیر خلاصه کرد :

$$s = \frac{2.3\ Q}{4\pi T} \log \frac{2.25\ Tt}{r^2 S} \qquad (۴-۱۱)$$

در این معادله :

s = افت، متر

Q = آبدهی ثابت پمپاژ، مترمکعب بر روز

T = ضریب قابلیت انتقال، متر مربع بر روز

t = زمان از شروع پمپاژ، روز

r = فاصله پیزومتر از چاه اصلی به متر، در صورتی که افت تنها در چاه اصلی اندازه‌گیری شود، به جای r، r_w (شعاع چاه) قرار داده می‌شود.

S = ضریب ذخیره،

معادله (۴-۱۱) در شرایطی اعتبار دارد که $u \leq ۰/۰۱$ باشد. در این صورت استفاده از این معادله اساساً همان نتایج معادله تیس را به دست می‌دهد. u با افزایش زمان پمپاژ (t) و کاهش r کوچک می‌شود. اگر r نسبتاً کوچک باشد، معمولاً در آبخوان‌های تحت فشار پس از یک ساعت پمپاژ و در آبخوان‌های آزاد پس از حدود ۱۲ ساعت پمپاژ شرایط برای استفاده از روش ژاکوب فراهم می‌شود.

روشن است که برای استفاده از روش ژاکوب باید تمام فرضیات پیش‌گفته (در روش تیس) برقرار باشد.
در یک آزمایش معین، وقتی که آبدهی پمپاژ ثابت نگه داشته می‌شود، T، Q و S ثابت‌اند و در این صورت برای یک آبخوان معین و در هر نقطه مشخص (r ثابت)، s و t متغیرهای رابطه فوق هستند و این رابطه نشان می‌دهد که s با logt تغییر می‌کند (تغییرات آن خطی است)

براساس این اصل می‌توان نمودار زمان - افت را بر روی یک کاغذ نیمه‌لگاریتمی پیاده کرد. پس از آزمایش پمپاژ با آبدهی ثابت و اندازه‌گیری افت سطح آب (s) در پیزومترها و در چاه اصلی نسبت به زمان (t)، با استفاده از داده‌های حاصل، نمودار زمان - افت تهیه می‌شود. برای این کار زمان در روی محور افقی با تقسیمات لگاریتمی و افت در روی محور قائم، با مقیاس حسابی پیاده می‌شود (شکل ۴-۱).

1- Cooper - Jacob

با توجه به اصل یاد شده، اکثر نقاط پیاده شده بر روی یک خط مستقیم قرار می‌گیرند (جز برای اندازه‌گیریهایی که در اوایل پمپاژ انجام می‌شود و u بزرگتر از ۰/۰۱ است). با استفاده از شیب خط به دست آمده به آسانی می‌توان مقدار T را حساب کرد. شیب یا ضریب زاویه خط مستقیم در نمودار برابر است با $\frac{۲/۳Q}{۴\pi T}$.

برای محاسبه شیب خط کافی است که اختلاف افت را در یک سیکل لگاریتمی به دست آوریم. یعنی اختلاف افت مربوط به دو رقم از محور زمان که لگاریتم آنها به اندازه واحد اختلاف داشته باشند $(\log t_2 - \log t_1 = 1)$.
این مقدار در شکل ۴-۲ با Δs نشان داده شده است.
بنابراین می‌توان نوشت :

$$\frac{2.3\ Q}{4\ \pi T} = \Delta s$$

و از آنجا :

$$T = \frac{2.3\ Q}{4\pi \Delta s} \Rightarrow T = \frac{0.183Q}{\Delta s} \qquad (۱۲-۴)$$

پس از محاسبه T، برای به‌دست آوردن S خط مستقیم را ادامه می‌دهیم تا محور زمان را قطع کند ($t_\circ$، نقطه‌ای که افت صفر است). بنابر این :

$$0 = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt_\circ}{r^2S}$$

چون عبارت $\frac{2.3Q}{4\pi T}$ مخالف صفر است، پس عبارت لگاریتمی باید مساوی صفر باشد :

$$\log \frac{2.25Tt_\circ}{r^2S} = 0$$

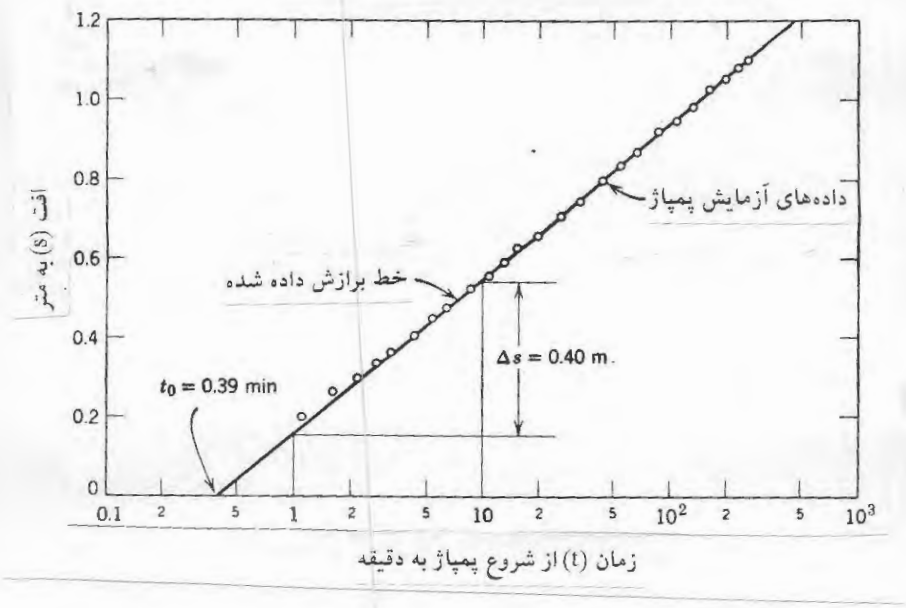
و از آنجا :

$$\frac{2.25Tt_\circ}{r^2S} = 1$$

یا :

$$S = \frac{2.25Tt_\circ}{r^2} \qquad (۱۳-۴)$$

برای محاسبه S می‌توان T به دست آمده را به همراه با مقدار افت (s) مربوط به یک زمان (t) معین (که از روی نمودار به‌دست می‌آید) در رابطه (۴-۱۱) قرار داد و به این ترتیب نیز S را محاسبه کرد. پس از محاسبه T و S با قرار دادن آنها در معادله $u=\frac{r^2S}{4Tt}$ مقدار u باید کنترل شود. (شرط $u \leq ۰/۰۱$).



شکل ۴-۲- تغییرات افت به زمان در مختصات نیمه‌لگاریتمی در روش ژاکوب

مثال : چاهی که در یک آبخوان تحت فشار حفر شده با آبدهی ثابت ۴۰ لیتر بر ثانیه پمپاژ می‌شود. داده‌های افت بر حسب زمان در پیزومتری که به فاصله ۵۰ متری چاه اصلی قرار گرفته در نمودار نیمه لگاریتمی (شکل ۴-۳) پیاده شده و خط مستقیمی از نقاط پیاده شده عبور داده شده است. با فرض برقرار بودن تمام فرضیات پیش‌گفته، ضرایب T و S را حساب کنید.

حل : باتوجه به نمودار (شکل ۴-۲) داریم :

$\Delta s = ۰/۴۰$ m

$t_۰ = ۰/۳۹$ min $\Rightarrow$ $۲/۷\times۱۰^{-۴}$ روز

برای محاسبه T باید مقدار Q را بر حسب مترمکعب بر روز به دست آوریم :

$Q = ۴۰$ lit/sec $\Rightarrow$ ۳۴۵۶ مترمکعب بر روز

بنابراین داریم :

$$T = \frac{۲/۳\times۳۴۵۶}{۴\times\pi\times۰/۴۰} \cong ۱۵۸۰ \text{ مترمربع بر روز}$$

$$S = \frac{۲/۲۵\times۱۵۸۰\times۲/۷\times۱۰^{-۴}}{۵۰^{۲}} \cong ۳/۸\times۱۰^{-۴}$$

چنان که گفتیم روش کوپر - ژاکوب وقتی اعتبار دارد که $u \leq ۰/۰۱$ باشد. در آزمایش فوق باتوجه به اینکه آزمایش ۲۴۰ دقیقه ($\frac{۱}{۶}$ روز) طول کشیده، بنابراین :

$$u = \frac{r^2S}{۴Tt} = \frac{۵۰\times۳/۸\times۱۰^{-۴}}{۴\times۱۵۸۰\times(۱/۶)} = ۹/۰\times۱۰^{-۴}$$

بنابر این نتایج به دست آمده معتبر است.

مدت لازم برای رسیدن به شرایط ماندگار در نقاط مختلف متفاوت است. شرایط تعادل در بعضی چاهها پس از چندین ساعت از شروع پمپاژ و در بعضی دیگر ظرف چند روز یا چند هفته ایجاد می‌شود. در برخی از چاهها نیز حتی پس از سالها پمپاژ، شرایط تعادل برقرار نمی‌شود.

بنابراین در شرایط مناسب توصیه می‌شود که پمپاژ تا ثابت شدن سطح آب در پیزومترها ادامه پیدا کند. در آبخوانهای تحت فشار مخروط افت به سرعت گسترش می‌یابد، چون برداشت آب تنها منجر به کاهش فشار می‌شود. در این گونه آبخوانها معمولاً مدت ۲۴ ساعت آزمایش پمپاژ برای به‌دست آوردن نتایج مطلوب کافی است.

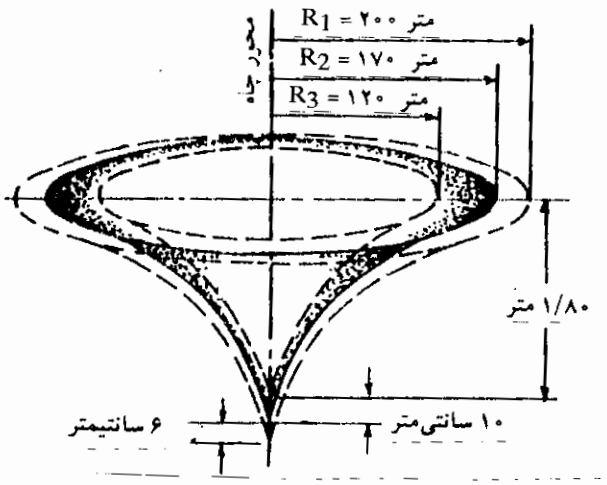
در آبخوانهای آزاد چون مخروط افت به آهستگی رشد می‌کند به زمان طولانی‌تری برای آزمایش پمپاژ نیاز است. در این گونه آبخوانها زمان بیشتری برای تخلیه لایه آبدار لازمست. زیرا در اغلب رسوبات لایه لایه نفوذ عمقی به آهستگی انجام می‌گیرد (آبخوانهای آزاد دارای آبدهی تأخیری است). بنابراین در آبخوانهای آزاد معمولاً آزمایش پمپاژ باید به مدت ۷۲ ساعت ادامه پیدا کند. البته در صورتی که شرایط ماندگار زودتر از ۷۲ ساعت برقرار شود روشن است که نیازی به ادامه پمپاژ نیست.

آزمایشهای پمپاژ طولانی مدت می‌تواند وجود مرزهای هیدرولیکی ناشناخته آبخوان را مشخص کند.

۲-۹ فواصل زمانی اندازه‌گیریها

در حین آزمایش پمپاژ اندازه‌گیریهای دقیق عمق سطح آب در چاه اصلی و پیزومترها و اندازه‌گیری آبدهی چاه ضروری است. با شروع پمپاژ، در سطح ایستابی یا پیزومتریک اطراف چاه یک مخروط افت تشکیل می‌شود. هرچه مدت و مقدار آبکشی بیشتر باشد مخروط افت گسترش و عمق بیشتری پیدا می‌کند. اما با گذشت زمان سرعت گسترش و عمیقتر شدن مخروط افت کاهش می‌یابد.

مثلاً در شکل ۲-۴ مخروطهای افت در اطراف چاهی فرضی که با آبدهی ثابت پمپاژ می‌شود در سه مرحله نشان داده شده است. به طوری که در شکل دیده می‌شود پس از یک ساعت از شروع پمپاژ شعاع مخروط افت ۱۲۰ متر و عمق آن در چاه اصلی ۱/۸۰ متر است. در پایان ساعت دوم، شعاع مخروط افت به ۱۷۰ متر و عمق آن به ۱/۹۰ متر می‌رسد. یعنی شعاع مخروط افت ۵۰ متر و عمق آن فقط ۱۰ سانتی‌متر افزایش پیدا می‌کند. در ساعت سوم پمپاژ ۳۰ متر به شعاع مخروط افت و ۶ سانتی متر به عمق آن افزوده می‌شود.



شکل ۲-۴ تغییرات شعاع و عمق مخروط افت در فواصل زمانی مساوی پس از شروع پمپاژ با آبدهی ثابت
(اندازه‌ها به مقیاس نیست)

با توجه به مطالب فوق اندازه‌گیری عمق سطح آب در چاه اصلی و پیزومترها در مراحل اولیه آزمایش پمپاژ، در طی یک یا دو ساعت اول باید در فواصل زمانی کوتاه انجام گیرد و با گذشت زمان فواصل اندازه‌گیری می‌تواند به تدریج بیشتر شود.

در صورت امکان بهتر است اندازه‌گیریهای عمق سطح آب به وسیله دستگاههای خودکار ثبات انجام گیرد که به طور پیوسته تغییرات سطح آب را نشان می‌دهند. در صورتی‌که این دستگاهها در دسترس نباشد اندازه‌گیریها باید با عمق‌یابهای الکتریکی معمولی انجام گیرد.در این صورت توصیه می‌شود که فواصل زمانی اندازه‌گیریها در چاه اصلی و پیزومترها به صورت زیر باشد :

زمان صفر تا ۱۰ دقیقه : ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳، ۴، ۵، ۶/۵، ۸، ۱۰ دقیقه
زمان ۱۰ تا ۱۰۰ دقیقه : ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۵، ۸۰ و ۱۰۰ دقیقه
و از ۱۰۰ دقیقه به بعد هر یک یا دو ساعت یک بار.

البته این فواصل زمانی پیشنهادی را نباید قطعی تلقی کرد و رعایت دقیق آن الزامی نیست. باتوجه به شرایط آبخوان در محل و امکانات موجود می‌توان تغییراتی در آن داد. چون معمولاً تحلیل آزمایشها بر روی کاغذهای لگاریتمی و نیمه‌لگاریتمی انجام می‌گیرد بهتر است تعداد افتهای اندازه‌گیری شده در هر سیکل لگاریتمی زمان حداقل ۱۰ بار باشد. در آبخوانهای آزاد به علت تأخیر در افت سطح آب، فواصل زمانی در پیزومترها در ابتدای آزمایش می‌تواند بیشتر باشد (مثلاً حدود ۲ دقیقه).

پس از قطع پمپاژ، در زمان برگشت آب نیز سطح آب باید در چاه اصلی و پیزومترها اندازه‌گیری شود. این عمل به ویژه در چاه اصلی دارای اهمیت بیشتری است زیرا که در زمان پمپاژ، اندازه‌گیریهای افت در چاه اصلی دقت کمتری دارد. فواصل زمانی اندازه‌گیریهای سطح آب در زمان برگشت نیز مثل آزمایش افت است. دقت اندازه‌گیریهای سطح آب باید حداقل در حد سانتی‌متر باشد.

در حین آزمایش پمپاژ اندازه‌گیری و کنترل آبدهی چاه نیز ضروری است. گرچه در معادلات جریانهای شعاعی فرض بر ثابت بودن آبدهی است ولی آبدهی چاه عملاً ممکن است به علت تغییرات ولتاژ در موتورهای الکتریکی یا تغییرات دما، رطوبت و تغییر ترکیب سوخت در موتورهای دیزلی و بنزینی، تغییرات ناخواسته‌ای داشته باشد. به این جهت در حین آزمایش پمپاژ لازم است که وسیله دقیقی برای اندازه‌گیری آبدهی و تغییرات آن و همچنین وسیله‌ای برای کنترل و تنظیم بده، که تا حد ممکن ثابت باشد، مورد استفاده قرار گیرد. بهتر است برای اندازه‌گیری آبدهی از روزنه[1] یا وسایل دیگری استفاده شود که به‌طور مداوم اندازه‌گیری آبدهی امکان‌پذیر باشد. استفاده از شیر فلکه (والو) در لوله آبده نیز بهترین وسیله کنترل آبدهی است. شیر باید به صورت نیمه‌باز باشد. اندازه شیر و لوله باید طوری باشد که وقتی نصف یا سه چهارم شیر باز باشد پمپ در آبدهی موردنظر کار کند.

۳- وسایل و تجهیزات لازم برای آزمایش پمپاژ

۳-۱ موتور پمپ واجد شرایط

برای پمپاژ و تخلیه آب از چاه می‌توان از انواع پمپ‌ها استفاده کرد. درصورتیکه هدف انجام آزمایش پمپاژ با آبدهی ثابت باشد موتور پمپ باید بتواند چاه را حداقل دو تا سه روز مداوم با آبدهی ثابت پمپاژ کند، حتی در بعضی موارد زمان آزمایش ممکن است خیلی بیشتر باشد. به علاوه قدرت موتور پمپ باید متناسب با ظرفیت آبدهی چاه انتخاب شود که بتواند افت کافی و قابل اندازه‌گیری را در چاه اصلی و چاههای پیزومتر مجاور، ایجاد کند.

چون در آزمایشهای افت پله‌ای لازم است که در حین آزمایش دور موتور تغییر کند از پمپهای توربینی شافت و غلافدار که نیروی محرکه آنها را موتور دیزل با قدرت کافی تأمین می‌کند، استفاده می‌شود زیرا با افزایش یا کاهش دور موتور می‌توان آبدهی چاه را به میزان دلخواه تنظیم کرده و آزمایشهای افت و یا برگشت پله‌ای را به راحتی انجام داد. در صورتی که به جای موتور دیزل از الکتروموتور استفاده شود، به علت آن که تغییر دور الکتروموتور امکان‌پذیر نیست، بنابراین آزمایشهای افت پله‌ای تنها با استفاده از شیر فلکه برای تنظیم آبدهی انجام می‌گیرد.

1- oriffice

معمولاً در چاههایی که تازه حفاری و تکمیل شده‌اند، اعم از بهره‌برداری و یا اکتشافی، آزمایش پمپاژ به وسیله پمپ‌های توربینی شافت و غلافدار مجهز به موتور دیزل انجام می‌شود. زیرا در اینگونه چاهها قبل از انجام آزمایش پمپاژ باید عمل توسعه و شستشو چاه صورت گیرد که مستلزم تغییر دور موتور است. قدرت آبکشی پمپ به تناسب آبدهی آبخوان و ارتفاع رانش تعیین می‌شود. برای این کار از انواع پمپهای با لوله آبده ۶ یا ۸ اینچ و در شرایطی که آبدهی چاه بیش از ۱۰۰ لیتر بر ثانیه برآورد شود از پمپ ۱۰ اینچ استفاده می‌شود.

۳-۲ وسایل اندازه‌گیری

مهمترین قسمت در یک آزمایش پمپاژ، اندازه‌گیریهای تغییرات سطح آب در پیزومترها و چاه پمپاژی و اندازه‌گیری بده چاه است. این اندازه‌گیریها باید به دفعات زیاد و با حداکثر دقت در حین آزمایش انجام شود. زیرا این دو عامل پایه و اساس تمام محاسبات پمپاژ برای به‌دست آوردن ضرایب هیدرودینامیک آبخوان و ضرایب هیدرولیکی چاه هستند. بنابراین برای انجام صحیح و دقیق این اندازه‌گیریها باید پیش‌بینی‌های لازم قبل از شروع پمپاژ به‌عمل آید. لوازم و تجهیزاتی که برای این اندازه‌گیریها مورد نیاز است عبارتند از وسایل اندازه‌گیری آبدهی و وسایل اندازه‌گیری سطح آب.

۳-۲-۱ وسایل اندازه‌گیری آبدهی

برای اندازه‌گیری آبدهی چاه در هنگام آزمایشهای پمپاژ از وسائل مختلفی استفاده می‌شود که مناسب‌ترین آنها "روزنه[1]" است، زیرا علاوه بر دقت کافی در تعیین میزان آبدهی چاه، با مشاهده ارتفاع آب در لوله روزنه و استفاده از جداول استاندارد شده، آبدهی آزمایش (Q) را درهر لحظه می‌توان مشخص کرد. بنابراین نصب روزنه بر روی لوله خروجی پمپهای آزمایشی الزامی است. در صورتی‌که آزمایش پمپاژ به‌طور موردی و با استفاده از موتور پمپ نصب شده بر روی چاه انجام شود، چنانچه روزنه در دسترس نباشد می‌توان از وسایل دیگری مانند خط‌کش جت یا روش حجمی آبدهی چاه را برآورد کرد. اکنون روشهای مختلف اندازه‌گیری آبدهی شرح داده می‌شود.

۳-۲-۱-۱ روش حجمی

بهترین روش اندازه‌گیری آبدهی چاه در صورت امکان، استفاده از شمارنده (کنتور) حجمی مجهز به وسیله اندازه‌گیری آبدهی لحظه‌ای است. ساختمان شمارنده‌ها متفاوت است و اغلب آنها حجم آب عبوری را به طور تجمعی نشان می‌دهد (شبیه کنتور آب منازل). ولی در آزمایشهای پمپاژ اندازه‌گیری مداوم آبدهی لحظه‌ای چاه، در طول آزمایش موردنظر است. بنابراین باید از انواع شمارنده‌هایی که آبدهی لحظه‌ای را نشان می‌دهند استفاده شود. در بعضی موارد این شمارنده‌ها مجهز به دستگاه ثبات هستند که برای کنترل تغییرات آبدهی در طول مدت آزمایش مفید

1- orifice

است. شمارنده باید متناسب با ظرفیت آبدهی چاه انتخاب شود بعلاوه به نحوی روی لوله خروجی پمپ نصب شود که مقدار آبدهی لحظه‌ای را دقیق نشان دهد.

یک روش حجمی ساده دیگر عبارت از اندازه‌گیری زمان لازم برای پرشدن ظرفی با حجم معین (مثلاً بشکه ۲۲۰لیتری) است. سنجش زمان باکرونومتر صورت می‌گیرد. مقدار آبدهی لحظه‌ای (Q) برابر است با :

$$Q = \frac{V}{t}$$

V = حجم ظرف به لیتر

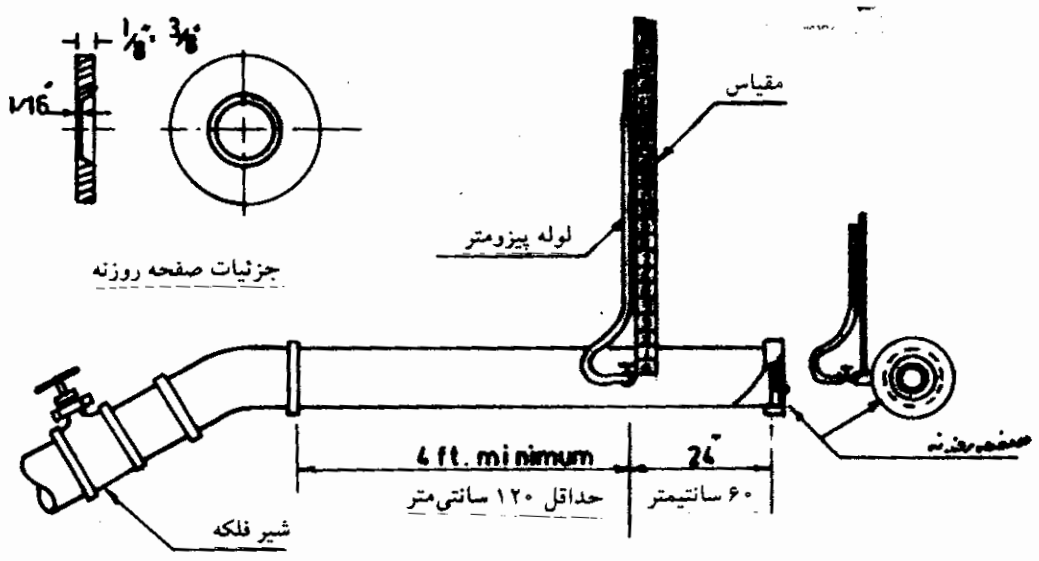
t = زمان پرشدن به ثانیه

Q = آبدهی برحسب لیتر بر ثانیه

این روش برای آبدهی کم، دقت کافی دارد ولی در آبدهی‌های زیاد، خطای اندازه‌گیری نسبتاً زیاد است. در مواردی‌که زمان پرشدن ظرف (معمولاً بشکه ۲۲۰لیتری) از ده ثانیه بیشتر باشد اندازه‌گیری‌ها از دقت کافی برخوردار است.

۳-۲-۱-۲ روزنه

روزنه عبارتست از یک صفحه فلزی مدور با سوراخ گردی در وسط آن که در انتهای لوله تخلیه، به منظور کاهش قطر لوله، نصب می‌شود. یک لوله پیزومتر (لوله پلاستیکی شفاف)، برای اندازه‌گیری فشار، در فاصله معینی (معمولاً ۶۰سانتیمتر) از صفحه روزنه بر روی لوله آبده نصب می‌شود. برای دقت بیشتر در اندازه‌گیری نیز شیر فلکه‌ای به منظور کنترل آب خروجی در مسیر لوله آبده مطابق شکل شماره (۳-۱) قرار داده می‌شود.

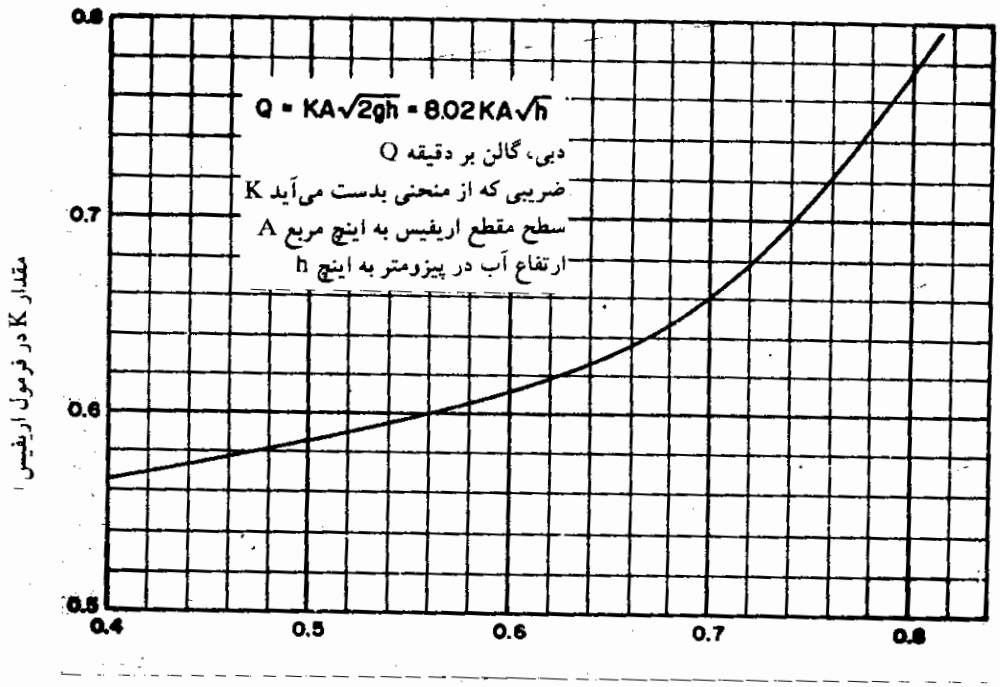


شکل ۳-۱ روزنه و اجزاء لازم دیگر برای اندازه‌گیری آبدهی چاه

بر اثر کاهش قطر لوله آبده و افزایش فشار، آب در لوله پیزومتر بالا می‌آید. مقدار فشار (ارتفاع آب در پیزومتر) با بده‌خروجی (Q) متناسب است. بدین‌ترتیب آبدهی چاه با اندازه‌گیری ارتفاع آب در لوله پلاستیکی و با استفاده از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$Q = KA\sqrt{2gH} = 8.02\ KA\sqrt{H} \qquad (۱-۳)$$

که در آن Q آبدهی چاه برحسب گالن بر دقیقه، A سطح مقطع روزنه برحسب اینچ مربع و H ارتفاع آب در لوله اریفیس برحسب اینچ و g شتاب ثقل زمین برابر ۳۲/۲ فوت بر مجذور ثانیه و K ضریبی است که به نسبت قطر به اریفیس قطر لوله آبده بستگی دارد (شکل ۳-۲). برای دقت بیشتر بهتر است نسبت قطر اریفیس به قطر خارجی لوله آبده از ۰/۷ تجاوز نکند.



شکل ۳-۲ تغییرات مقادیر ضریب K در فرمول اریفیس

نکات زیر هنگام استفاده از اریفیس باید مورد توجه قرار گیرد:

- لوله خروجی باید کاملاً افقی قرار گرفته باشد.
- لوله پلاستیکی (پیزومتر) بایداز هوا، شن، ماسه و گل و لای خالی باشد.

- دهانه صفحه اریفیس باید لب تیز، صاف و بدون زائده باشد و طوری نصب شود که جریان آب مماس بر لبه نازک آن عبور کند.
- هنگام بستن صفحه اریفیس به دهانه لوله تخلیه نباید از محل اتصال آب خارج شود و بهتر است از واشر لاستیکی استفاده شود.
- اندازه‌گیری آبدهی با اریفیس هنگامی صحیح است که آب از اریفیس به‌طور کامل و پرجریان داشته باشد.
- فاصله محل اتصال لوله پیزومتر تا صفحه روزنه باید حداقل سه برابر قطر اریفیس باشد مثلاً هنگام استفاده از اریفیس ۸ اینچ، معمولاً فاصله لوله پیزومتر از اریفیس ۲ فوت است و طول بخش افقی لوله آبده نباید از ۶ فوت کمتر باشد.
- اریفیس مقدار آبدهی را با خطایی حدود ۱/۵ درصد اندازه‌گیری می‌کند.

جداول استاندارد زیادی وجود دارد که به‌کمک آنها می‌توان با داشتن ارتفاع آب در لوله پلاستیکی و نسبت تبدیل روزنه به لوله آبده، مقدار آبدهی چاه را به دست آورد (جدول ۱ پیوست)

۳-۲-۱-۳ اندازه‌گیری آبدهی براساس پرش آب

با اندازه‌گیری مقدار پرش یا فوران آب در لوله‌های آبده افقی، مایل یا قائم می‌توان به طور غیرمستقیم آبدهی چاه را برآورد کرد. در صورتی که اندازه‌گیری آبدهی با هیچ یک از روشهای یاد شده امکان‌پذیر نباشد، می‌توان از این روش استفاده کرد:

الف - اندازه‌گیری آبدهی در لوله‌های آبده افقی

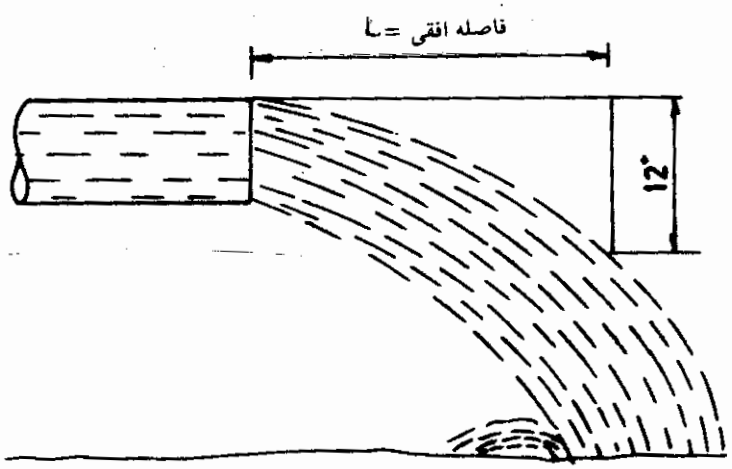
در این طریقه از یک گونیای فلزی یا چوبی استفاده می‌شود که بازوی کوتاه آن به طول ثابت یک فوت (۳۰/۴۸ سانتی‌متر) و بازوی بلند آن معمولاً ۱ تا ۱/۵ متر است. برای اندازه‌گیری آبدهی بازوی بلند را روی لوله آبده افقی قرار داده و آنقدر آن را به جلو و عقب حرکت می‌دهند تا نوک بازوی کوتاه با سطح آبی که از لوله بیرون می‌ریزد مماس شود. (شکل ۳-۳). با اندازه‌گیری فاصله افقی جهش آب (L) و با درنظرگرفتن قطر لوله آبده میزان آبدهی چاه با استفاده از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$Q = K.L.D^2 \qquad (۲-۳)$$

در این رابطه، L طول پرش آب و D قطر لوله آبده است. اگر L برحسب سانتیمتر و D برحسب اینچ باشد با استفاده از ضریب K مطابق جدول ۳-۱ آبدهی برحسب لیتر بر ثانیه به دست می‌آید. (مقدار K برای لوله‌های آبده با قطرهای مختلف کمی متفاوت است).

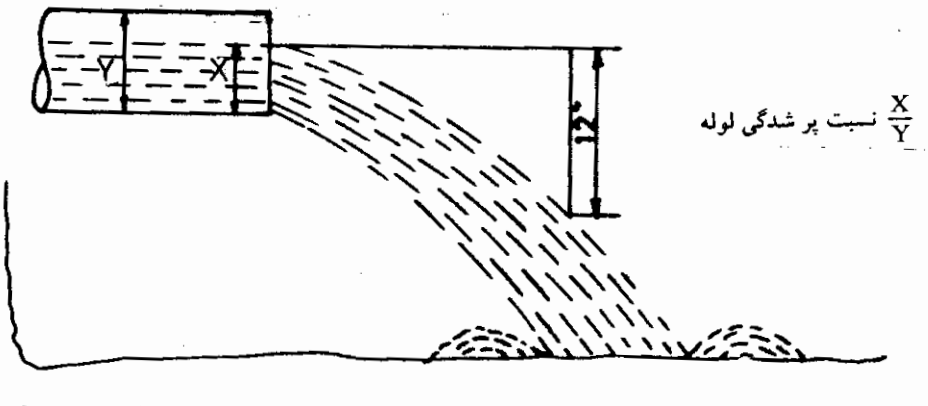
جدول ۳-۱ مقدار ضریب K برای قطرهای مختلف لوله آبده

قطر لوله آبده (D) (inch)	مقدار ضریب K
۲	۰/۰۲۱۲۳۰
۳	۰/۰۲۰۷۰۰
۴	۰/۰۲۰۰۵۵
۶	۰/۰۲۰۲۵۵
۸	۰/۰۱۹۷۴۱
۱۰	۰/۰۱۹۸۷۴
۱۲	۰/۰۱۹۷۸۶



شکل ۳-۳- اندازه‌گیری آبدهی در لوله افقی بطریقه جت

برای محاسبه آبدهی به روش جت در لوله‌های آبده افقی می‌توان از جدول شماره ۲ ضمیمه نیز استفاده کرد.
رابطه (۳-۲) وقتی به کار می‌رود که لوله کاملاً از آب پر باشد. وقتی که لوله آبده نیمه پر باشد مقادیر به دست آمده از این روابط باید در نسبت $\frac{x}{y}$ ضرب شود، که x ارتفاع آب از کف لوله آبده و y قطر لوله آبده است (شکل ۳-۴). البته این محاسبه به شرطی صحیح است که ضلع افقی خط کش جت روی سطح آب در داخل لوله قرار داده شود. درصورتی‌که ضلع افقی گونیا روی لوله قرار داده شود، باید به ضلع قائم گونیا اختلاف y-x نیز اضافه شود.

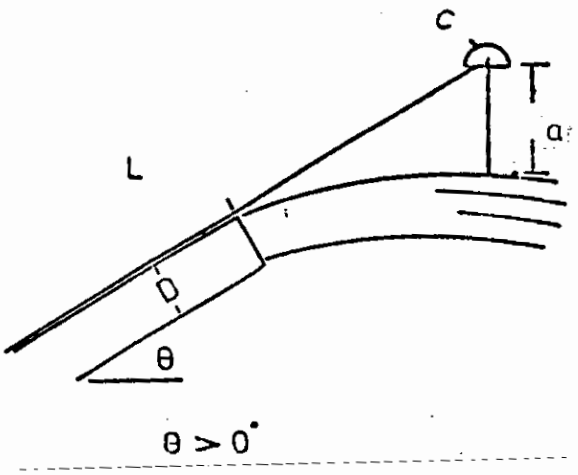


شکل ۳-۴ نحوه اندازه‌گیری دبی با گونیای جت در لوله‌های نیمه پر

ب - اندازه‌گیری آبدهی در لوله‌های مایل (سر بالا)

اگر لوله آبده مایل باشد، با استفاده از خط‌کش مخصوص که زاویه بین بازوهای بلند و کوتاه آن متغیر است، اندازه‌گیری آبدهی بدین‌ترتیب انجام می‌شود که با قرار دادن بازوی بلند در راستای لوله آبده، بازوی کوتاه باید درجهت قائم قرار گیرد (شکل شماره ۳-۵) و طول پرش در این حالت اندازه‌گیری می‌شود. سپس با اندازه‌گیری شیب لوله نسبت به سطح افق و استفاده از نمودار شکل شماره ۳-۶ که رابطه شیب لوله با مقدار a (مقدار تصحیح که به L اضافه می‌شود) و بهره‌گیری از جدول شماره ۳-۲ و رابطه شماره ۳-۳ آبدهی بر حسب لیتر بر ثانیه به‌دست خواهد آمد. در این رابطه k ضریب لوله و L طول پرش تصحیح شده است.

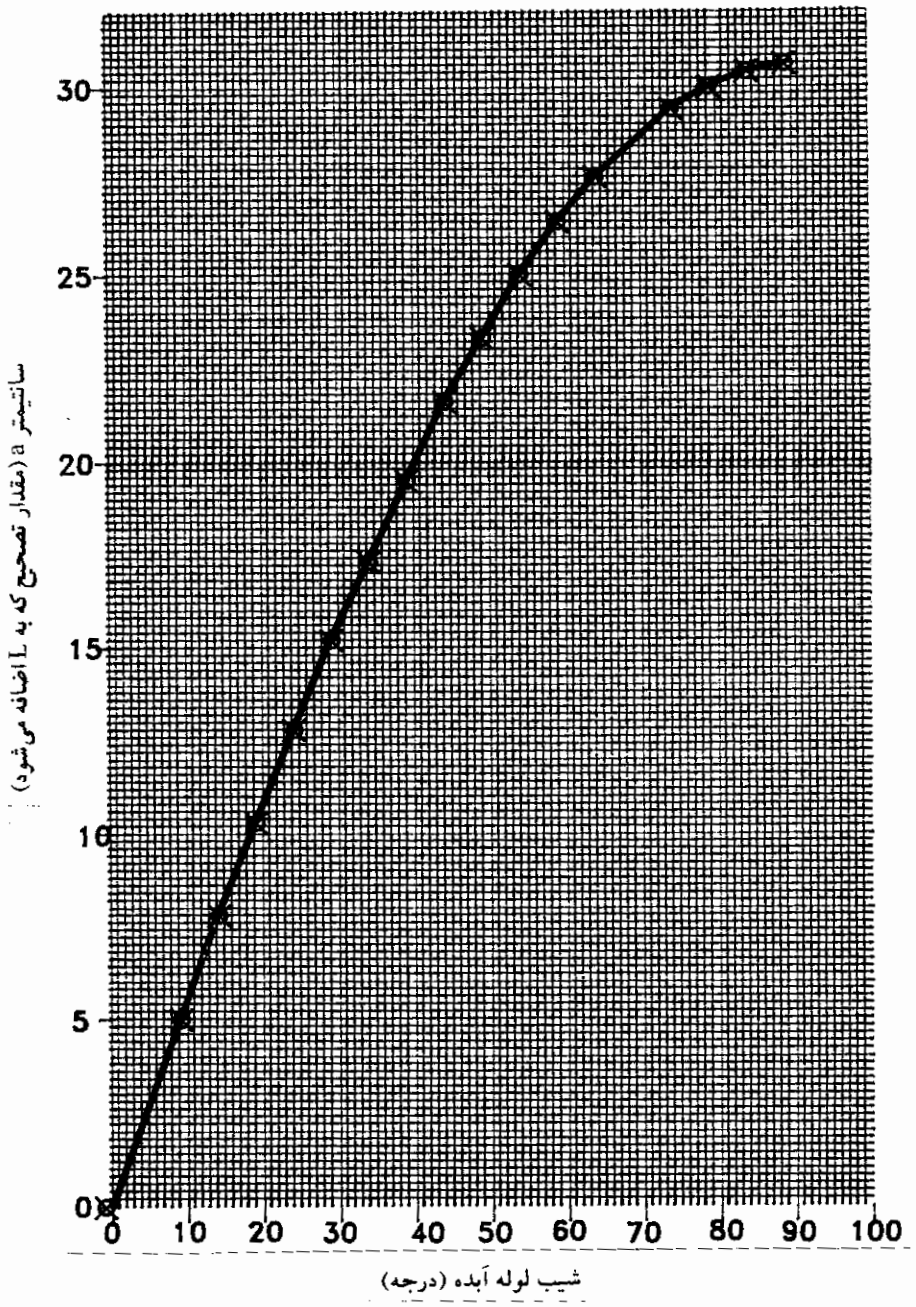
$$Q = 0.02484\ kL \qquad (۳-۳)$$



شکل ۳-۵ نحوه اندازه‌گیری آبدهی در لوله‌های مایل

جدول ۳-۲ ضریب k در لوله‌های مایل

قطر داخلی لوله	k	قطر داخلی لوله	k	قطر داخلی لوله	k	قطر داخلی لوله	k	قطر داخلی لوله	k	قطرداخلی لوله(اینچ)	k
۱۲	۸۱/۷	۱۰	۵۲/۳	۸	۲۹/۴	۶	۱۳/۱	۴	۳/۳	۲	
۱۲ ۱/۲	۸۵/۹	۱۰ ۱/۴	۵۵/۵	۸ ۱/۴	۳۱/۹	۶ ۱/۲	۱۴/۷	۴ ۱/۴	۴/۱	۲ ۱/۴	
۱۳	۹۰/۱	۱۰ ۱/۲	۵۹/۰	۸ ۱/۲	۳۴/۵	۶ ۱/۲	۱۶/۵	۴ ۱/۲	۵/۱	۲ ۱/۲	
۱۳ ۱/۲	۹۴/۴	۱۰ ۳/۴	۶۲/۵	۸ ۳/۴	۳۷/۲	۶ ۳/۴	۱۸/۶	۴ ۳/۴	۶/۲	۲ ۳/۴	
۱۴	۹۸/۹	۱۱	۶۵/۲	۹	۴۰/۰	۷	۲۰/۱	۵	۷/۳	۳	
۱۴ ۱/۲	۱۰۳/۰	۱۱ ۱/۴	۶۹/۹	۹ ۱/۴	۴۲/۹	۷ ۱/۴	۲۲/۵	۵ ۱/۴	۸/۶	۳ ۱/۴	
۱۵	۱۰۸/۰	۱۱ ۱/۲	۷۳/۷	۹ ۱/۲	۴۵/۴	۷ ۱/۲	۲۴/۷	۵ ۱/۲	۱۰/۰	۳ ۱/۲	
۱۶	۱۱۳/۰	۱۱ ۳/۴	۷۷/۷	۹ ۳/۴	۴۹/۰	۷ ۳/۴	۲۷/۰	۵ ۳/۴	۱۱/۵	۳ ۳/۴	



شکل ۳-۶ منحنی برآورد مقدار a در شرایطی که مقدار پرش آب از لوله شیب‌دار با خط کش جت معمولی اندازه‌گیری شده باشد.

مثلاً اگر طول پرش آب $e = ۴۰cm$ باشد و شیب لوله نسبت به سطح افق ۳۰° باشد. مقدار $a = ۱۵cm$ خواهد شد. بنابراین $L = ۴۰ + ۱۵ = ۵۵cm$ است.

ملاحظه می‌شود که با استفاده از رابطه شماره (۳-۳) و جدول شماره (۳-۲) می‌توان آبدهی را در لوله‌های افقی بدون در نظر گرفتن D (قطر لوله) در روابط قبلی نیز محاسبه کرد.

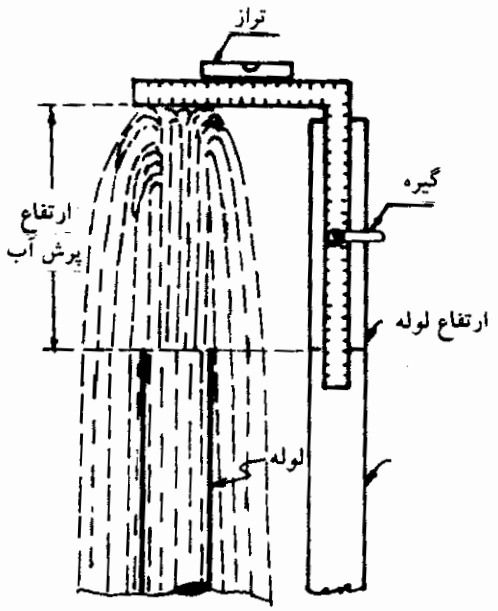
ج - اندازه‌گیری آبدهی در لوله‌های آبده قائم

وقتی که لوله آبده قائم باشد، می‌توان با اندازه‌گیری ارتفاع پرش آب از دهانه لوله نیز آبدهی را اندازه‌گیری کرد. برای این کار بازوی افقی گونیا با سطح آب در حال فوران مماس می‌شود و افقی بودن آن با یک تراز دستی کنترل می‌شود (شکل ۳-۷).

برای اندازه‌گیری مقدار آبدهی لوله‌های قائم، از رابطه زیر استفاده می‌شود :

$$Q = KD^2 \sqrt{h} \qquad (۴-۳)$$

که در آن K ضریب ثابت و برابر ۰/۲۲۲۷، D قطر لوله آبده برحسب اینچ، h ارتفاع جهش قائم آب از لوله برحسب سانتیمتر است و Q برحسب لیتر بر ثانیه به‌دست می‌آید.



شکل شماره ۳-۷ اندازه‌گیری آبدهی در لوله آبده قائم با استفاده از گونیای جت

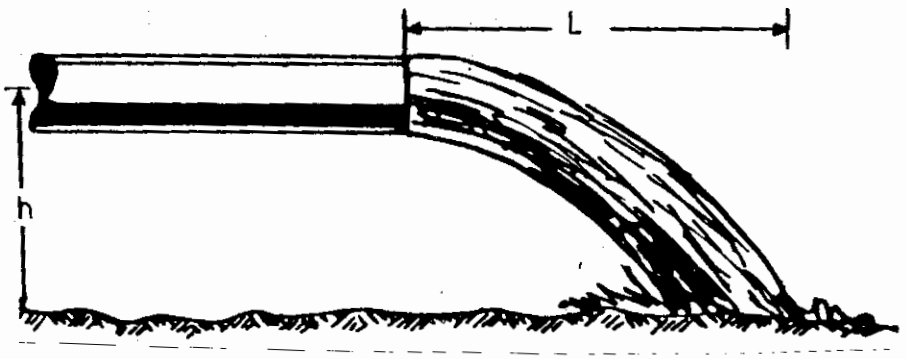
در جدول ۳ ضمیمه مقدار آبدهی در لوله‌های آبده قائم برحسب لیتر بر ثانیه ارائه شده است.

۳-۲-۱-۴ اندازه‌گیری آبدهی براساس رابطه سقوط آزاد اجسام

براساس رابطه سقوط آزاد اجسام نیز می‌توان مقدار آبدهی را برآورد کرد. با توجه به ارتفاع لوله آبده و فاصله افقی جهش آب (شکل ۳-۸) مقدار آبدهی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = A \frac{L}{\sqrt{(h/4.905)}} \qquad (۵-۳)$$

در این رابطه A سطح مقطع لوله آبده به متر مربع، L پرش افقی آب به متر، h فاصله عمودی از محور لوله آبده تا سطح زمین برحسب متر و Q آبدهی برحسب متر مکعب بر ثانیه است.



شکل ۳-۸ اندازه‌گیری آبدهی با توجه به رابطه سقوط آزاد اجسام

۳-۲-۱-۵ روشهای دیگر اندازه‌گیری آبدهی

برای اندازه‌گیری آبدهی در کانالها از روشهای مختلفی می‌توان استفاده کرد که مهمترین آنها عبارتند از :

- اندازه‌گیری آبدهی با استفاده از شناور
- اندازه‌گیری آبدهی به‌طریق سرریزها
- اندازه‌گیری آبدهی به‌طریق پارشال فلوم
- اندازه‌گیری آبدهی به‌طریق جریان‌سنج[1] (مولینه)

در آزمایشهای پمپاژ، اندازه‌گیری آبدهی با شناور از دقت کافی برخوردار نیست، ولی از روشهای دیگر به ویژه پارشال فلوم در شرایط مناسب می‌توان استفاده کرد.

1- Current - meter

از دیگر روشهای جدید اندازه‌گیری آبدهی، که در حال حاضر گران و در دسترس همگان نیست، می‌توان از شمارنده التراسونیک نام برد. این کنتور توسط الکترودهایی بر روی لوله خروجی چاه بسته می‌شود. هنگامی که لوله کاملاً پر باشد، سرعت آبی که از لوله عبور می‌کند مشخص و سپس آبدهی خروجی محاسبه می‌شود.

۳-۲-۲ وسایل اندازه‌گیری عمق سطح آب

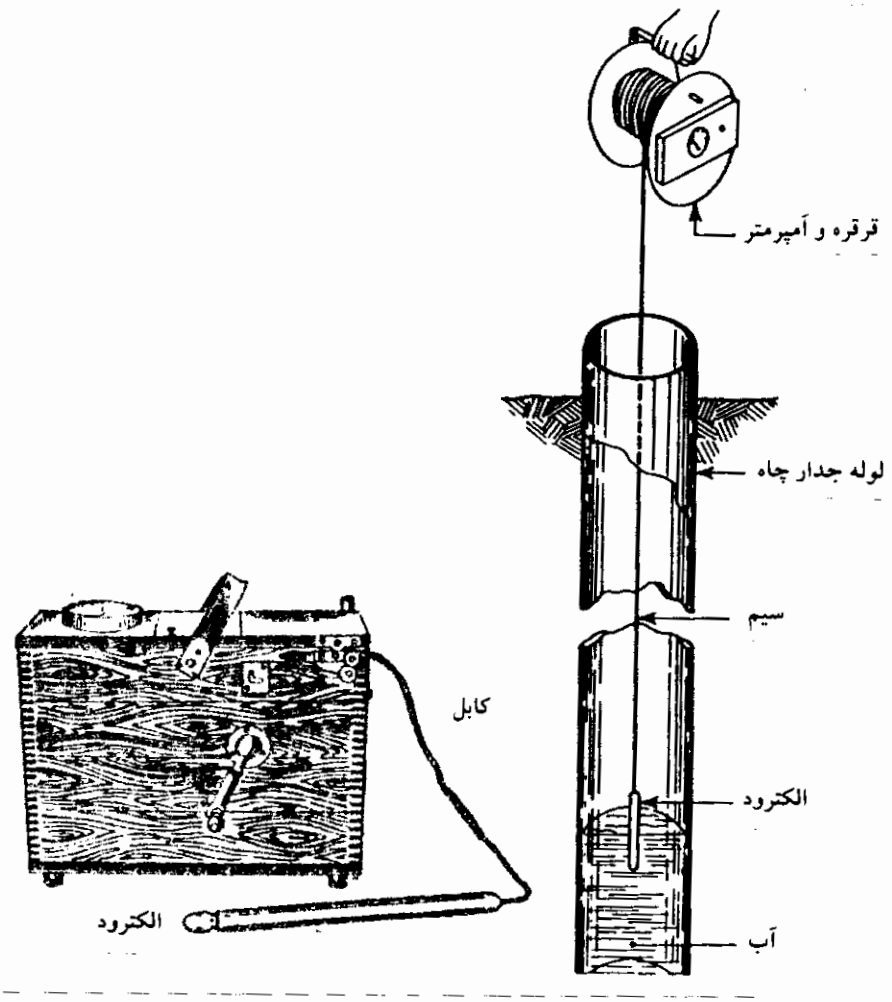
اندازه‌گیری دقیق و سریع عمق سطح آب در چاه اصلی و پیزومترها از ضروریات اساسی در آزمایشهای پمپاژ است. برای اندازه‌گیری عمق آب، وسایل مختلفی وجود دارد که از آن جمله می‌توان عمق‌یابهای الکتریکی و دستگاههای اندازه‌گیری خودکار را نام برد. برای اندازه‌گیری تقریبی عمق سطح آب نیز می‌توان از وسایلی مانند نوار مرطوب و لوله هوا استفاده کرد که به سبب نداشتن دقت کافی چندان کاربردی ندارد.

گرچه برای اندازه‌گیری تغییرات عمق سطح آب در چاه پمپاژی و یا پیزومترهای شعاع تأثیر ممکن است از دستگاههای خودکار و یا ثبات استفاده نمایند، ولی در اغلب موارد مخصوصاً درکشور ما برای انجام این اندازه‌گیریها از عمق‌یاب الکتریکی استفاده می‌شود. بنابراین باید چند دستگاه عمق‌یاب الکتریکی باتوجه به تعداد پیزومترها و با طول سیم کافی متناسب با عمق آب در چاه، بدون نقص فنی و کنترل شده در محل چاه تهیه و آماده شود.

معمولی‌ترین وسیله اندازه‌گیری عمق آب در چاهها در اغلب موارد عمق‌یاب (ژرفاسنج) الکتریکی است. طرز کار این دستگاه ساده است. الکترودی متصل به یک کابل، شامل یک جفت سیم عایق‌دار، به داخل چاه فرستاده می‌شود. وقتی الکترود با سطح آب تماس پیدا کند، جریان برق از سیم عبور می‌کند و یک آمپرمتر، چراغ یا بوق در سرچاه عبور جریان را نشان می‌دهد. باطریهای خشک معمولی نیز جریان را در سیم برقرار می‌سازند. گاهی به جای دو سیم از یک سیم عایق‌دار استفاده و سیم دوم به لوله جدار یا به زمین متصل می‌شود و بنابراین جریان برق از طریق این سیم و لوله جدار (یا زمین) برقرار می‌شود. با برخورد الکترود به سطح آب و بسته‌شدن مدار، عقربه آمپرمتر به حرکت در می‌آید، یا چراغ روشن می‌شود یا بوق به صدا در می‌آید. در این حال طول سیمی را که در داخل چاه است از بالای لوله جدار یا هر نقطه نشانه دیگر باید اندازه‌گیری کرد و به این ترتیب عمق آب را در چاه به دست آورد.

فواصل در طول سیم معمولاً برحسب متر یا نیم‌متر علامت‌گذاری شده است. عمق دقیق سطح آب (در حد سانتی‌متر) با استفاده از متر نواری فولادی از نزدیکترین نقطه علامت‌گذاری شده در روی سیم اندازه‌گیری می‌شود. برای بالابردن دقت اندازه‌گیریها باید در طول آزمایش پمپاژ، الکترود و کابل در چاه آویزان باقی بماند. این کار از هرگونه اشتباه ناشی از پیچ و تاب خوردن سیم براثر بالاکشیدن و پایین دادن مکرر آن، که می‌تواند موجب تغییر جزیی طول آن شود، جلوگیری می‌کند.

معمولاً برای جلوگیری از بروز اشتباه در اندازه‌گیریهای عمق سطح آب در چاههای پمپاژی با نصب لوله‌های فلزی به قطر خارجی $\frac{3}{4}$ اینچ (لوله‌های ترمی) در داخل چاه تا نزدیک توربین اندازه‌گیریهای عمق سطح آب با دقت بیشتری انجام می‌گیرد.



شکل ۳-۹ دو نوع عمق‌یاب الکتریکی

۳-۳ سایر وسایل مورد نیاز

علاوه بر تجهیزات مذکور لوازم دیگری از قبیل کرنومتر، متر نواری، دورسنج، برگه ثبت اندازه‌گیری‌ها (جدول شماره ۳-۳) کاغذهای لگاریتمی و نیمه‌لگاریتمی نیز لازم است. همچنین وجود وسایلی مانند دماسنج، هدایت‌سنج، pHمتر، بطری نمونه‌برداری آب برای ارسال نمونه به آزمایشگاه در حین آزمایش پمپاژ از نظر مطالعه دیگر خصوصیات آبخوان بسیار مفید است.

۳-۴ مسائل و مشکلات

۳-۴-۱ درصورت وجود روغن بر روی‌آب که مانع از اندازه‌گیری سطح آب می‌شود تمهیدات زیر به‌عمل می‌آید:

- با کنترل شیر قطره‌چکان از ریزش روغن اضافی در چاه جلوگیری شود.
- اگر سطح ایستابی نزدیک به سطح زمین باشد (کمتر از ۵ متر) با بستن پارچه کتان در سر میله‌ای و پائین فرستادن میله، روغن جذب پارچه کتان شده و سطح ایستابی قابل اندازه‌گیری خواهد شد (اصولاً وجود روغن در شروع پمپاژ مانع از اندازه‌گیری می‌شود).
- در حالتی که سطح ایستابی در عمق بیش از ۵ متری سطح زمین قرار گرفته باشد با نصب چوب‌پنبه‌ای در انتهای لوله ترمی و پائین بردن آن تا سطح ایستابی، اندازه‌گیری امکان‌پذیر می‌شود.

۳-۴-۲ در صورت توقف پمپاژ به علت نقص فنی موتور و یا قطع برق در حین آزمایش به صورت زیر عمل می‌شود:

اگر از زمان آزمایش حدود ۱ تا ۲ ساعت گذشته باشد آزمایش باید تکرار شود.

چنانچه زمان بیشتری از شروع آزمایش گذشته باشد، زمان و میزان افت در لحظه توقف آزمایش یادداشت می‌شود. پس از رفع نقص فنی و شروع مجدد پمپاژ تا زمان رسیدن به میزان افت قبلی، اندازه‌گیری لحظه‌ای ضرورت ندارد. پس از آن اندازه‌گیری افت سطح آب به صورت لحظه‌ای تا رسیدن به سطح دینامیک ادامه می‌یابد.

۳-۴-۳ تأثیرات جزر و مد : با اندازه‌گیری سطح ایستابی در چند روز قبل از شروع آزمایش تأثیرات جزر و مد که به‌صورت افت و خیز بر سطح آب تأثیر می‌گذارد و یادداشت مقدار آن، افت‌های اندازه‌گیری شده تصحیح می‌شود و سپس افت‌های تصحیح شده برای تجزیه و تحلیل بکار گرفته خواهد شد.

۳-۴-۴ نکات زیر هنگام استفاده از عمق‌یابهای الکتریکی باید مورد توجه قرار گیرد :

- برای اندازه‌گیری عمق سطح آب سعی شود از ابتدا تا خاتمه آزمایش از یک دستگاه عمق‌یاب استفاده شود تا از بروز خطاهای احتمالی جلوگیری به عمل آید.
- قبل از شروع اندازه‌گیریها باید از سالم بودن دستگاه عمق‌یاب اطمینان حاصل کرد
- در چاههای پمپاژی بدون لوله ترمی باید عمق‌یاب به آرامی داخل چاه شود، به ویژه در چاههایی که عمق سطح آب زیاد است، سریع فرستادن عمق‌یاب موجب پیچیدن سیم به دور لوله آبده پمپ خواهد شد
- در چاههای پمپاژی بهتر است طول وزنه‌های الکترود از ۵ سانتی‌متر بیشتر نباشد
- در مواردی که الکترود به مانعی در چاه برخورد کند وزن سیم داخل چاه نسبت به طول آن کمتر احساس می‌شود
- در مواقعی که سیم عمق‌یاب در داخل چاه گیر کند. باید با دقت و بدون کشیدن زیاد با تکان دادن ملایم سیم آن را آزاد کرد، در این حالت کلاچ زدن لحظه‌ای موتور در آزاد کردن سیم مؤثر است.

جدول شماره ....

برگ آزمایش پمپاژ

پروژه : ..... **تعداد پیزومتر :** ..... **عمق چاه :** .....

نام محل : ..... **موقعیت پیزومتر :** ..... **ارتفاع محل :** .....

نام مالک : ..... **فاصله پیزومتر از چاه :** ..... **نقطه نشانه اندازه‌گیری :** .....

شماره چاه (U.T.M) : ..... **نوع آزمایش :** ..... **عمق سطح استاتیک :** .....

زمان			عمق سطح آب (m)	افت s (m)	روش اندازه‌گیری :		آبدهی Q (lit/s)	افت تصحیح شده s_c (m)	$\frac{r^2}{t}$ مترمربع (m^2/min)	افت باقیمانده s' (m)	$\frac{t}{t'}$	ملاحظات نسبت تبدیل روزنه دور پمپ و ...
تاریخ	ساعت (hr)	دقیقه (min)			ارتفاع (in)	طول پرش (cm)						

نام آزمایش کننده : .....

۴- تحلیل نتایج آزمایشهای پمپاژ:

خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوانها که عمدتاً ضریب قابلیت انتقال و ضریب ذخیره هستند، از طریق ارزیابی نتایج آزمایشهای پمپاژ به‌دست می‌آیند. این آزمایشها به دو صورت آزمایش افت و آزمایش برگشت (جبران) انجام می‌شوند. در آزمایش افت، آبخوان با آبدهی ثابت آبکشی شده و در آزمایش برگشت با خاموش کردن پمپ بالا آمدن سطح آب در چاه اندازه‌گیری می‌شود. تغییرات سطح آب در آبخوان به صورت مخروط افت و یا بالاآمدگی تظاهر می‌کند. این مخروط‌ها هم‌شکل و مشابه بوده و گسترش جانبی آنها در طول زمان و از لحظه شروع آزمایش، به حجم آب تخلیه شده و یا افزوده شده و همچنین به اختصاصات هیدرولیکی آبخوان بستگی دارد. لذا تحلیل نتایج اندازه‌گیریهای مستمر تغییرات سطح آب، اختصاصات هیدرودینامیکی آبخوان را به‌دست خواهد داد.

برای تحلیل نتایج به‌دست آمده از آزمایشها دو روش عمومی در تعیین اختصاصات هیدرودینامیکی آبخوان وجود دارد، اول روش تحلیل به‌وسیله معادلات جریان ماندگار که ضریب قابلیت انتقال و نفوذپذیری آبخوان محاسبه می‌شود و دوم روش تحلیل توسط معادلات جریان غیرماندگار که افزون بر عوامل جریان ماندگار، ضریب ذخیره و شرایط مرزی آبخوان را نیز می‌توان به‌دست آورد.

۴-۱ معادلات جریان ماندگار[1]

این معادلات توسط تیم - فورش هایمر[2] ارائه و بر مبنای فرضیات ذیل بنا نهاده شده است:

- آبخوان در تمامی ضخامت همگن، همسان و دارای ضخامت یکنواخت است و به‌طور نامحدود گسترش دارد.
- چاه در تمام ضخامت آبخوان حفر شده و از تمامی آن آب دریافت می‌کند.
- آزمایش با آبدهی ثابت انجام می‌شود.
- ضریب قابلیت انتقال آبخوان نسبت به زمان و مکان ثابت است.
- جریان به طرف چاه افقی، شعاعی و آرام است.

در این آزمایش اندازه‌گیری افت سطح آب حداقل در دو پیزومتر که در نزدیکی چاه اصلی قرار گرفته‌اند، در طول دوره آزمایش و در فواصل زمانی معین تا ثابت شدن سطح آب ادامه می‌یابد.
برای تعیین مقدار نفوذپذیری (K) و ضریب قابلیت انتقال (T) از معادلات ذیل استفاده می‌شود:

- در آبخوان محصور:

$$K = \frac{Q\ln(r_2/r_1)}{2\pi M(s_1 - s_2)} \qquad (۴-۱)$$

1- steady state equations

2- Theim - Forchheimer

$$T = \frac{Q\ln(r_2/r_1)}{2\pi(s_1 - s_2)} \qquad (۲-۴)$$

که در آنها :

ln = لگاریتم طبیعی = ۲/۳ × لگاریتم اعشاری

K = هدایت هیدرولیکی یا هدایت هیدرولیکی آبخوان، $(\frac{L}{T})$

Q = آبدهی چاه مورد آزمایش، $(\frac{L^3}{T})$

M = ضخامت بخش اشباع آبخوان، (L)

T = KM = ضریب قابلیت انتقال ، $(\frac{L^2}{T})$

$r_n, \ldots, r_2, r_1$ = فواصل افقی چاههای پیزومتر از چاه اصلی، (L)

$s_n, \ldots, s_2, s_1$ = افت در چاههای پیزومتر در فواصل $r_n, \ldots, r_2, r_1$ از چاه اصلی، (L)

با استفاده از معادلات فوق مقادیر K و T را می‌توان با به‌کارگیری افت (s) و در یک زمان معین در دو چاه پیزومتر یا بیشتر که در فواصل مختلف نسبت به چاه اصلی قرار گرفته‌اند، محاسبه کرد.

مثال :

اطلاعات ذیل مربوط به یک آزمایش پمپاژ با دو پیزومتر است :

ضخامت بخش اشباع آبخوان (متر) M = ۱۰۰

مترمکعب بر روز ۸۶۴۰ ⇐ لیتر بر ثانیه Q = ۱۰۰

فواصل پیزومترها ۱۰۰ و ۲۰۰ متر و افت‌های اندازه‌گیری شده در زمانی که سطح آب در پیزومترها ثابت شده به ترتیب برابر ۵ و ۴ متر است.

حل :

$$T = \frac{۸۶۴۰ \times \ln(۲۰۰/۱۰۰)}{۲\pi \times (۵-۴)} = ۹۵۳ \text{ مترمربع بر روز}$$

در آبخوانهای آزاد که افت‌ها کمتر از ده درصد ضخامت آبخوان باشد، می‌توان برای تعیین مقدار نفوذپذیری (K) و ضریب قابلیت انتقال (T) از معادلات ذیل استفاده کرد.

$$K = \frac{Q\ln(r_2/r_1)}{\pi(h^2_2 - h^2_1)} \qquad (۳-۴)$$

$$T = \frac{QM\ln(r_2/r_1)}{\pi(h^2_2 - h^2_1)} \qquad (۴-۴)$$

که در آنها :

$h_1, h_2, \dots, h_n$ = ارتفاع سطح ایستابی آبخوان نسبت به سطح مبنا در فواصل $r_1, r_2, \dots, r_n$ از چاه مورد آزمایش، (L) است.

توضیح دیگر نمادهای به‌کار رفته در بالا آمده است.

افت‌های بیش از ده درصد ضخامت آبخوان، مناسب برای تحلیل نبوده و محاسبات ضریب قابلیت انتقال و نفوذپذیری به‌دست آمده قابل قبول نیست.

۲-۴ معادلات جریانهای غیرماندگار[1]:

این معادلات برای تحلیل خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوانهائی که آزمایشهای آنها با زمان در تغییر است، به‌کار می‌رود. فرضیاتی که این معادلات براساس آنها بنا نهاده شده عبارتند از :

- چاه با آبدهی ثابت پمپاژ شود.
- آبخوان محصور، افقی، همگن، ایزوتروپ و دارای ضخامت یکنواخت است و به‌طور نامحدود در ناحیه گسترش دارد.
- قطر چاه مورد آزمایش ناچیز است. چاه در تمامی ضخامت آبخوان حفر شده است.
- جریان به طرف چاه، شعاعی، افقی و آرام است.
- آب خارج شده، بلافاصله از ذخیره آبخوان در محدوده تحت تأثیر پمپاژ بیرون آمده و موجب افت بار فشار در آبخوان می‌شود.
- ضریب قابلیت انتقال و ضریب ذخیره آبخوان در زمان و مکان ثابت است.

معادلات شرایط غیرماندگار یا گذرا مستقیماً برای آبخوانهای محصور کاربرد دارد و با محدودیت‌هائی می‌توان از این معادلات در آبخوانهای نامحصور استفاده کرد. این محدودیت‌ها مربوط به درصد افت‌های اندازه‌گیری شده در چاههای پیزومتر در مقابل کل ضخامت آبخوان است. چنانچه افت اندازه‌گیری شده بیش از ۲۵ درصد مجموع ضخامت آبخوان نامحصور باشد، نمی‌توان از معادلات جریانهای غیرماندگار استفاده کرد. اما چنانچه افت اندازه‌گیری شده کمتر از ۱۰ درصد مجموع ضخامت آبخوان باشد، خطای ناچیز و قابل چشم‌پوشی در محاسبات به‌وجود می‌آورد. در شرایطی که افت اندازه‌گیری شده بین ۱۰ تا ۲۵ درصد مجموع ضخامت آبخوان نامحصور باشد با تصحیح افت اندازه‌گیری شده که توسط ژاکوب به صورت رابطه ذیل ارائه شده، این معادلات برای تحلیل آزمایش کاربرد دارد.

1- unsteady state equations

$$s = s' - \frac{s^2}{2M} \qquad (۴-۵)$$

که در آن :

s = افت اندازه‌گیری شده در پیزومترها (متر)

M = ضخامت بخش اشباع آبخوان قبل از آزمایش (متر)

s' = افت تصحیح شده (متر)

معادله جریان غیرماندگار کاربرد گسترده‌ای داشته و توسط تیس[1] ارائه شده که عبارتست از :

$$s = \frac{Q}{4\pi T}\int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u}\,du$$

معادله بالا را می‌توان با سری نامحدود جایگزین کرد. در نتیجه معادله تیس به صورت زیر در می‌آید:

$$s = \frac{Q}{4\pi T}\left[-0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2\times 2!} + \frac{u^3}{3\times 3!} + \frac{u^4}{4\times 4!} + \ldots\right] \qquad (۴-۶)$$

که در آن :

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \qquad (۴-۷)$$

و

s = افت در پیزومتر (متر)

Q = آبدهی ثابت چاه (مترمکعب بر روز)

T = قابلیت انتقال آبخوان (مترمربع بر روز)

r = فاصله پیزومتر از چاه اصلی (متر)

S = ضریب ذخیره آبخوان

t = زمان از شروع پمپاژ (روز)

عبارت داخل کروشه در (معادله ۴-۶) را "تابع چاه[2]" می‌خوانند و با نماد $W(u)$ نشان می‌دهند. به این ترتیب (معادله ۴-۶) را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد :

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \qquad (۴-۸)$$

1- Theis

2- well function

گرچه برآورد مقادیر $W(u)$ از طریق محاسبه مشکل نیست، ولی معمولاً تغییرات آن را برحسب مقادیر مختلف u به صورت جدول نمایش می‌دهند (جدول ۴-۱)

معادله عدم تعادل تیس (معادله ۴-۶)، امکان محاسبه ضرایب T و S را به وسیله آزمایش پمپاژ با آبدهی ثابت (Q) و اندازه‌گیری تغییرات افت سطح آب (s) نسبت به زمان (t) در پیزومتر یا پیزومترهایی که به فاصله r از چاه اصلی قرار گرفته‌اند، فراهم می‌کند. این معادله مورد استفاده وسیعی دارد و عموماً به معادله تعادل ترجیح داده می‌شود، چون که می‌توان اولاً مقدار S را نیز محاسبه کرد، ثانیاً با وجود یک پیزومتر نیز انجام آزمایش امکان‌پذیر است (حتی بدون پیزومتر و فقط با آزمایش در چاه اصلی نیز می‌توان فقط T را برآورد کرد)، ثالثاً در زمان کوتاه‌تری می‌توان آزمایش پمپاژ را انجام داده و نیازی به ادامه پمپاژ تا رسیدن به حالت ماندگار نیست.

۴-۲-۱ راه‌حل ترسیمی تیس برای محاسبه T و S

برای پیداکردن T و S (معادلات ۴-۶ و ۴-۸) را به صورت زیر بازنویسی می‌کنیم :

$$T = \frac{Q}{4\pi s} W(u) \qquad (۹-۴)$$

$$S = \frac{4Tu}{r^2/t} \qquad (۱۰-۴)$$

از آنجاکه u و $W(u)$ خود تابعی از T و S هستند. بنابراین روابط فوق را نمی‌توان مستقیماً حل کرد. تیس راه‌حلی ترسیمی برای برآورد T و S ارائه داده است.

پس از انجام آزمایش پمپاژ با آبدهی ثابت در فاصله‌ای از زمان (مثلاً یک روز)، مقادیر افت در یک یا چند پیزومتر اطراف چاه اصلی، و احتمالاً در خود چاه، نسبت به زمان اندازه‌گیری می‌شود. فواصل زمانی اندازه‌گیری به صورتی است که در مباحث قبل بدان اشاره شد. نتایج آزمایش به صورت جداولی که تغییرات افت را نسبت به زمان نشان می‌دهد در سر چاه تهیه می‌شود (جدول شماره ۴-۲). آنگاه با داشتن داده‌های آزمایش پمپاژ به صورت زیر عمل می‌کنیم :

اولین قدم، تهیه منحنی تغییرات $W(u)$ نسبت به u در روی محورهای مختصات لگاریتمی است. این منحنی را می‌توان به صورت دستی با استفاده از (جدول ۴-۱)، یا داشتن نرم افزار لازم با استفاده از برنامه کامپیوتری رسم کرد. این منحنی را اصطلاحاً منحنی نمونه تیس (شکل ۴-۱) می‌نامند. منحنی نمونه تیس معمولاً از قبل بر روی کاغذ شفاف رسم شده است. می‌توان به جای منحنی فوق منحنی تغییرات $W(u)$ نسبت به $\frac{1}{u}$ را رسم کرد که به آن منحنی نمونه معکوس تیس می‌گویند.

جدول ۴-۱ مقادیر W(u) بر حسب (u)

N \ u	$N\times10^{-15}$	$N\times10^{-14}$	$N\times10^{-13}$	$N\times10^{-12}$	$N\times10^{-11}$	$N\times10^{-10}$	$N\times10^{-9}$	$N\times10^{-8}$	$N\times10^{-7}$	$N\times10^{-6}$	$N\times10^{-5}$	$N\times10^{-4}$	$N\times10^{-3}$	$N\times10^{-2}$	$N\times10^{-1}$	N
1.0	33.9616	31.6590	29.3564	27.0538	24.7512	22.4486	20.1460	17.8435	15.5409	13.2383	10.9357	8.6332	6.3315	4.0379	1.8229	0.2194
1.1	33.8662	31.5637	29.2611	26.9585	24.6559	22.3533	20.0507	17.7482	15.4456	13.1430	10.8404	8.5379	6.2363	3.9436	1.7371	.1860
1.2	33.7792	31.4767	29.1741	26.8715	24.5689	22.2663	19.9637	17.6611	15.3586	13.0560	10.7534	8.4509	6.1494	3.8576	1.6595	.1584
1.3	33.6992	31.3966	29.0940	26.7914	24.4889	22.1863	19.8837	17.5811	15.2785	12.9759	10.6734	8.3709	6.0695	3.7785	1.5889	.1355
1.4	33.6251	31.3225	29.0199	26.7173	24.4147	22.1122	19.8096	17.5070	15.2044	12.9018	10.5993	8.2968	5.9955	3.7054	1.5241	.1162
1.5	33.5561	31.2535	28.9509	26.6483	24.3458	22.0432	19.7406	17.4380	15.1354	12.8328	10.5303	8.2278	5.9266	3.6374	1.4645	.1000
1.6	33.4916	31.1890	28.8864	26.5838	24.2812	21.9786	19.6760	17.3735	15.0709	12.7683	10.4657	8.1634	5.8621	3.5739	1.4092	.08631
1.7	33.4309	31.1283	28.8258	26.5232	24.2206	21.9180	19.6154	17.3128	15.0103	12.7077	10.4051	8.1027	5.8016	3.5143	1.3578	.07465
1.8	33.3738	31.0712	28.7686	26.4660	24.1634	21.8608	19.5583	17.2557	14.9531	12.6505	10.3479	8.0455	5.7446	3.4581	1.3089	.06471
1.9	33.3197	31.0171	28.7145	26.4119	24.1094	21.8068	19.5042	17.2016	14.8990	12.5964	10.2939	7.9915	5.6906	3.4050	1.2649	.05620
2.0	33.2684	30.9658	28.6632	26.3607	24.0581	21.7555	19.4529	17.1503	14.8477	12.5451	10.2426	7.9402	5.6394	3.3547	1.2227	.04890
2.1	33.2196	30.9170	28.6145	26.3119	24.0093	21.7067	19.4041	17.1015	14.7989	12.4964	10.1938	7.8914	5.5907	3.3069	1.1829	.04261
2.2	33.1731	30.8705	28.5679	26.2653	23.9628	21.6602	19.3576	17.0550	14.7524	12.4498	10.1473	7.8449	5.5443	3.2614	1.1454	.03719
2.3	33.1286	30.8261	28.5235	26.2209	23.9183	21.6157	19.3131	17.0106	14.7080	12.4054	10.1028	7.8004	5.4999	3.2179	1.1099	.03250
2.4	33.0861	30.7835	28.4809	26.1783	23.8758	21.5732	19.2706	16.9680	14.6654	12.3628	10.0603	7.7579	5.4575	3.1763	1.0762	.02844
2.5	33.0453	30.7427	28.4401	26.1375	23.8349	21.5323	19.2298	16.9272	14.6246	12.3220	10.0194	7.7172	5.4167	3.1365	1.0443	.02491
2.6	33.0060	30.7035	28.4009	26.0983	23.7957	21.4931	19.1905	16.8880	14.5854	12.2828	9.9802	7.6779	5.3776	3.0983	1.0139	.02185
2.7	32.9683	30.6657	28.3631	26.0606	23.7580	21.4554	19.1528	16.8502	14.5476	12.2450	9.9425	7.6401	5.3400	3.0615	.9849	.01918
2.8	32.9319	30.6294	28.3268	26.0242	23.7216	21.4190	19.1164	16.8138	14.5113	12.2087	9.9061	7.6038	5.3037	3.0261	.9573	.01686
2.9	32.8968	30.5943	28.2917	25.9891	23.6865	21.3839	19.0813	16.7788	14.4762	12.1736	9.8710	7.5687	5.2687	2.9920	.9309	.01482
3.0	32.8629	30.5604	28.2578	25.9552	23.6526	21.3500	19.0474	16.7449	14.4423	12.1397	9.8371	7.5348	5.2349	2.9591	.9057	.01305
3.1	32.8302	30.5276	28.2250	25.9224	23.6198	21.3172	19.0146	16.7121	14.4095	12.1069	9.8043	7.5020	5.2022	2.9273	.8815	.01149
3.2	32.7984	30.4958	28.1932	25.8907	23.5880	21.2855	18.9829	16.6803	14.3777	12.0751	9.7726	7.4703	5.1706	2.8965	.8583	.01013
3.3	32.7676	30.4651	28.1625	25.8599	23.5573	21.2547	18.9521	16.6495	14.3470	12.0444	9.7418	7.4395	5.1399	2.8668	.8361	.008939
3.4	32.7378	30.4352	28.1326	25.8300	23.5274	21.2249	18.9223	16.6197	14.3171	12.0145	9.7120	7.4097	5.1102	2.8379	.8147	.007891
3.5	32.7088	30.4062	28.1036	25.8010	23.4985	21.1959	18.8933	16.5907	14.2881	11.9855	9.6830	7.3807	5.0813	2.8099	.7942	.006970
3.6	32.6806	30.3780	28.0755	25.7729	23.4703	21.1677	18.8651	16.5625	14.2599	11.9574	9.6548	7.3526	5.0532	2.7827	.7745	.006160
3.7	32.6532	30.3506	28.0481	25.7455	23.4429	21.1403	18.8377	16.5351	14.2325	11.9300	9.6274	7.3252	5.0259	2.7563	.7554	.005448
3.8	32.6266	30.3240	28.0214	25.7188	23.4162	21.1136	18.8110	16.5085	14.2059	11.9033	9.6007	7.2985	4.9993	2.7306	.7371	.004820
3.9	32.6006	30.2980	27.9954	25.6928	23.3902	21.0877	18.7851	16.4825	14.1799	11.8773	9.5748	7.2725	4.9735	2.7056	.7194	.004267
4.0	32.5753	30.2727	27.9701	25.6675	23.3649	21.0623	18.7598	16.4572	14.1546	11.8520	9.5495	7.2472	4.9482	2.6813	.7024	.003779
4.1	32.5506	30.2480	27.9454	25.6428	23.3402	21.0376	18.7351	16.4325	14.1299	11.8273	9.5248	7.2225	4.9236	2.6576	.6859	.003349
4.2	32.5265	30.2239	27.9213	25.6187	23.3161	21.0136	18.7110	16.4084	14.1058	11.8032	9.5007	7.1985	4.8997	2.6344	.6700	.002969
4.3	32.5029	30.2004	27.8978	25.5952	23.2926	20.9900	18.6874	16.3884	14.0823	11.7797	9.4771	7.1749	4.8762	2.6119	.6546	.002633
4.4	32.4800	30.1774	27.8748	25.5722	23.2696	20.9670	18.6644	16.3619	14.0593	11.7567	9.4541	7.1520	4.8533	2.5899	.6397	.002336
4.5	32.4575	30.1549	27.8523	25.5497	23.2471	20.9446	18.6420	16.3394	14.0368	11.7342	9.4317	7.1295	4.8310	2.5684	.6253	.002073
4.6	32.4355	30.1329	27.8303	25.5277	23.2252	20.9226	18.6200	16.3174	14.0148	11.7122	9.4097	7.1075	4.8091	2.5474	.6114	.001841
4.7	32.4140	30.1114	27.8088	25.5062	23.2037	20.9011	18.5985	16.2959	13.9933	11.6907	9.3882	7.0860	4.7877	2.5268	.5979	.001635
4.8	32.3929	30.0904	27.7878	25.4852	23.1826	20.8800	18.5774	16.2748	13.9723	11.6697	9.3671	7.0650	4.7667	2.5068	.5848	.001453
4.9	32.3723	30.0697	27.7672	25.4646	23.1620	20.8594	18.5568	16.2542	13.9516	11.6491	9.3465	7.0444	4.7462	2.4871	.5721	.001291

ادامه جدول ۴-۱ مقادیر W(u) بر حسب (u)

5.0	32.3821	30.0495	27.7470	25.4444	23.1418	20.8392	18.5366	16.2340	13.9314	11.6289	9.3263	7.0242	4.7261	2.4679	.5598	.001148
5.1	32.3323	30.0297	27.7271	25.4246	23.1220	20.8194	18.5168	16.2142	13.9116	11.6091	9.3065	7.0044	4.7064	2.4491	.5478	.001021
5.2	32.3129	30.0103	27.7077	25.4051	23.1026	20.8000	18.4974	16.1948	13.8922	11.5896	9.2871	6.9850	4.6871	2.4306	.5362	.0009086
5.3	32.2939	29.9913	27.6887	25.3861	23.0835	20.7809	18.4783	16.1758	13.8732	11.5706	9.2681	6.9659	4.6681	2.4126	.5250	.0008086
5.4	32.2752	29.9726	27.6700	25.3674	23.0648	20.7622	18.4596	16.1571	13.8545	11.5519	9.2494	6.9473	4.6495	2.3948	.5140	.0007198
5.5	32.2568	29.9542	27.6516	25.3491	23.0465	20.7439	18.4413	16.1387	13.8361	11.5336	9.2310	6.9289	4.6313	2.3775	.5034	.0006409
5.6	32.2388	29.9362	27.6336	25.3310	23.0285	20.7259	18.4233	16.1207	13.8181	11.5155	9.2130	6.9109	4.6134	2.3604	.4930	.0005708
5.7	32.2211	29.9185	27.6159	25.3133	23.0108	20.7082	18.4056	16.1030	13.8004	11.4978	9.1953	6.8932	4.5958	2.3437	.4830	.0005085
5.8	32.2037	29.9011	27.5985	25.2959	22.9934	20.6908	18.3882	16.0856	13.7830	11.4804	9.1779	6.8758	4.5785	2.3273	.4732	.0004532
5.9	32.1866	29.8840	27.5814	25.2789	22.9763	20.6737	18.3711	16.0685	13.7659	11.4633	9.1608	6.8588	4.5615	2.3111	.4637	.0004039
6.0	32.1698	29.8672	27.5646	25.2620	22.9595	20.6569	18.3543	16.0517	13.7491	11.4465	9.1440	6.8420	4.5448	2.2953	.4544	.0003601
6.1	32.1533	29.8507	27.5481	25.2455	22.9429	20.6403	18.3378	16.0352	13.7326	11.4300	9.1275	6.8254	4.5283	2.2797	.4454	.0003211
6.2	32.1370	29.8344	27.5318	25.2293	22.9267	20.6241	18.3215	16.0189	13.7163	11.4138	9.1112	6.8092	4.5122	2.2645	.4366	.0002864
6.3	32.1210	29.8184	27.5158	25.2133	22.9107	20.6081	18.3055	16.0029	13.7003	11.3978	9.0952	6.7932	4.4963	2.2494	.4280	.0002555
6.4	32.1053	29.8027	27.5001	25.1975	22.8949	20.5923	18.2898	15.9872	13.6846	11.3820	9.0795	6.7775	4.4806	2.2346	.4197	.0002279
6.5	32.0898	29.7872	27.4846	25.1820	22.8794	20.5768	18.2742	15.9717	13.6691	11.3665	9.0640	6.7620	4.4652	2.2201	.4115	.0002034
6.6	32.0745	29.7719	27.4693	25.1667	22.8641	20.5616	18.2590	15.9564	13.6538	11.3512	9.0487	6.7467	4.4501	2.2058	.4036	.0001816
6.7	32.0595	29.7569	27.4543	25.1517	22.8491	20.5465	18.2439	15.9414	13.6388	11.3362	9.0337	6.7317	4.4351	2.1917	.3959	.0001621
6.8	32.0446	29.7421	27.4395	25.1369	22.8343	20.5317	18.2291	15.9265	13.6240	11.3214	9.0189	6.7169	4.4204	2.1779	.3883	.0001448
6.9	32.0300	29.7275	27.4249	25.1223	22.8197	20.5171	18.2145	15.9119	13.6094	11.3068	9.0043	6.7023	4.4059	2.1643	.3810	.0001293
7.0	32.0156	29.7131	27.4105	25.1079	22.8053	20.5027	18.2001	15.8976	13.5950	11.2924	8.9899	6.6879	4.3916	2.1508	.3738	.0001155
7.1	32.0015	29.6989	27.3963	25.0937	22.7911	20.4885	18.1860	15.8834	13.5808	11.2782	8.9757	6.6737	4.3775	2.1376	.3668	.0001032
7.2	31.9875	29.6849	27.3823	25.0797	22.7771	20.4746	18.1720	15.8694	13.5668	11.2642	8.9617	6.6598	4.3636	2.1246	.3599	.00009219
7.3	31.9737	29.6711	27.3685	25.0659	22.7633	20.4608	18.1582	15.8556	13.5530	11.2504	8.9479	6.6460	4.3500	2.1118	.3532	.00008239
7.4	31.9601	29.6575	27.3549	25.0523	22.7497	20.4472	18.1446	15.8420	13.5394	11.2368	8.9343	6.6324	4.3364	2.0991	.3467	.00007364
7.5	31.9467	29.6441	27.3415	25.0389	22.7363	20.4337	18.1311	15.8286	13.5260	11.2234	8.9209	6.6190	4.3231	2.0867	.3403	.00006583
7.6	31.9334	29.6308	27.3282	25.0257	22.7231	20.4205	18.1179	15.8153	13.5127	11.2102	8.9076	6.6057	4.3100	2.0744	.3341	.00005886
7.7	31.9203	29.6178	27.3152	25.0126	22.7100	20.4074	18.1048	15.8022	13.4997	11.1971	8.8946	6.5927	4.2970	2.0623	.3280	.00005263
7.8	31.9074	29.6048	27.3023	24.9997	22.6971	20.3945	18.0919	15.7893	13.4868	11.1842	8.8817	6.5798	4.2842	2.0503	.3221	.00004707
7.9	31.8947	29.5921	27.2895	24.9869	22.6844	20.3818	18.0792	15.7766	13.4740	11.1714	8.8689	6.5671	4.2716	2.0386	.3163	.00004210
8.0	31.8821	29.5795	27.2769	24.9744	22.6718	20.3692	18.0666	15.7640	13.4614	11.1589	8.8563	6.5545	4.2591	2.0269	.3106	.00003767
8.1	31.8697	29.5671	27.2645	24.9619	22.6594	20.3568	18.0542	15.7516	13.4490	11.1464	8.8439	6.5421	4.2468	2.0155	.3050	.00003370
8.2	31.8574	29.5548	27.2523	24.9497	22.6471	20.3445	18.0419	15.7393	13.4367	11.1342	8.8317	6.5298	4.2346	2.0042	.2996	.00003015
8.3	31.8453	29.5427	27.2401	24.9375	22.6350	20.3324	18.0298	15.7272	13.4246	11.1220	8.8195	6.5177	4.2226	1.9930	.2943	.00002699
8.4	31.8333	29.5307	27.2282	24.9256	22.6230	20.3204	18.0178	15.7152	13.4126	11.1101	8.8076	6.5057	4.2107	1.9820	.2891	.00002415
8.5	31.8215	29.5189	27.2163	24.9137	22.6112	20.3086	18.0060	15.7034	13.4008	11.0982	8.7957	6.4939	4.1990	1.9711	.2840	.00002162
8.6	31.8098	29.5072	27.2046	24.9020	22.5995	20.2969	17.9943	15.6917	13.3891	11.0865	8.7840	6.4822	4.1874	1.9604	.2790	.00001936
8.7	31.7982	29.4957	27.1931	24.8905	22.5879	20.2853	17.9827	15.6801	13.3776	11.0750	8.7725	6.4707	4.1759	1.9498	.2742	.00001733
8.8	31.7868	29.4842	27.1816	24.8790	22.5765	20.2739	17.9713	15.6687	13.3661	11.0635	8.7610	6.4592	4.1646	1.9393	.2694	.00001552
8.9	31.7755	29.4729	27.1703	24.8678	22.5652	20.2626	17.9600	15.6574	13.3548	11.0523	8.7497	6.4480	4.1534	1.9290	.2647	.00001390
9.0	31.7643	29.4618	27.1592	24.8566	22.5540	20.2514	17.9488	15.6462	13.3437	11.0411	8.7386	6.4368	4.1423	1.9187	.2602	.00001245
9.1	31.7533	29.4507	27.1481	24.8455	22.5429	20.2404	17.9378	15.6352	13.3326	11.0300	8.7275	6.4258	4.1313	1.9087	.2557	.00001115
9.2	31.7424	29.4398	27.1372	24.8346	22.5320	20.2294	17.9268	15.6243	13.3217	11.0191	8.7166	6.4148	4.1205	1.8987	.2513	.000009988
9.3	31.7315	29.4290	27.1264	24.8238	22.5212	20.2186	17.9160	15.6135	13.3109	11.0083	8.7058	6.4040	4.1098	1.8888	.2470	.000008948
9.4	31.7208	29.4183	27.1157	24.8131	22.5105	20.2079	17.9053	15.6028	13.3002	10.9976	8.6951	6.3934	4.0992	1.8791	.2429	.000008018
9.5	31.7103	29.4077	27.1051	24.8025	22.4999	20.1973	17.8948	15.5922	13.2896	10.9870	8.6845	6.3828	4.0887	1.8695	.2387	.000007185
9.6	31.6998	29.3972	27.0946	24.7920	22.4895	20.1869	17.8843	15.5817	13.2791	10.9765	8.6740	6.3723	4.0784	1.8599	.2347	.000006439
9.7	31.6894	29.3868	27.0843	24.7817	22.4791	20.1765	17.8739	15.5713	13.2688	10.9662	8.6637	6.3620	4.0681	1.8505	.2308	.000005771
9.8	31.6792	29.3766	27.0740	24.7714	22.4688	20.1663	17.8637	15.5611	13.2585	10.9559	8.6534	6.3517	4.0579	1.8412	.2269	.000005173
9.9	31.6690	29.3664	27.0639	24.7613	22.4587	20.1561	17.8535	15.5509	13.2483	10.9458	8.6433	6.3416	4.0479	1.8320	.2231	.000004637

قدم بعدی پیاده کردن مقادیر s (به متر) بر حسب $\frac{r^2}{t}$ (به متر مربع بر دقیقه) بر روی کاغذ لگاریتمی با همان مقیاس منحنی نمونه تیس است. گرچه در معادله تیس واحد زمان بر حسب روز است ولی معمولاً در روی نمودار برحسب دقیقه در نظر گرفته می‌شود (یعنی همان واحدی که غالباً در صحرا اندازه‌گیری صورت می‌گیرد). اگر از منحنی نمونه معکوس تیس استفاده شود باید نمودار تغییرات s به $\frac{t}{r^2}$ رسم شود.

آنگاه نمودار منحنی نمونه تیس و نمودار داده‌های صحرایی را روی هم قرار داده و با جابه‌جا کردن آنها در جهات افقی و قائم، در حالتی که محورها کاملاً موازی باشند، آنها را بر هم منطبق می‌کنیم (شکل ۴-۱). یک نقطه دلخواه (نقطه انطباق[1]) انتخاب می‌شود. لازم نیست که نقطه انطباق روی منحنی باشد. اگر بتوان محل تقاطع خطهای $W(u)=1$ و $u=1$ را انتخاب کرد، محاسبات راحت‌تر است. مختصات نقطه انطباق را از هر دو منحنی یادداشت می‌شود، در نتیجه چهار مقدار $W(u)$، u، s و $\frac{r^2}{t}$ وابسته به هم به دست می‌آید.

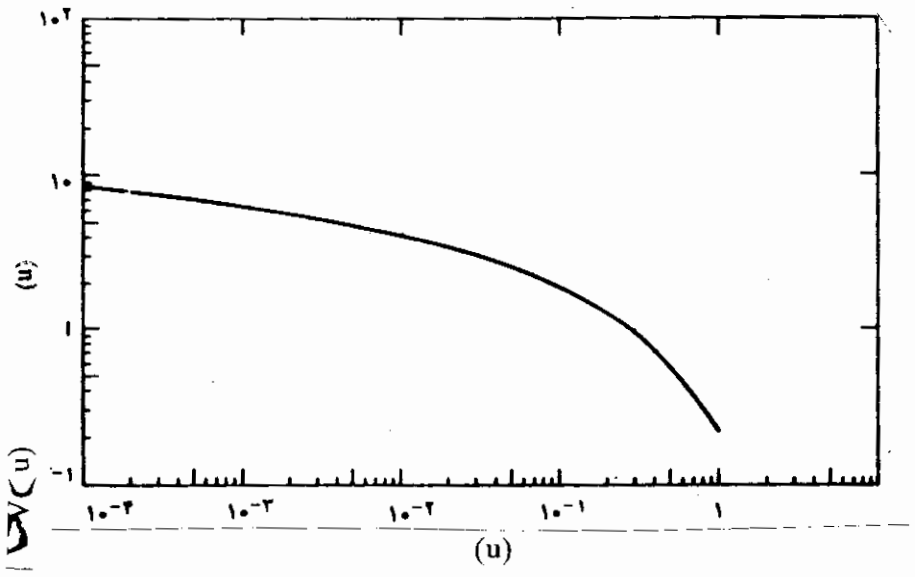
آخرین قدم در روش تیس، قراردادن مقادیر Q، s و $W(u)$ نقطه انطباق در (رابطه ۴-۹) و محاسبه ضریب T است. پس از محاسبه T مقدار آن را همراه با مقادیر $\frac{r^2}{t}$ و u نقطه انطباق در (رابطه ۴-۱۰) قرار می‌گیرند و ضریب ذخیره (S) آبخوان محاسبه می‌شود.

توضیح :

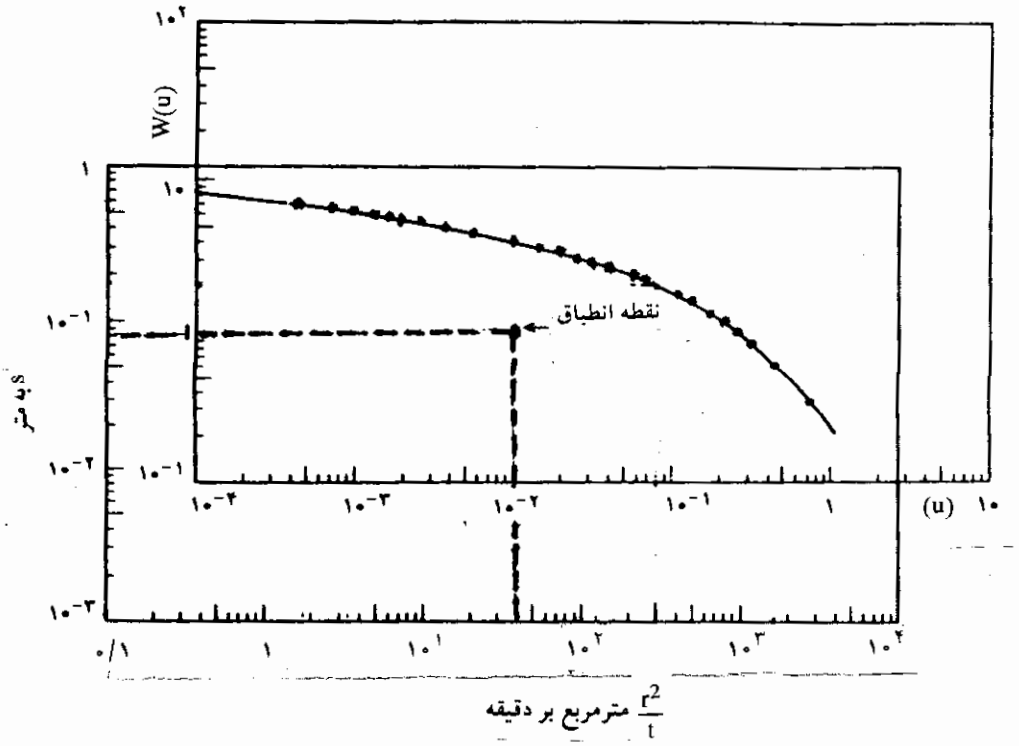
- اگر اندازه‌گیری افت در چاه اصلی انجام شود مقدار $r=1$ فرض می‌شود، در این شرایط محاسبه ضریب ذخیره امکان‌پذیر نیست.
- به جای پیاده کردن مقادیر s به $\frac{r^2}{t}$ یا $\frac{t}{r^2}$ می‌توان مستقیماً s را بر حسب t پیاده کرد.
- اگر اندازه‌گیری افت در چند پیزومتر انجام می‌شود می‌توان برای هریک از پیزومترهای تحلیل جداگانه‌ای انجام داد. مقایسه نتایج به دست آمده نشان خواهد داد که تا چه حد آبخوان موردنظر همگن است.

مثال : چاهی که در یک آبخوان تحت فشار به ضخامت ۴۰ متر حفر شده با آبدهی ثابت ۱۵ لیتر بر ثانیه مورد آزمایش پمپاژ قرار می‌گیرد. داده‌های افت بر حسب زمان در پیزومتری که به فاصله ۵۰ متری چاه اصلی قرار دارد در جدول ۴-۲ نشان داده شده است. با فرض اینکه تمام شرایط پیش‌گفته (در مورد معادلات جریانهای غیر ماندگار) برقرار باشد، ضرایب T، K و S را به روش تیس محاسبه کنید.

1- math point



شکل ۴-۱-الف - منحنی تغییرات $W(u)$ به u از روی داده‌های جدول ۴-۱ (منحنی نمونه تیس)



شکل ۴-۱- ب - انطباق نمودار اندازه‌گیریهای صحرایی (تغییرات s به $\frac{r^2}{t}$) بر روی منحنی نمونه تیس

جدول شماره ۴-۲

برگ آزمایش پمپاژ

پروژه : ..... تعداد پیزومتر : ..... عمق چاه : .....

نام محل : ..... موقعیت پیزومتر : ..... ارتفاع محل : .....

نام مالک : ..... فاصله پیزومتر از چاه : ..... نقطه نشانه اندازه‌گیری : .....

شماره چاه (U.T.M) : ..... **نوع آزمایش :** ..... سطح استاتیک : .....

زمان			عمق سطح آب (m)	افت s (m)	روش اندازه‌گیری :		آبدهی Q (lit/s)	افت تصحیح شده s_c (m)	$\frac{r^2}{t}$ (m^2/min)	افت باقیمانده s' (m)	$\frac{t}{t'}$	ملاحظات نسبت تبدیل اریفیس دور پمپ و ...
تاریخ	ساعت (hr)	دقیقه (min)			ارتفاع (in)	طول پرش (cm)						
		۰		۰			-		∞			
		۱		۰/۰۳			۱۵		$۲/۵\times۱۰^{۳}$			
		۱/۵		۰/۰۵			۰		$۱/۶\times۱۰^{۳}$			
		۲		۰/۰۷			۰		$۱/۲۵\times۱۰^{۳}$			
		۲/۵		۰/۰۸			۰		$۱۰^{۳}$			
		۳		۰/۰۹			۰		$۸/۳\times۱۰^{۲}$			
		۴		۰/۱۲			۰		$۶/۲۵\times۱۰^{۲}$			
		۵		۰/۱۴			۰		$۵/۰\times۱۰^{۲}$			
		۶		۰/۱۶			۰		$۴/۲\times۱۰^{۲}$			
		۸		۰/۱۷			۰		$۳/۱\times۱۰^{۲}$			
		۱۰		۰/۱۸			۰		$۲/۵\times۱۰^{۲}$			
		۱۲		۰/۲۰			۰		$۲/۱\times۱۰^{۲}$			
		۱۵		۰/۲۵			۰		$۱/۷\times۱۰^{۲}$			
		۲۰		۰/۲۶			۰		$۱/۲۵\times۱۰^{۲}$			
		۲۵		۰/۲۸			۰		$۱/۰\times۱۰^{۲}$			
		۳۰		۰/۳۰			۰		$۸/۳\times۱۰^{۱}$			
		۴۰		۰/۳۱			۰		$۶/۲۵\times۱۰^{۱}$			
		۶۰		۰/۳۳			۰		$۴/۲\times۱۰^{۱}$			
		۱۲۰		۰/۴۰			۰		$۲/۱\times۱۰^{۱}$			
		۱۸۰		۰/۴۱			۰		$۱/۴\times۱۰^{۱}$			
		۲۴۰		۰/۴۵			۰		$۱/۰\times۱۰^{۱}$			
		۳۶۰		۰/۴۹			۰		۶/۹			

نام آزمایش کننده : .....

جدول شماره ۴-۲

برگ آزمایش پمپاژ

پروژه : ..... تعداد پیزومتر : ..... عمق چاه : .....

نام محل : ..... موقعیت پیزومتر : ..... ارتفاع محل : .....

نام مالک : ..... فاصله پیزومتر از چاه : ..... نقطه نشانه اندازه‌گیری : .....

شماره چاه (U.T.M) : ..... **نوع آزمایش :** ..... سطح استاتیک : .....

زمان			عمق سطح آب (m)	افت s (m)	روش اندازه‌گیری :		آبدهی Q (lit/s)	افت تصحیح شده s_c (m)	$\frac{r^2}{t}$ (m^2/min)	افت باقیمانده s' (m)	$\frac{t}{t'}$	ملاحظات نسبت تبدیل اریفیس دور پمپ و ...
تاریخ	ساعت (hr)	دقیقه (min)			ارتفاع (in)	طول پرش (cm)						
		۴۸۰		۰/۵۰			۱۵		۵/۲			
		۷۲۰		۰/۵۳			"		۳/۵			
		۹۶۰		۰/۵۵			"		۲/۶			
		۱۴۴۰		۰/۵۸			"		۱/۷۳			

نام آزمایش کننده : .....

حل : ابتدا مقادیر $\frac{r^2}{t}$ برحسب مترمربع بر دقیقه حساب می‌شود (جدول ۴-۲). سپس مقادیر s بر حسب $\frac{r^2}{t}$ در روی کاغذ لگاریتمی پیاده می‌شود. نمودار حاصله و منحنی نمونه تیس روی هم قرار داده می‌شود (شکل ۴-۲). نقطه انطباق انتخاب می‌شود. این نقطه دارای مختصات زیر است.

$W(u) = ۱$

$u = ۱\times۱۰^{-۲}$

$s = ۸\times۱۰^{-۲}\ m$

$\frac{r^2}{t}$ = ۴۰ مترمربع بر دقیقه

ابتدا $\frac{r^2}{t}$ را به مترمربع بر روز تبدیل می‌کنیم.

$\frac{r^2}{t}$ = ۴۰ مترمربع بر دقیقه × ۱۴۴۰ = ۵۷۶۰۰ مترمربع بر روز

آبدهی چاه را نیز باید به مترمکعب بر روز تبدیل کنیم.

$Q = ۱۵\ lit/sec \times \frac{۸۶۴۰۰}{۱۰۰۰} = ۱۲۹۶$ مترمکعب بر روز

ضریب قابلیت انتقال برابر است با :

$T = \frac{Q}{۴\pi s} W(u) = \frac{۱۲۹۶}{۴ \times \pi \times ۸ \times ۱۰^{-۲}} \cong ۱۲۹۰$ مترمربع بر روز

هدایت هیدرولیکی از تقسیم قابلیت انتقال به ضخامت آبخوان به دست می‌آید :

$K = \frac{T}{D} = \frac{۱۲۹۰}{۴۰} \cong ۳۲$ متر بر روز

ضریب ذخیره (از رابطه ۴-۱۱) محاسبه می‌شود :

$S = \frac{4Tu}{r^2/t} = \frac{۴ \times ۱۲۹۰ \times ۱۰^{-۲}}{۵۷۶۰۰} = ۹ \times ۱۰^{-۴}$

۴-۲-۲ روش کوپر - ژاکوب[1]

ژاکوب براساس معادله عدم تعادل تیس، راه‌حل ساده‌تری ارائه داده است. وقتی که u به قدر کافی کوچک باشد معادله تیس را می‌توان بدون اشتباه مهمی به‌صورت زیر خلاصه کرد :

$$s = \frac{2.3\ Q}{4\pi T} \log \frac{2.25\ Tt}{r^2 S} \qquad (۴-۱۱)$$

در این معادله :

s = افت، متر

Q = آبدهی ثابت پمپاژ، مترمکعب بر روز

T = ضریب قابلیت انتقال، متر مربع بر روز

t = زمان از شروع پمپاژ، روز

r = فاصله پیزومتر از چاه اصلی به متر، در صورتی که افت تنها در چاه اصلی اندازه‌گیری شود، به جای r_w ، r (شعاع چاه) قرار داده می‌شود.

S = ضریب ذخیره،

معادله (۴-۱۱) در شرایطی اعتبار دارد که $u \leq ۰/۰۱$ باشد. در این صورت استفاده از این معادله اساساً همان نتایج معادله تیس را به دست می‌دهد. u با افزایش زمان پمپاژ (t) و کاهش r کوچک می‌شود. اگر r نسبتاً کوچک باشد، معمولاً در آبخوان‌های تحت فشار پس از یک ساعت پمپاژ و در آبخوان‌های آزاد پس از حدود ۱۲ ساعت پمپاژ شرایط برای استفاده از روش ژاکوب فراهم می‌شود.

روشن است که برای استفاده از روش ژاکوب باید تمام فرضیات پیش‌گفته (در روش تیس) برقرار باشد.
در یک آزمایش معین، وقتی که آبدهی پمپاژ ثابت نگه داشته می‌شود، T، Q و S ثابت‌اند و در این صورت برای یک آبخوان معین و در هر نقطه مشخص (r ثابت)، s و t متغیرهای رابطه فوق هستند و این رابطه نشان می‌دهد که s با logt تغییر می‌کند (تغییرات آن خطی است)

براساس این اصل می‌توان نمودار زمان - افت را بر روی یک کاغذ نیمه‌لگاریتمی پیاده کرد. پس از آزمایش پمپاژ با آبدهی ثابت و اندازه‌گیری افت سطح آب (s) در پیزومترها و در چاه اصلی نسبت به زمان (t)، با استفاده از داده‌های حاصل، نمودار زمان - افت تهیه می‌شود. برای این کار زمان در روی محور افقی با تقسیمات لگاریتمی و افت در روی محور قائم، با مقیاس حسابی پیاده می‌شود (شکل ۴-۱).

1- Cooper - Jacob

با توجه به اصل یاد شده، اکثر نقاط پیاده شده بر روی یک خط مستقیم قرار می‌گیرند (جز برای اندازه‌گیریهایی که در اوایل پمپاژ انجام می‌شود و u بزرگتر از ۰/۰۱ است). با استفاده از شیب خط به دست آمده به آسانی می‌توان مقدار T را حساب کرد. شیب یا ضریب زاویه خط مستقیم در نمودار برابر است با $\frac{۲/۳Q}{۴\pi T}$.

برای محاسبه شیب خط کافی است که اختلاف افت را در یک سیکل لگاریتمی به دست آوریم. یعنی اختلاف افت مربوط به دو رقم از محور زمان که لگاریتم آنها به اندازه واحد اختلاف داشته باشند $(\log t_2 - \log t_1 = 1)$.
این مقدار در شکل ۴-۲ با Δs نشان داده شده است.
بنابراین می‌توان نوشت :

$$\frac{2.3\ Q}{4\ \pi T} = \Delta s$$

و از آنجا :

$$T = \frac{2.3\ Q}{4\pi\Delta s} \Rightarrow T = \frac{0.183Q}{\Delta s} \qquad (۱۲-۴)$$

پس از محاسبه T، برای به‌دست آوردن S خط مستقیم را ادامه می‌دهیم تا محور زمان را قطع کند (t_0، نقطه‌ای که افت صفر است). بنابر این :

$$0 = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt_0}{r^2S}$$

چون عبارت $\frac{2.3Q}{4\pi T}$ مخالف صفر است، پس عبارت لگاریتمی باید مساوی صفر باشد :

$$\log \frac{2.25Tt_0}{r^2S} = 0$$

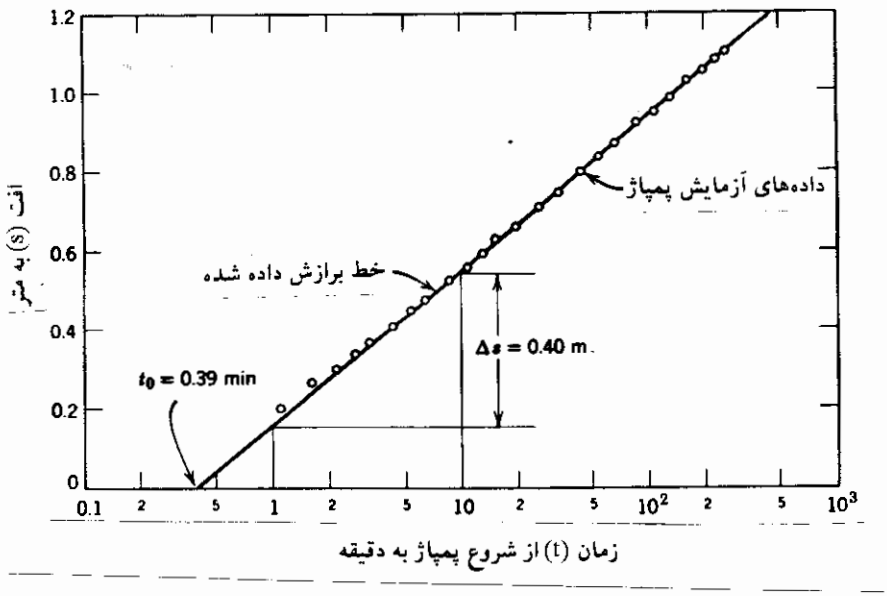
و از آنجا :

$$\frac{2.25Tt_0}{r^2S} = 1$$

یا :

$$S = \frac{2.25Tt_0}{r^2} \qquad (۱۳-۴)$$

برای محاسبه S می‌توان T به دست آمده را به همراه با مقدار افت (s) مربوط به یک زمان (t) معین (که از روی نمودار به‌دست می‌آید) در رابطه (۴-۱۱) قرار داد و به این ترتیب نیز S را محاسبه کرد. پس از محاسبه T و S با قرار دادن آنها در معادله $u=\frac{r^2S}{4Tt}$ مقدار u باید کنترل شود. (شرط $u \leq ۰/۰۱$).



شکل ۴-۲- تغییرات افت به زمان در مختصات نیمه‌لگاریتمی در روش ژاکوب

مثال : چاهی که در یک آبخوان تحت فشار حفر شده با آبدهی ثابت ۴۰ لیتر بر ثانیه پمپاژ می‌شود. داده‌های افت بر حسب زمان در پیزومتری که به فاصله ۵۰ متری چاه اصلی قرار گرفته در نمودار نیمه لگاریتمی (شکل ۴-۳) پیاده شده و خط مستقیمی از نقاط پیاده شده عبور داده شده است. با فرض برقرار بودن تمام فرضیات پیش‌گفته، ضرایب T و S را حساب کنید.

حل : باتوجه به نمودار (شکل ۴-۲) داریم :

$\Delta s = ۰/۴۰$ m

$t_۰ = ۰/۳۹$ min $\Rightarrow$ $۲/۷\times۱۰^{-۴}$ روز

برای محاسبه T باید مقدار Q را بر حسب مترمکعب بر روز به دست آوریم :

$Q = ۴۰$ lit/sec $\Rightarrow$ ۳۴۵۶ مترمکعب بر روز

بنابراین داریم :

$$T = \frac{۲/۳\times۳۴۵۶}{۴\times\pi\times۰/۴۰} \cong ۱۵۸۰ \text{ مترمربع بر روز}$$

$$S = \frac{۲/۲۵\times۱۵۸۰\times۲/۷\times۱۰^{-۴}}{۵۰^{۲}} \cong ۳/۸\times۱۰^{-۴}$$

چنان که گفتیم روش کوپر - ژاکوب وقتی اعتبار دارد که $u \leq ۰/۰۱$ باشد. در آزمایش فوق باتوجه به اینکه آزمایش ۲۴۰ دقیقه ($\frac{۱}{۶}$ روز) طول کشیده، بنابراین :

$$u = \frac{r^2S}{۴Tt} = \frac{۵۰\times۳/۸\times۱۰^{-۴}}{۴\times۱۵۸۰\times(۱/۶)} = ۹/۰\times۱۰^{-۴}$$

بنابر این نتایج به دست آمده معتبر است.

۴-۲-۳ روش چاو[1]

در این روش همان فرضیاتی که در روش تیس ذکر شد باید وجود داشته باشد، زیرا این روش نیز بر اساس معادله تیس (معادله ۴-۸) استوار شده است. ولی در این روش تطبیق منحنی پمپاژ با منحنی نمونه تیس ضرورت نداشته و محدویت روش کوپر- ژاکوب یعنی کوچک بودن r و بزرگ بودن زمان (t) وجود ندارد.

برای محاسبه T و S در آزمایشهایی که در زمان نسبتاً کوتاه، افت تقریباً ثابت می‌شود می‌توان از این روش استفاده کرد.

برای به‌دست آوردن مقادیر W(u) و U که مربوط به مقدار افت اندازه‌گیری شده (s) در لحظه (t) مشخص است، چاو در سال ۱۹۵۲ فرمول زیر را ارائه داده :

$$F(u)=\frac{W(u)\,e^{u}}{2.3} \qquad (۱۴-۴)$$

ارتباط بین F(u) ، W(u) و U در (جدول ۴-۲) و (شکل ۴-۲) به‌صورت نمودار نشان داده شده است .

روش کار : در پیزومتری که با فاصله r از چاه پمپاژی قرار دارد، تغییرات افت (s) نسبت به زمان (t) بر روی کاغذ نیمه‌لگاریتمی ثبت می‌شود (محور افقی در مقیاس لگاریتمی تغییرات t و محور قائم در مقیاس حسابی تغییرات s). سپس خط مستقیمی بر نقاط پیاده شده برازش داده می‌شود. یک نقطه (A) روی خط برازش داده شده انتخاب و روی محور افقی مقدار افت مربوط به نقطه A یعنی s_A را یادداشت کرده و با استفاده از خط برازش داده شده مقدار افت در یک سیکل لگاریتمی از زمان (Δs_A) محاسبه می‌شود. مقدار F(u) برای نقطه A با استفاده از فرمول زیر به‌دست می‌آید :

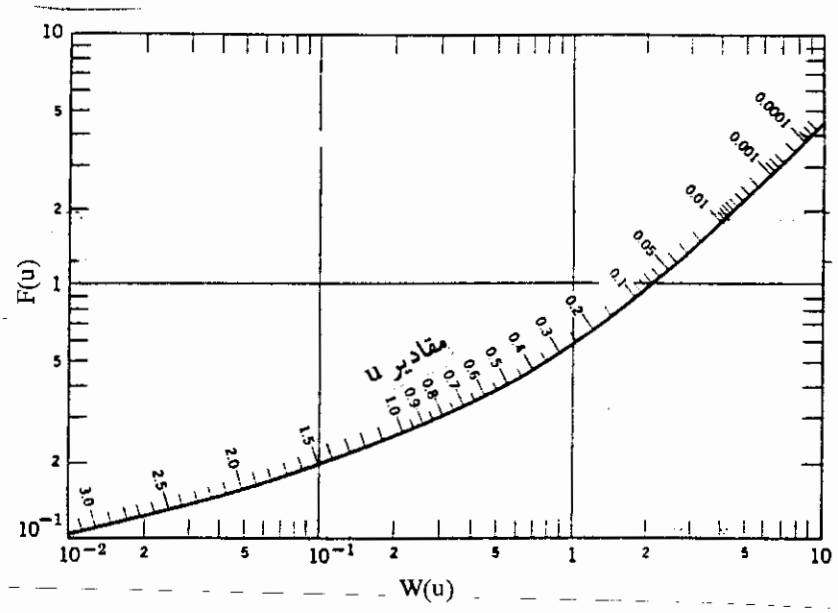
$$F(u)=\frac{s_A}{\Delta s_A} \qquad (۱۵-۴)$$

با داشتن مقدار F(u) ، مقادیر W(u) و u با استفاده از (جدول ۴-۲) و یا (شکل ۴-۳) به‌دست می‌آید. در محور افقی نمودار ترسیم شده مقدار t نقطه A را خوانده و با استفاده از فرمولهای زیر مقادیر ضریب قابلیت انتقال (T) و ضریب ذخیره به دست می‌آید :

$$T=\frac{Q\,W(u)}{4\pi s_A} \qquad (۱۶-۴)$$

$$S=\frac{4Tt_AU}{r^2} \qquad (۱۷-۴)$$

1- Chow

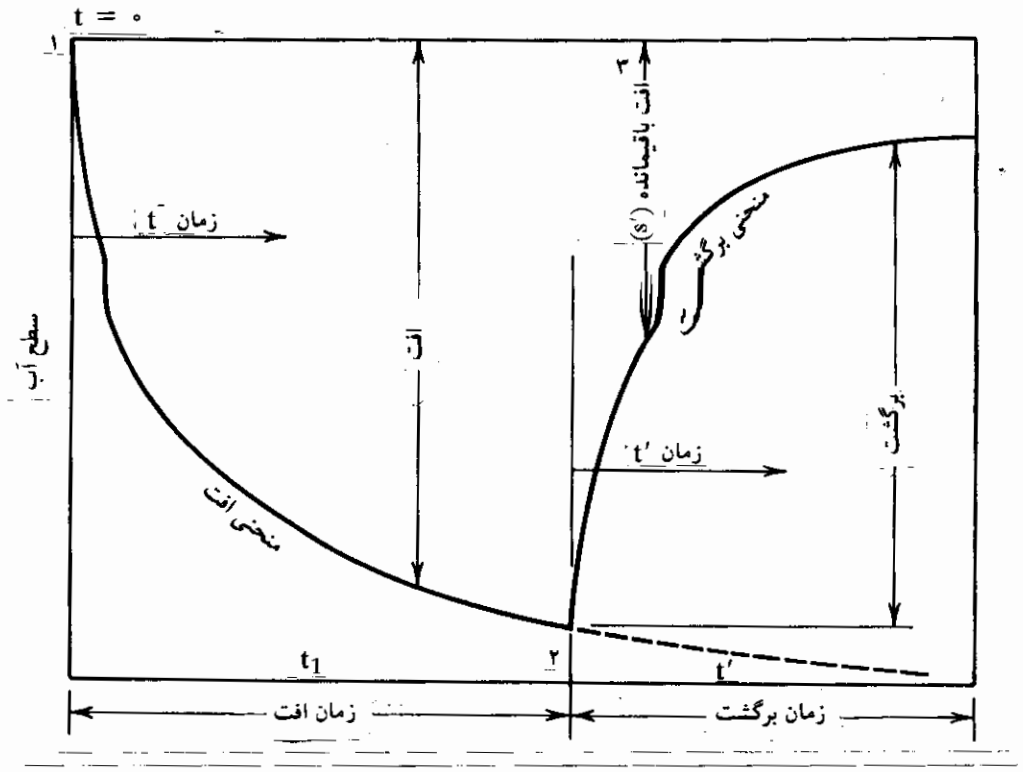


شکل ۴-۳ رابطه بین F(u) ، W(u) و u

جدول ۴-۲ تغییرات u ، W(u)، F(u)

u	W(u)	F(u)	u	W(u)	F(u)	u	W(u)	F(u)
5	1.14(-3)	7.34(-2)	9(-2)	1.92	9.33(-1)	9(-4)	6.44	
4	3.78(-3)	8.98(-2)	8(-2)	2.03	9.56(-1)	8(-4)	6.55	
3	1.30(-2)	1.17(-1)	7(-2)	2.15	1.00	7(-4)	6.69	
2	4.89(-2)	1.57(-1)	6(-2)	2.30	1.06	6(-4)	6.84	
1	2.19(-1)	2.59(-1)	5(-2)	2.47	1.13	5(-4)	7.02	
			4(-2)	2.68	1.21	4(-4)	7.25	
9(-1)	2.60(-1)	2.76(-1)	3(-2)	2.96	1.33	3(-4)	7.53	
8(-1)	3.11(-1)	3.01(-1)	2(-2)	3.35	1.49	2(-4)	7.94	
7(-1)	3.74(-1)	3.27(-1)	1(-2)	4.04	1.77	1(-4)	8.63	F(u)=
6(-1)	4.54(-1)	3.60(-1)						
5(-1)	5.60(-1)	4.01(-1)	9(-3)	4.14	1.82	9(-5)	8.74	$=\frac{W(u)}{2.30}$
4(-1)	7.02(-1)	4.55(-1)	8(-3)	4.26	1.87	8(-5)	8.86	
3(-1)	9.06(-1)	5.32(-1)	7(-3)	4.39	1.92	7(-5)	8.99	
2(-1)	1.22	6.47(-1)	6(-3)	4.54	1.99	6(-5)	9.14	
1(-1)	1.82	8.74(-1)	5(-3)	4.73	2.07	5(-5)	9.33	
			4(-3)	4.95	2.16			
			3(-3)	5.23	2.28			
			2(-3)	5.64	2.46			
			1(-3)	6.33	2.75			

اگر چاهی را در یک دوره معین با آبدهی ثابت پمپاژ کرده و بلافاصله پس از خاموش کردن پمپ، اندازه‌گیریهای سطح آب ادامه یابد تا این سطح تقریباً به سطح استاتیک برسد و یا به آن نزدیک شود، ملاحظه می‌شود که افت باقیمانده[2] در هر لحظه در طول دوره برگشت سطح آب، عبارتست از اختلاف بین سطح ایستابی اندازه‌گیری شده و سطح استاتیک.



شکل ۴-۴ منحنی افت و برگشت در یک پیزومتر نزدیک چاه پمپاژی (۱- لحظه روشن شدن پمپ، ۲- لحظه خاموش شدن پمپ، ۳- افت باقیمانده، $t = t_1 + t'$)

بنابراین مقدار افت باقیمانده (s') در هر لحظه توسط معادله ذیل بیان می‌شود :

$$s' = \frac{2.3\ Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt}{r^2S} - \frac{2.3\ Q}{4\pi T} \log \frac{2.25\ Tt'}{r^2S} \qquad (۱۸-۴)$$

یا :

$$s' = \frac{2.3\ Q}{4\pi T} \log \frac{t}{t'} \qquad (۱۹-۴)$$

1- recovery test

2- residual draw down

که در آن :

t = زمان از لحظه شروع آزمایش تا پایان آزمایش برگشت یا بعد زمان

t' = زمان از لحظه خاموش شدن پمپ

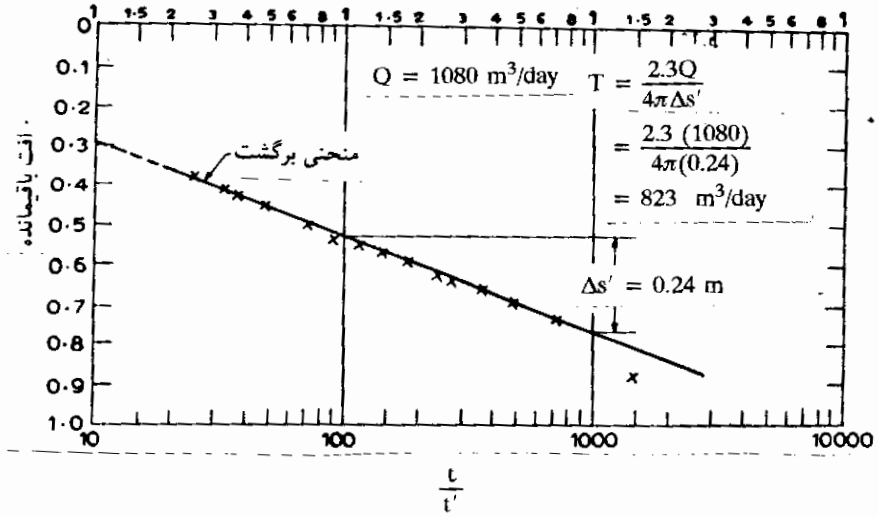
مقادیر Q ، T، S ، r قبلاً توضیح داده شده‌اند.

برای محاسبه ضریب قابلیت انتقال حل معادله فوق به روش ترسیمی با استفاده از کاغذ نیمه‌لگاریتمی به‌صورتی که $\frac{t}{t'}$ بر روی محور لگاریتمی و افت باقیمانده (s') بر روی محور با مقیاس حسابی پیاده شود، امکان‌پذیر است. شیب خط مستقیمی که‌ازنقاط ثبت شده عبورمی‌کند برابر $\frac{2.3Q}{4\pi t}$ است وتغییرات s' در یک سیکل‌لگاریتمی $\Delta s'$ است پس:

$$T = \frac{0.183\ Q}{\Delta s'} \qquad (۲۰-۴)$$

در این روش افت باقیمانده از لحظه خاموش شدن پمپ در چاه مورد آزمایش و یا پیزومتری که در نزدیکی چاه قرار گرفته، اندازه‌گیری می‌شود.

یکی از مسائلی که عموماً در آزمایشهای افت وجود دارد ثابت نگهداشتن مقدار آبدهی در طول زمان آزمایش است. در این آزمایشها مقدار آبدهی به سبب تغییرات بار فشار و ولتاژ ممکن است کمی تغییر کند. شاید بتوان تغییرات ولتاژ را در غالب موارد ازبین برد اما تغییرات بار فشار به سبب افت سطح آب تدریجی بوده و کنترل آن بسیار مشکل است. بنابراین معمولاً ضرائب هیدرودینامیکی برآورد شده در آزمایشهای رفت و برگشت تا حدودی با یکدیگر تفاوت داشته و نتایج به‌دست آمده در آزمایشهای برگشت از دقت بیشتری برخوردار است. در این روش نمی‌توان مقدار S را به‌دست آورد.



شکل ۴-۵ نمودار تغییرات افت باقیمانده نسبت به $\frac{t}{t'}$

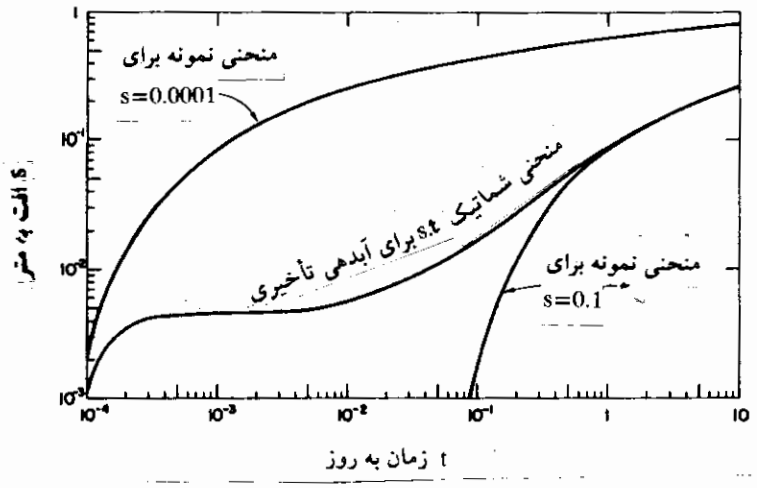
۴-۲-۵ آبدهی تأخیری[1]

یکی از فرضیاتی که اساس معادلات تیس را تشکیل می‌دهد آن است که آزاد شدن آب از ذخیره آبخوان، نتیجه افت بلافاصله بار هیدرولیکی است. درحالی که در آبخوانهای آزاد این فرض غالباً صادق نیست. مثلاً سرعت افت سطح ایستابی ممکن است بیشتر از سرعت آزاد شدن آب منفذی، براثر زهکشی گرانشی (ثقلی)، باشد. بخشی از آب منفذی بلافاصله بعد از پایین رفتن سطح ایستابی زهکشی می‌شود. ولی مدتی طول می‌کشد تا تمام آبهای منفذی که سرانجام آزاد خواهند شد، به سطح ایستابی درحال افت برسند. سرعت آزاد شدن آب منفذی به میزان هوایی که می‌تواند در زمین نفوذ کند، تا منافذ خالی شده از آب را اشغال کند نیز بستگی دارد. وقتی که جریان هوا، مثلاً به علت لایه‌های مرطوب خاک در منطقه تهویه محدود باشد، فشار هوای منفی ایجاد می‌شود، که موجب تأخیر در آزاد شدن آب منفذی براثر افت سطح ایستابی می‌گردد. آبدهی تأخیری تنها مختص آبخوانهای آزاد نیست، بلکه در آبخوانهای نشتی که از لایه‌های محصور کننده فوقانی با سطح آب آزاد، آب دریافت می‌کنند نیز روی می‌دهد.

وقتی آزمایش پمپاژ در یک آبخوان آزاد با آبدهی تأخیری انجام می‌گیرد، سطح آب در پیزومتر ابتدا نسبتاً به سرعت افت می‌کند، آنگاه سرعت افت کاسته می‌شود و برای مدتی سطح آب تقریباً ثابت می‌شود، سپس دوباره افت سریعتر شروع می‌شود. به این ترتیب منحنی افت - زمان شکل خاصی پیدا می‌کند که شامل سه بخش است (شکل ۴-۶). بخش اول که نشان دهنده افت سریع اولیه است و فقط ممکن است مربوط به چند دقیقه اول پمپاژ باشد، ناشی از آزاد شدن آب به عللی غیر از زهکشی از منافذ آبخوان است. در واقع آبخوان نامحصور در این مرحله مثل آبخوان تحت فشار عکس‌العمل نشان می‌دهد، یعنی آب بلافاصله از ذخیره آبخوان بر اثر تراکم لایه آبدار و انبساط خود آب آزاد می‌شود، به عبارت دیگر این بخش از منحنی بر منحنی نمونه تیس منطبق است. مقادیر ضریب ذخیره که در مراحل اولیه افت برآورد می‌شود، غالباً در حدودی است که مشخصه آبخوانهای تحت فشار است.

در بخش دوم منحنی افت - زمان، شیب منحنی کاهش می‌یابد که این موضوع مربوط به آزاد شدن آب از منافذ آبخوان در بالای مخروط افت است. در این مرحله اختلاف قابل توجهی بین منحنی افت - زمان با منحنی نمونه تیس وجود دارد. در بخش سوم، که ممکن است چند دقیقه یا چند روز پس از شروع پمپاژ آغاز شود، منحنی دوباره با منحنی تیس منطبق می‌شود. در این مرحله بین آب آزاد شده و میزان افت سطح ایستابی تعادل برقرار می‌شود و بنابراین خطای بین داده‌های مشاهده شده و داده‌های نظری براساس معادله تیس به تدریج کوچکتر می‌شود. در این بخش، منحنی الگویی را دنبال می‌کند که بیشتر نمایانگر آبخوانهای آزاد است.

1- delay yield



شکل ۴-۶- منحنی‌های نمونه افت نسبت (s) به زمان (t)، که برای S = ۰/۰۰۰۱ و S = ۰/۱ محاسبه شده و منحنی شماتیک s به t برای آزمایش پمپاژ در یک آبخوان با آبدهی تأخیری ($Q= 1000m^3/day$، مترمربع بر روز T= ۱۰۰۰، متر r = ۱۰۰)

بولتون[1] روشی برای برآورد T و S از داده‌های افت نسبت به زمان در آبخوانهای با آبدهی تأخیری در شرایط غیرماندگار، ارائه داده است. در این روش نیز باید شرایط پیش‌گفته وجود داشته باشد. در چنین مواردی ضریب ذخیره آبخوان شامل S_A و S_Y درنظر گرفته می‌شود که S_A نمایانگر آزاد شدن کم و اولیه آب و S_Y نشان دهنده آزاد شدن نهایی آب یا آبدهی ویژه واقعی است.

راه‌حل بولتون برای بخش اول منحنی افت - زمان با فرمول زیر بیان می‌شود :

$$s = \frac{Q}{4\pi T} . W(U_A , r/B) \qquad (۲۱-۴)$$

که در آن :

$$U_A = \frac{r^2 S_A}{4Tt} \qquad (۲۲-۴)$$

معادله بخش سوم منحنی افت به زمان نیز به صورت زیر است :

$$s = \frac{Q}{4\pi T} . W(U_Y , r/B) \qquad (۲۳-۴)$$

1- Boulton

که در آن :

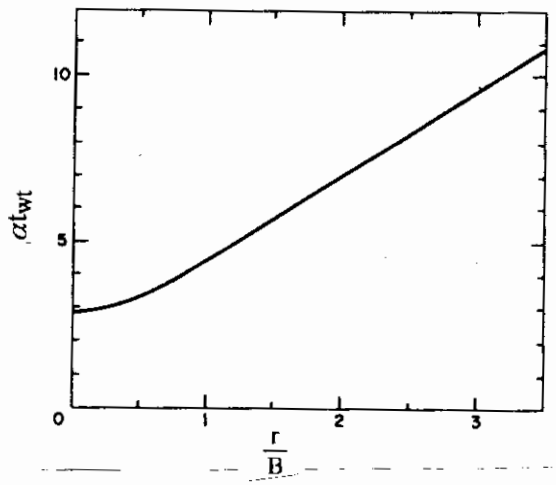
$$U_Y = \frac{r^2 S_Y}{4Tt} \qquad (۲۴-۴)$$

به طور نظری این معادلات درصورتی اعتبار دارند که $\eta = \frac{S_A + S_Y}{S_A}$ به بی‌نهایت نزدیک شود، که در این صورت قسمت دوم منحنی s نسبت به t یک خط اساساً افقی خواهد شد. اگر $\eta < ۱۰۰$ باشد، قسمت دوم منحنی دیگر افقی نیست ولی اگر $\eta > ۶/۵$ باشد، باز هم با استفاده از روش بولتون نتایج تقریباً خوبی می‌توان به دست آورد.
مقدار B در معادلات فوق را می‌توان ضریب زهکشی[1] نامید. این ضریب به صورت زیر تعریف می‌شود :

$$B = \sqrt{\frac{T}{\alpha S_Y}} \qquad (۲۵-۴)$$

که بعد آن طول (L) است.

$\frac{۱}{\alpha}$ را «شاخص تأخیر بولتن[2]» می‌نامند که یک ثابت تجربی است و به خصوصیات آبخوان موردنظر بستگی دارد و بعد آن زمان (T) است. شاخص تأخیر از طریق $\frac{r}{B}$ به زمان t_{wt} مربوط می‌شود. t_{wt} زمانی است که تأثیر آبدهی تأخیری بر افت خاتمه می‌یابد و آبخوان به صورت یک آبخوان آزاد با تخلیه کامل عمل می‌کند. نمودار رابطه بین αt_{wt} به $\frac{r}{B}$ در (شکل ۴-۷) نشان داده شده است.



شکل ۴-۷- رابطه بین αt_{wt} و $\frac{r}{B}$ (منحنی شاخص تأخیر بولتون)

1- drainage factor

2- Boulton delay index

توابع $W(U_A,\frac{r}{B})$ و $W(U_Y,\frac{r}{B})$ را «تابع چاه بولتون[1]» یا به‌طور ساده تابع بولتون می‌نامند. مقادیر این توابع در جدولهای (۴-۳) و (۴-۴) و به‌صورت نمودار در (شکل ۴-۸)، برحسب $\frac{۱}{U_A}$ و $\frac{۱}{U_Y}$ نشان داده شده‌اند. بخش سمت چپ (شکل ۴-۸)، منحنی‌های نمونه (منحنی نوع A) را برای بخش اول منحنی افت - زمان نشان می‌دهد، یعنی در زمانی که آبدهی تأخیری است. بخش سمت راست نیز منحنی‌های نوع Y را برای آن بخش از منحنی افت - زمان نشان می‌دهد که آبدهی ویژه حاصل شده است.

جدول ۴-۳- مقادیر $W(U_A,\frac{r}{B})$ (به اختصار W_A)، برای مقادیر مختلف $\frac{۱}{U_A}$ و $\frac{r}{B}$

r/B	$1/u_A$	W_A	r/B	$1/u_A$	W_A	r/B	$1/u_A$	W_A
0.01	10	1.82	0.4	1	0.213	1.5	0.5	0.039
	100	4.04		2	0.534		1	0.151
	10^3	6.31		5	1.11		1.25	0.199
	5×10^3	7.82		10	1.56		2	0.301
	10^4	8.40		50	2.18		5	0.413
	10^5	9.42		100	2.22		10	0.427
0.01	10^6	9.44	0.4	10^3	2.23	1.5	20	0.428
0.1	10	1.80	0.6	1	0.206	2	0.333	0.010
	50	3.24		2	0.504		0.5	0.033
	100	3.81		5	0.996		1	0.114
	200	4.30		10	1.31		1.25	0.144
	500	4.71		20	1.49		2	0.194
	10^3	4.83		50	1.55		5	0.227
0.1	10^4	4.85	0.6	100	1.55	2	10	0.228
0.2	5	1.19	0.8	0.5	0.046	2.5	0.5	0.027
	10	1.75		1	0.197		1	0.080
	50	2.95		2	0.466		1.25	0.096
	100	3.29		5	0.857		2	0.117
	500	3.50		10	1.05		5	0.125
0.2	10^3	3.51		20	1.12	2.5	10	0.125
			0.8	50	1.13			
0.316	1	0.216	1	0.5	0.044	3	0.5	0.021
	2	0.544		1	0.185		1	0.053
	5	1.15		2	0.421		1.25	0.061
	10	1.65		5	0.715		2	0.068
	50	2.50		10	0.819		5	0.070
	100	2.62		20	0.841	3	10	0.070
0.316	10^3	2.65	1	50	0.842			

مأخذ: Boulton, 1963.

1- Boulton's well function

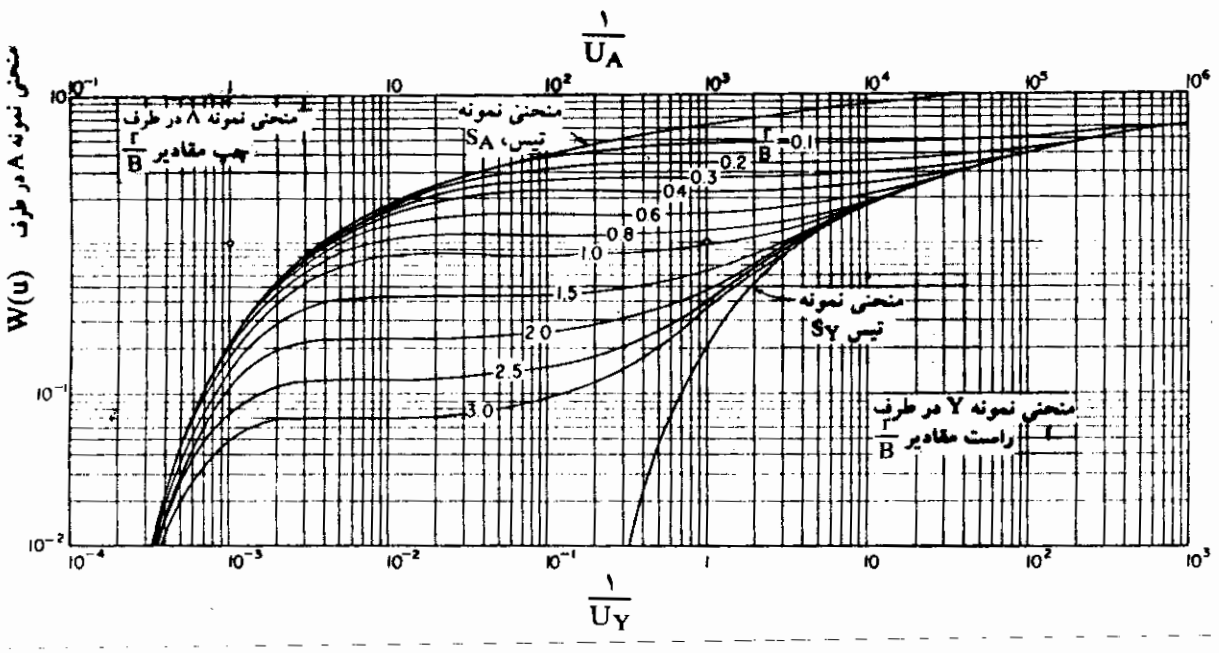
جدول ۴-۴- مقادیر $W(U_Y, \frac{r}{B})$ (به اختصار W_Y)، برای مقادیر مختلف $\frac{1}{U_Y}$ و $\frac{r}{B}$

r/B	$1/u_Y$	W_Y	r/B	$1/u_Y$	W_Y	r/B	$1/u_Y$	W_Y
0.01	400	9.45	0.4	0.1	2.23	1.5	0.071 1	0.444
|	4×10^3	9.54	|	1	2.26	|	0.355	0.509
|	4×10^4	10.2	|	5	2.40	|	0.711	0.587
|	4×10^5	12.3	|	10	2.55	|	2.67	0.963
0.01	4×10^6	14.6	|	37.5	3.20	1.5	7.11	1.57
			0.4	100	4.05			
0.1	4	4.86	0.6	0.444	1.59	2	0.04	0.239
|	40	4.95	|	2.22	1.71	|	0.2	0.283
|	400	5.64	|	4.44	1.84	|	0.4	0.337
|	4×10^3	7.72	|	16.7	2.45	|	1.5	0.614
0.1	4×10^4	10.0	0.6	44.4	3.26	2	4	1.11
0.2	0.4	3.51	0.8	0.025	1.13	2.5	0.025 6	0.132
|	4	3.54	|	0.25	1.16	|	0.128	0.162
|	20	3.69	|	1.25	1.26	|	0.256	0.199
|	40	3.85	|	2.5	1.39	|	0.96	0.399
|	150	4.55	|	9.37	1.94	2.5	2.56	0.798
0.2	400	5.42	0.8	25	2.70			
0.316	0.4	2.66	1	0.04	0.844	3	0.017 8	0.074 3
|	4	2.74	|	0.4	0.901	|	0.088 9	0.093 9
|	40	3.38	|	4	1.36	|	0.178	0.119
|	400	5.42	1	40	3.14	|	0.667	0.262
0.316	4×10^3	7.72				3	1.78	0.577

مأخذ Boulton, 1963.

روش کار: روش بولتون به این ترتیب است که پس از آزمایش پمپاژ تغییرات افت - زمان در یک پیزومتر بر روی محورهای مختصات لگاریتمی پیاده می‌کنیم (افت روی محور عرضها). منحنی‌های نمونه بولتون نیز بر روی کاغذ لگاریتمی دیگری با همان مقیاس، مثل شکل (۴-۸)، رسم می‌شود. سپس دو نمودار را روی هم قرار می‌دهیم و درحالی که محورهای مختصات موازی است، آن‌قدر آنها را جابه‌جا می‌کنیم تا اکثر داده‌های افت - زمان مربوط به بخش اول منحنی بر روی یکی از منحنی‌های نوع A منطبق شود. سپس مقدار $\frac{r}{B}$ منحنی نوع A را، که دارای بهترین انطباق است، یادداشت می‌کنیم. یک نقطه انطباق در این بخش انتخاب می‌کنیم و مختصات آن را بر روی هر دو نمودار می‌خوانیم. در نتیجه چهار مقدار s ، t ، $\frac{1}{U_A}$ و $W(U_A$ و $\frac{r}{B})$ وابسته به هم به‌دست می‌آید که براساس این مقادیر و با استفاده از فرمول (۴-۲۱) مقدار T و با استفاده از فرمول (۴-۲۲) مقدار S_A به‌دست می‌آید.

پس از آن دوباره منحنی s به t را روی منحنی‌های نمونه قرار می‌دهیم، ولی این بار بهترین انطباق بین بخش سوم منحنی (داده‌های مربوط به t زیاد) و منحنی نوع y با همان مقدار $\frac{r}{B}$ قبلی را به دست می‌آوریم. دوباره یک نقطه انطباق را در این بخش انتخاب می‌کنیم و مختصات آن را روی هر دو نمودار می‌خوانیم. آن‌گاه مقادیر حاصل s ، t ، $\frac{1}{U_Y}$ و $W(U_Y$ و $\frac{r}{B})$ را برای محاسبه T با استفاده از فرمول (۴-۲۳) و محاسبه S_Y با استفاده از فرمول (۴-۲۴) به کار می‌بریم. مقدار T به‌دست آمده باید با مقدار T حاصل از فرمول (۴-۲۱) مطابقت داشته باشد.



شکل ۴-۸ منحنی تغییرات ($\frac{r}{B}$ و $W(U_A$ به $\frac{1}{U_A}$ (مقیاس بالایی) و ($\frac{r}{B}$ و $W(U_Y$ به $\frac{1}{U_Y}$ (مقیاس زیرین) برای داده‌های جدولهای (۴-۳) و (۴-۴).

مقدار $\frac{r}{B}$ از منحنی نمونه دارای بهترین انطباق، برای محاسبه B به کار می‌رود که آنگاه با قرار دادن آن در فرمول (۴-۲۵) مقدار α محاسبه می‌شود. سپس αt_{wt} از شکل (۴-۷) برای همان مقدار $\frac{r}{B}$ برآورد می‌شود. با دانستن α و αt_{wt} می‌توان t_{wt} را محاسبه کرد. t_{wt} نشان دهنده زمانی است که دیگر آبدهی تأخیری نیست و زمانی است که منحنی افت - زمان باید با یکی از منحنی‌های نوع Y یکی شود، که همان منحنی‌های تیپ است. اگر بیش از یک پیزومتر وجود داشته باشد مقادیر T ، S_A ، S_Y به‌دست آمده از داده‌های پیزومترهای مختلف باید نتایج تقریباً یکسانی به‌دست دهند. مقدار t_{wt} برای یک پیزومتر معین به r ، T ، S_Y ، α بستگی دارد.

پریکت[1] نشان داده است که شاخص تأخیر ($\frac{1}{\alpha}$) موادی که در آن زهکشی منفذی روی می‌دهد، اگر ماسه دانه‌درشت باشد حدود ۱۰ دقیقه، در ماسه متوسط ۶۰ دقیقه و در ماسه دانه‌ریز ۲۰۰ دقیقه، ماسه‌های خیلی ریز ۱۰۰۰ دقیقه و در سیلت ۲۰۰۰ دقیقه است. بنابراین برای آبخوانی متشکل از ماسه دانه‌ریز با $\frac{1}{\alpha}$ = ۲۸۸ دقیقه و دارای T معادل ۱۰۰ مترمربع بر روز و S_Y = ۰/۱ ، t_{wt} برای پیزومتری در فاصله r = ۴۲/۴ متر، ۱/۹ روز محاسبه می‌شود. این مدت باید پمپاژ ادامه پیدا کند تا دیگر افت در پیزومتر تحت تأثیر آبدهی تأخیری نباشد. از نقطه‌نظر عملی S_Y مهمترین مقدار برای آبدهی ویژه است. آزمایشهای پمپاژ در آبخوانهای آزاد باید همیشه به قدر کافی ادامه پیدا کند تا بخش سوم منحنی s به t به اندازه لازم به‌دست آید.

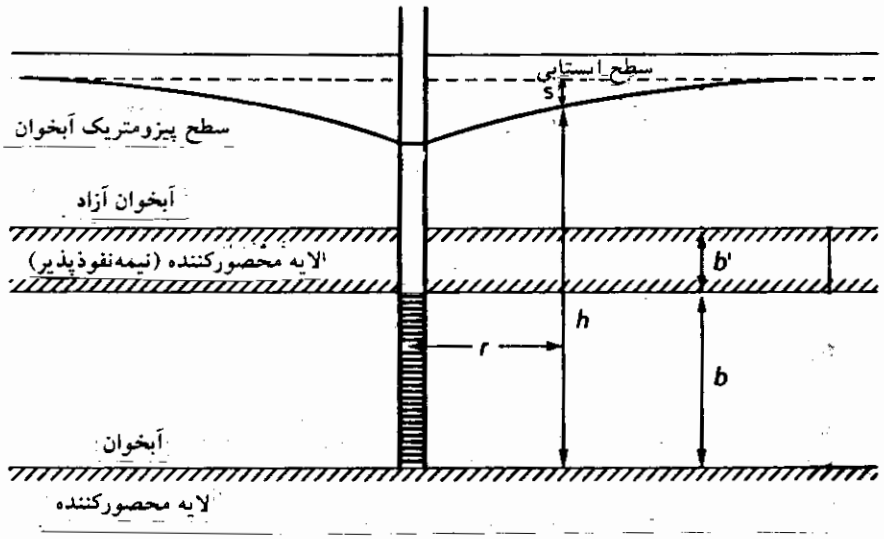
1- prickett

۴-۲-۶ آبخوانهای نشتی

آبخوان نشتی یا نیمه‌محصور[1] آبخوانی است که از بالا به وسیله لایه‌ای نیمه‌نفوذپذیر[2] یا نیمه‌تراوا محصور شده باشد و بتواند از طریق آن آب دریافت کند (شکل ۴-۹).

وقتی که چنین آبخوانی به وسیله چاه مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد، افت سطح پیزومتریک موجب جریان رویه پایینی می‌شود که در هر نقطه متناسب با اختلاف ارتفاع سطح ایستابی لایه فوقانی و سطح پیزومتریک آبخوان نشتی است. معمولاً فرض می‌شود که سطح ایستابی در لایه فوقانی تحت تأثیر پمپاژ قرار نمی‌گیرد و بنابراین جریان رویه پایین متناسب با افت سطح پیزومتریک است. این فرض درخلال مراحل اولیه پمپاژ چاه اعتبار دارد.

در آبخوان نشتی، علاوه بر جریان رو به پایین از لایه محصورکننده فوقانی، آب براثر فشردگی لایه‌های دانه‌ریز در داخل آبخوان و همچنین به مقدار کمتر بر اثر فشردگی خود آبخوان، در نتیجه پایین رفتن سطح پیزومتریک در حین پمپاژ، نیز آزاد می‌شود. روشهای مختلفی برای برآورد ضرایب هیدرودینامیک در شرایط ماندگار و غیرماندگار در آبخوانهای نشتی ارائه شده است. با استفاده از آزمایشهای پمپاژ می‌توان ضرایب هیدرودینامیک آبخوان و لایه نیمه‌نفوذپذیر را به دست آورد.



شکل (۴-۹) چاه پمپاژی در یک لایه نیمه‌تراوا

1- semiconfined aquifer

2- semipervious layer

۴-۲-۶-۱ شرایط ماندگار

پس از انجام آزمایش پمپاژ و ایجاد شرایط ماندگار، به وسیله دو روشی که در زیر به اختصار توضیح داده می‌شود، می‌توان ضرایب هیدرودینامیک را محاسبه کرد :

الف - روش دی‌گلی - هانتوش - ژاکوب[1] :

دی‌گلی، هانتوش و ژاکوب معادله زیر را برای افت نهایی (s_m) سطح پیزومتریک در فاصله r از چاه مورد آزمایش برای جریان ماندگار ارائه داده‌اند :

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} K_o(\frac{r}{B}) \qquad (۴-۲۶)$$

که در آن :

s_m افت تعادلی (ماکزیمم) در فاصله r از چاه

$$\frac{r}{B} = \frac{r}{\sqrt{T/(K'/b')}}$$

K' هدایت هیدرولیکی قائم لایه نیمه‌تراوا

b' ضخامت اشباع شده لایه نیمه‌تراوا

مقادیر تابع $K_o(\frac{r}{B})$ برحسب $(x) = \frac{r}{B}$ در (جدول ۴-۵) نشان داده شده است.

مقادیر s_m را می‌توان با پمپاژ درازمدت، یا با پمپاژ در زمان کوتاهتر و از راه برون‌یابی[2] افت نسبت به زمان طولانی، به دست آورد (پمپاژ طولانی موجب می‌شود که فرض ثابت بودن سطح ایستابی در اطراف چاه کمتر معتبر باشد). برای حل (معادله ۴-۲۶) و محاسبه T، باید s_m در چند پیزومتر اندازه‌گیری شود.

روش کار به این ترتیب است که پس از آزمایش پمپاژ، افتهای تعادلی یا ماکزیمم افتهای اندازه‌گیری شده (s_m) در چاههای پیزومتر را برحسب فاصله (r) از چاه اصلی بر روی یک کاغذ لگاریتمی پیاده می‌کنیم (r در محور طولها و s_m در محور عرضها). در روی کاغذ لگاریتمی دیگری با همان مقیاس، منحنی تغییرات $K_o(\frac{r}{B})$ را برحسب $\frac{r}{B}$ (باتوجه به جدول ۴-۵) رسم می‌کنیم ($\frac{r}{B}$ در محور طولها). آنگاه دو نمودار را روی هم قرار می‌دهیم و در حالی‌که محورهای مختصات موازی‌اند، آن‌قدر آنها را جابه‌جا می‌کنیم تا بیشترین نقاط اندازه‌گیری شده بر روی منحنی نمونه تغییرات $K_o(\frac{r}{B})$ به $\frac{r}{B}$ بیافتد. یک نقطه انطباق (m.p) انتخاب می‌کنیم و مختصات آن در روی هر دو نمودار می‌خوانیم. با قرار دادن مقادیر s_m، $K_o(\frac{r}{B})$ و Q (آبدهی پمپاژ) در فرمول (۴-۲۶) مقدار قابلیت انتقال (T) آبخوان محاسبه می‌شود.

1- Deglee - Hantush - Jacob

2- Extrapolation

سرانجام باتوجه به مقدار $\frac{r}{B}$ و T محاسبه شده و معلوم بودن b' می‌توان از رابطه $\frac{r}{B} = \frac{r}{\sqrt{T/(K'/b')}}$ هدایت هیدرولیکی قائم لایه نشتی (K') را حساب کرد.

جدول ۴-۵- مقادیر $K_0(x)$ و $e^x K_0(x)$ برحسب مقادیر مختلف x

x	$K_0(x)$	$e^x K_0(x)$	x	$K_0(x)$	$e^x K_0(x)$	x	$K_0(x)$	$e^x K_0(x)$
0.010	4.72	4.77	0.10	2.43	2.68	1.0	0.421	1.14
12	4.54	4.59	12	2.25	2.53	1.2	0.318	1.06
14	4.38	4.45	14	2.10	2.41	1.4	0.244	0.988
16	4.25	4.32	16	1.97	2.31	1.6	0.188	0.931
18	4.13	4.21	18	1.85	2.22	1.8	0.146	0.883
0.020	4.03	4.11	0.20	1.75	2.14	2.0	0.114	0.842
22	3.93	4.02	22	1.66	2.07	2.2	0.0893	0.806
24	3.85	3.94	24	1.58	2.01	2.4	0.0702	0.774
26	3.77	3.87	26	1.51	1.95	2.6	0.0554	0.746
28	3.69	3.80	28	1.44	1.90	2.8	0.0438	0.721
0.030	3.62	3.73	0.30	1.37	1.85	3.0	0.0347	0.698
32	3.56	3.68	32	1.31	1.81	3.2	0.0276	0.677
34	3.50	3.62	34	1.26	1.77	3.4	0.0220	0.658
36	3.44	3.57	36	1.21	1.73	3.6	0.0175	0.640
38	3.39	3.52	38	1.16	1.70	3.8	0.0140	0.624
0.040	3.34	3.47	0.40	1.11	1.66	4.0	0.0112	0.609
42	3.29	3.43	42	1.07	1.63	4.2	0.0089	0.595
44	3.24	3.39	44	1.03	1.60	4.4	0.0071	0.582
46	3.20	3.35	46	0.994	1.58	4.6	0.0057	0.570
48	3.16	3.31	48	0.958	1.55	4.8	0.0046	0.559
0.050	3.11	3.27	0.50	0.924	1.52	5.0	0.0037	0.548
52	3.08	3.24	52	0.892	1.50			
54	3.04	3.21	54	0.861	1.48			
56	3.00	3.17	56	0.832	1.46			
58	2.97	3.14	58	0.804	1.44			
0.060	2.93	3.11	0.60	0.777	1.42			
62	2.90	3.09	62	0.752	1.40			
64	2.87	3.06	64	0.728	1.38			
66	2.84	3.03	66	0.704	1.36			
68	2.81	3.01	68	0.682	1.35			
0.070	2.78	2.98	0.70	0.660	1.33			
72	2.75	2.96	72	0.640	1.32			
74	2.72	2.93	74	0.620	1.30			
76	2.70	2.91	76	0.601	1.28			
78	2.67	2.89	78	0.583	1.27			
0.080	2.65	2.87	0.80	0.565	1.26			
82	2.62	2.85	82	0.548	1.24			
84	2.60	2.83	84	0.532	1.23			
86	2.58	2.81	86	0.516	1.22			
88	2.55	2.79	88	0.501	1.21			
0.090	2.53	2.77	0.90	0.487	1.20			
92	2.51	2.75	92	0.473	1.19			
94	2.49	2.73	94	0.459	1.18			
96	2.47	2.72	96	0.446	1.16			
98	2.45	2.70	98	0.443	1.15			
0.100	2.43	2.68	1.00	0.421	1.14			

ب - روش هانتوش

راه‌حلی به وسیله هانتوش ارائه شده که نیازی به منحنی نمونه و انطباق ندارد. اگر $\frac{r}{B} < ۰/۰۵$ باشد می‌توان معادله (۴-۲۶) را به‌طور تقریبی به صورت زیر نوشت :

$$s_m = \frac{2.3Q}{2\pi T} \log \frac{1.12B}{r} \qquad (۴-۲۷)$$

برای حل این معادله و محاسبه T، کافی است که مقادیر s_m برحسب logr در روی یک نمودار نیمه‌لگاریتمی پیاده شود. از نقاط پیاده شده می‌توان یک خط مستقیم عبور داد (نقاطی که $\frac{r}{B} < ۰/۰۵$ باشد). تغییرات s_m در یک سیکل لگاریتمی (Δs_m) شیب خط را نشان می‌دهد که باتوجه به معادله (۴-۲۷) برابر است با :

$$\Delta s_m = \frac{2.3Q}{2\pi T}$$

و از آنجا می‌توان مقدار T را به دست آورد :

$$T = \frac{2.3Q}{2\pi \Delta s_m} \qquad (۴-۲۸)$$

اگر خط مستقیم را ادامه دهیم تا محور r را قطع کند (r_o)، دراین صورت باتوجه به معادله ۴-۲۷ داریم:

$$0 = \frac{2.3Q}{2\pi T} \log \frac{1.12B}{r_o}$$

از آنجاکه عبارت لگاریتمی باید مساوی صفر باشد، بنابراین :

$$B = \frac{r_o}{1.12} \qquad (۴-۲۹)$$

آنگاه با استفاده از رابطه $B = \sqrt{T/(K'/b')}$ می‌توان هدایت هیدرولیکی قائم لایه نیمه‌تراوا (K') را حساب کرد.

یادآوری می‌شود که با استفاده از روابط جریانهای ماندگار نمی‌توان ضریب ذخیره (S) را محاسبه کرد.

۴-۲-۶-۲ شرایط غیرماندگار

هانتوش و ژاکوب نشان دادند که افت سطح آب در پیزومتری که در یک آبخوان نشتی و در فاصله‌ای از چاه‌اصلی حفر شده باشد، با رابطه زیر بیان می‌شود :

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u , \frac{r}{B}) \qquad (۴-۳۰)$$

که در آن :

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \qquad (۴-۳۱)$$

معادله (۴-۳۰) شبیه معادله تیس (رابطه ۴-۸) در مورد آبخوانهای تحت فشار است، جز آن که تابع چاه در اینجا شامل عبارت $\frac{r}{B}$ نیز می‌شود. مقادیر $W(u , \frac{r}{B})$ برحسب مقادیر مختلف u و $\frac{r}{B}$ در جدول (۴-۶) نشان داده شده است.

در شرایط غیرماندگار برای حل معادله (۴-۳۰) از روشهای زیر استفاده می‌شود:

الف - روش والتون[1]

روش والتون برای حل معادله (۴-۳۰) شبیه به روش تیس برای حل معادله (۴-۸) است. ولی برای آبخوانهای نشتی به جای یک منحنی نمونه، باتوجه به مقادیر مختلف $\frac{r}{B}$ دسته‌ای از منحنی‌ها رسم می‌شود.

روش کار به این ترتیب است که در روی نموداری با محورهای مختصات لگاریتمی با استفاده از جدول (۴-۶) منحنی‌های تغییرات $W(u , \frac{r}{B})$ برحسب $\frac{1}{u}$ یا u، برای مقادیر مختلف $\frac{r}{B}$ رسم می‌شود (هر منحنی برای یک مقدار معین $\frac{r}{B}$). منحنی نمونه $\frac{r}{B} = 0$ با منحنی نمونه تیس یکسان است (شکل ۴-۱۰).

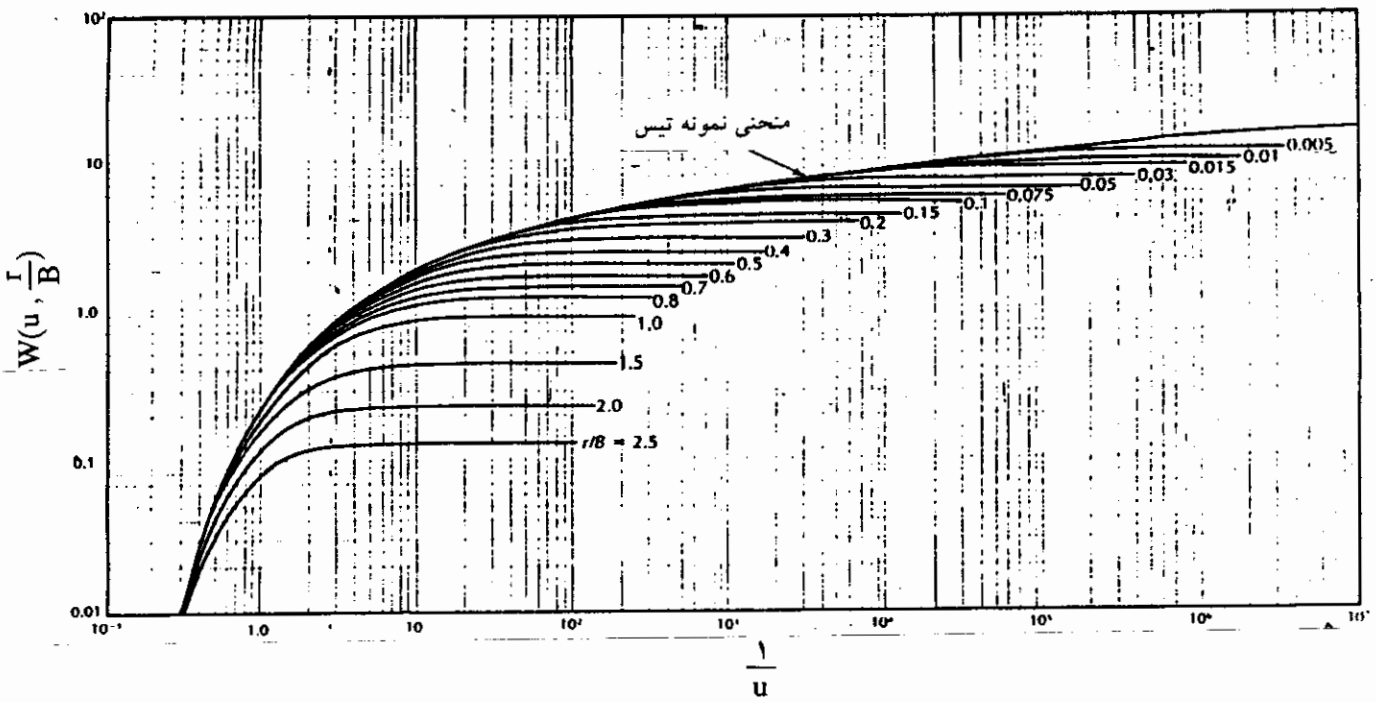
در روی کاغذ لگاریتمی دیگری با همان مقیاس، مقادیر افت - زمان را رسم می‌کنیم. منحنی داده‌ها را بر روی منحنی‌های نمونه والتون قرار می‌دهیم و درحالی که محورها موازی است، آن را حرکت می‌دهیم تا با یکی از منحنی‌های نمونه بهترین انطباق را داشته باشد. می‌توان منحنی داده‌ها را با یک خط فرضی در بین دو منحنی $\frac{r}{B}$ منطبق کرد. داده‌های افت مربوط به اوایل پمپاژ روی منحنی تیس می‌افتند. ولی وقتی تأثیر نشت بر روی جریان آب به طرف چاه آغاز شود، منحنی افت یکی از منحنی‌های $\frac{r}{B}$ را دنبال می‌کند.

بر روی نمودارهای منطبق شده یک نقطه انطباق انتخاب می‌کنیم و مختصات آن را روی هر دو نمودار می‌خوانیم. با قرار دادن مقادیر $W(u , \frac{r}{B})$ و s در رابطه (۴-۳۰) مقدار T را به دست می‌آوریم. پس از آن با قرار دادن u، r، T محاسبه شده، از رابطه (۴-۳۱) مقدار S را پیدا می‌کنیم.

1- Walton

جدول ۴-۶ مقادیر $W(u , \frac{r}{B})$ برحسب مقادیر مختلف u و $\frac{r}{B}$

M \ u	0.002	0.004	0.006	0.008	0.01	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1	2	4	6	8
0	12.7	11.3	10.5	9.89	9.44	8.06	6.67	5.87	5.29	4.85	3.51	2.23	1.55	1.13	0.842	0.228	0.0223	0.0025	0.0003
0.000002	12.1	11.2	10.5	9.89	9.44														
4	11.6	11.1	10.4	9.88	9.44														
6	11.3	10.9	10.4	9.87	9.44														
8	11.0	10.7	10.3	9.84	9.43														
0.00001	10.8	10.6	10.2	9.80	9.42	8.06													
2	10.2	10.1	9.84	9.58	9.30	8.06													
4	9.52	9.45	9.34	9.19	9.01	8.03	6.67												
6	9.13	9.08	9.00	8.89	8.77	7.98	6.67												
8	8.84	8.81	8.75	8.67	8.57	7.91	6.67												
0.0001	8.62	8.59	8.55	8.48	8.40	7.84	6.67	5.87	5.29										
2	7.94	7.92	7.90	7.86	7.82	7.50	6.62	5.86	5.29										
4	7.24	7.24	7.22	7.21	7.19	7.01	6.45	5.83	5.29	4.85									
6	6.84	6.84	6.83	6.82	6.80	6.68	6.27	5.77	5.27	4.85									
8	6.55	6.55	6.54	6.53	6.52	6.43	6.11	5.69	5.25	4.84									
0.001	6.33	6.33	6.32	6.32	6.31	6.23	5.97	5.61	5.21	4.83	3.51								
2	5.64	5.64	5.63	5.63	5.63	5.59	5.45	5.24	4.98	4.71	3.50								
4	4.95	4.95	4.95	4.94	4.94	4.92	4.85	4.74	4.59	4.42	3.48	2.23							
6	4.54				4.54	4.53	4.48	4.41	4.30	4.18	3.43	2.23							
8	4.26				4.26	4.25	4.21	4.15	4.08	3.98	3.36	2.23							
0.01	4.04				4.04	4.03	4.00	3.95	3.89	3.81	3.29	2.23	1.55	1.13					
2	3.35				3.35	3.35	3.34	3.31	3.28	3.24	2.95	2.18	1.55	1.13					
4	2.68				2.68	2.68	2.67	2.66	2.65	2.63	2.48	2.02	1.52	1.13	0.842				
6	2.30				2.30	2.29	2.29	2.28	2.27	2.26	2.17	1.85	1.46	1.11	0.839				
8	2.03					2.03	2.02	2.02	2.01	2.00	1.94	1.69	1.39	1.08	0.832				
0.1	1.82						1.82	1.82	1.81	1.80	1.75	1.56	1.31	1.05	0.819	0.228			
2	1.22						1.22	1.22	1.22	1.22	1.19	1.11	0.996	0.857	0.715	0.227			
4	0.702						0.702	0.702	0.701	0.700	0.693	0.665	0.621	0.565	0.502	0.210			
6	0.454						0.454	0.454	0.454	0.453	0.450	0.436	0.415	0.387	0.354	0.177	0.0222		
8	0.311						0.311	0.310	0.310	0.310	0.308	0.301	0.289	0.273	0.254	0.144	0.0218		
1	0.219									0.219	0.218	0.213	0.206	0.197	0.185	0.114	0.0207	0.0025	
2	0.049										0.049	0.048	0.047	0.046	0.044	0.034	0.011	0.0021	0.0003
4	0.0038											0.0038	0.0037	0.0037	0.0036	0.0031	0.0016	0.0006	0.0002
6	0.0004														0.0004	0.0003	0.0002	0.0001	0
8	0																		0



شکل ۴-۱۰- منحنی‌های نمونه والتون که تغییرات $W(u , \frac{r}{B})$ را برحسب $\frac{1}{u}$ برای مقادیر مختلف $\frac{r}{B}$ نشان می‌دهند.

با مقدار $\frac{r}{B}$ مربوط به منحنی نمونه دارای بهترین انطباق و استفاده از فرمول $\frac{r}{B} = \frac{r}{T/(K'/b')}$ می‌توان مقدار K' را نیز محاسبه کرد.

ب - روش هانتوش

هانتوش روشی در شرایط غیر ماندگار ارائه داد که نیازی به رسم منحنی‌های نمونه نیست. به‌طوری که در شکل (۴-۱۱) دیده می‌شود داده‌های افت نسبت به زمان در روی یک کاغذ نیمه‌لگاریتمی تقریباً به شکل S کشیده معکوس است. این منحنی در جایی دارای یک نقطه‌عطف است. روش نقطه عطف هانتوش مبتنی بر پیدا کردن این نقطه عطف (pi) بر روی منحنی s نسبت به logt است. نقطه عطف به عنوان نقطه‌ای که در آنجا افت (s_i) نصف افت ماکزیمم یا افت تعادلی (s_m) است، تعریف می‌شود. رابطه s_i به صورت زیر بیان می‌شود :

$$s_i = \frac{Q}{4\pi T} K_o(\frac{r}{B}) \qquad (۴-۳۲)$$

$K_o(\frac{r}{B})$ تابعی است که مقادیر آن برحسب $\frac{r}{B}$ در جدول (۴-۵) نشان داده شده است. به علاوه معلوم شده که مقدار u در نقطه عطف معادل $\frac{r}{2B}$ است. بنابراین رابطه ۴-۳۱ می‌شود :

$$u_i = \frac{r}{2B} = \frac{r^2 S}{4Tt_i} \qquad (۴-۳۳)$$

که در آن t_i مقدار t در نقطه عطف است. شیب منحنی در نقطه عطف که برحسب تغییرات s نسبت به t در یک سیکل لگاریتمی بیان می‌شود، به صورت زیر است:

$$\Delta s_i = \frac{2.3Q}{4\pi T} e^{-r/B} \qquad (۴-۳۴)$$

با حل این معادله برای r داریم :

$$r = 2.3\ B\ (\log \frac{2.3\ Q}{4\pi T} - \log \Delta s_i) \qquad (۴-۳۵)$$

سرانجام نسبت بین s_i و Δs_i به صورت زیر به دست می‌آید :

$$2.3 \frac{s_i}{\Delta s_i} = e^{r/B} K_o(\frac{r}{B}) \qquad (۴-۳۶)$$

حل : با توجه به (شکل ۴-۱۱)، مقدار افت ماکزیموم ۶/۴۲ متر برآورد می‌شود. بنابراین داریم :

$s_m = ۶/۴۲$ متر

$s_i = \frac{۱}{۲} s_m = ۳/۲۱$ متر

$t_i = ۳۲ \text{ min} \Rightarrow ۰/۰۲۲$ روز

شیب منحنی در نقطه عطف (مقدار افت در یک سیکل لگاریتمی) برابر است با :

$\Delta s_i = ۳/۱۰$ متر

آنگاه با استفاده از مقادیر s_i و Δs_i و (رابطه ۴-۳۶) مقدار $e^{r/B} K_o(\frac{r}{B})$ را محاسبه می‌کنیم :

$۲/۳ \frac{۳/۲۱}{۳/۱۰} = ۲/۳۸$

آنگاه با استفاده از (جدول ۴-۵) مقدار $\frac{r}{B}$ و $K_o(\frac{r}{B})$ را به دست آورده می‌شود. مقدار ۲/۳۸ مستقیماً در جدول وجود ندارد ولی با درون‌یابی بین ارقام ۲/۴۱ و ۲/۳۱ مقدار $\frac{r}{B}$ برابر ۰/۱۴۷ و مقدار $K_o(\frac{r}{B})$ برابر ۲/۰۵۵ به دست می‌آید. سپس با استفاده از (رابطه ۴-۳۲) مقدار T به دست می‌آید :

$$۳/۲۱ = \frac{۴۸۰۰}{۴ \times \pi \times T} \times ۲/۰۵۵$$

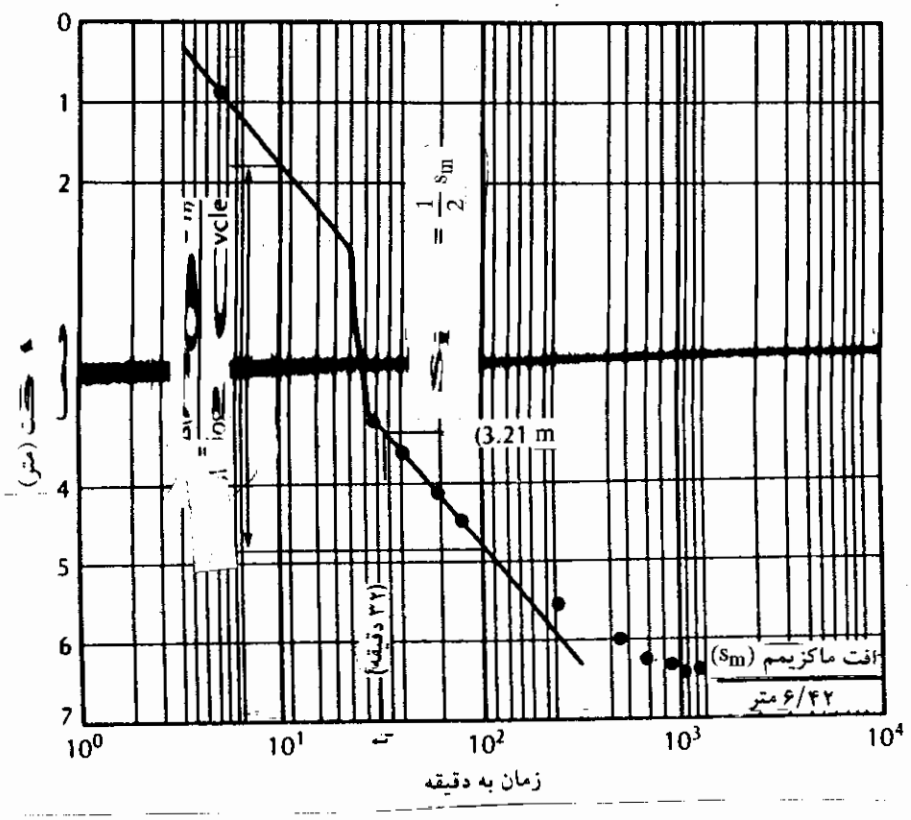
$T =$ مترمربع بر روز ۲۴۴

با داشتن مقدار $\frac{r}{B}$ و r مقدار B برابر ۶۵۳ متر محاسبه می‌شود. حال با استفاده از فرمول (۴-۳۳)، مقدار S را محاسبه می‌کنیم :

$$\frac{۹۶}{۲ \times ۶۵۳} = \frac{۹۶^۲ \times S}{۴ \times ۲۴۴ \times ۰/۰۲۲}$$

$S = ۰/۰۰۰۱۷$

مقادیر تابع $e^{r/B}K_o(\frac{r}{B})$ برای مقادیر مختلف $(\frac{r}{B} = x)$ در جدول ۴-۵ آمده است. برای محاسبه T و S از آزمایش پمپاژ، روش کار به این ترتیب است که ابتدا مقدار s در یک چاه پیزومتر برحسب logt در روی کاغذ نیمه‌لگاریتمی پیاده می‌شود. بر نقاط پیاده شده یک خط برازش داده می‌شود (مطابق شکل ۴-۱۱). اگر آزمایش به حالت تعادل رسیده باشد افت ماکزیمم تعیین می‌شود. ولی اگر افت همچنان ادامه داشته باشد می‌توان افت ماکزیمم را تخمین زد یا با برون‌یابی منحنی، مقدار افت برای زمانهای طولانی را به دست آورد. سپس نقطه عطف P_i را در محل $s_i = \frac{1}{2} s_m$ مشخص می‌کنیم و مقدار t_i نظیر آن را در روی نمودار قرائت می‌شود. شیب منحنی افت در نقطه عطف به طریق ترسیمی با رسم خط مماس بر نقطه P_i تعیین می‌شود (Δs_i). مقادیر s_i و Δs_i را برای محاسبه $e^{r/B}K_o(\frac{r}{B})$ در رابطه (۴-۳۶) قرار داده می‌شود و مقدار $\frac{r}{B}$ نظیر آن را از جدول (۴-۵) به دست می‌آید. بنابراین مقدار $K_o(\frac{r}{B})$ را نیز می‌توان از این جدول برآورد کرد. پس از آن مقدار T با استفاده از رابطه (۴-۳۲) و مقدار S با استفاده از رابطه (۴-۳۳) قابل محاسبه است.



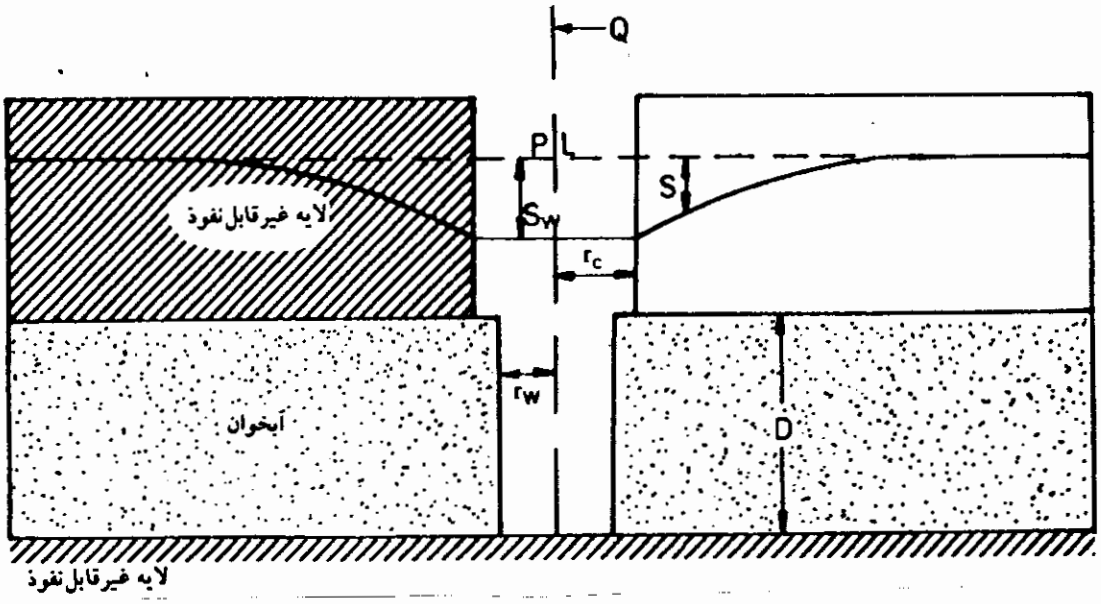
شکل ۴-۱۱- منحنی تغییرات افت نسبت به زمان در یک نمودار نیمه‌لگاریتمی برای تحلیل روش نقطه عطف هانتوش

مثال : چاهی که در یک آبخوان تحت فشار حفر شده با آبدهی ثابت ۴۸۰۰ مترمکعب بر روز پمپاژ می‌شود. داده‌های افت نسبت به زمان در پیزومتری که به فاصله ۹۶ متری چاه اصلی قرارگرفته در نمودار نیمه‌لگاریتمی (شکل ۴-۱۱) پیاده شده است. ضرایب T و S به روش نقطه عطف هانتوش محاسبه می‌شود.

۴-۲-۷ روش پاپادوپولوس - کوپر[1]

گاهی اوقات ممکن است آزمایش پمپاژ در چاههائیکه دارای قطر زیاد هستند، انجام شود. در این صورت روشهائیکه قبلاً شرح داده شد نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد زیرا فرض اصلی در این روشها کوچک بودن قطر چاه و یا بعبارت دیگر همزمان بودن افت آبخوان با شروع پمپاژ است. بنابراین اگر قطر چاهی نسبتاً زیاد باشد در تحلیل ارقام حاصل از آزمایش پمپاژ باید آب ذخیره شده در چاه منظور شود و بعلاوه چاه مورد آزمایش باید فاقد تونلهای افقی باشد.

پاپادوپولوس -کوپر در سال ۱۹۶۷ روشی را برای تحلیل آزمایش پمپاژ در چاههای دهانه گشاد در آبخوانهای تحت فشار و شرایط غیرماندگار ارائه دادند (شکل ۴-۱۲).



شکل ۴-۱۲- برش چاه دهانه گشاد در آبخوان محصور

فرضیات و شرایط این آزمایش همان شرایطی است که قبلاً به آنها اشاره گردید باستثناء فرض کوچک بودن قطر چاه که در اینجا قطر چاه کوچک نیست و بدین جهت مقدار ذخیره آب در داخل چاه قابل چشم‌پوشی نیست.
معادله عمومی جریان آب به داخل چاهی که قطر آن بزرگ است چنین است.

$$s_w = \frac{Q}{4\pi T} F(U_w, \beta) \qquad (۳۷-۴)$$

1- papadopulos - cooper method

$$U_w = \frac{r_w^2 S}{4Tt} \qquad (۳۸-۴)$$

$$\beta = \frac{r_w^2 S}{r_c^2} \qquad (۳۹-۴)$$

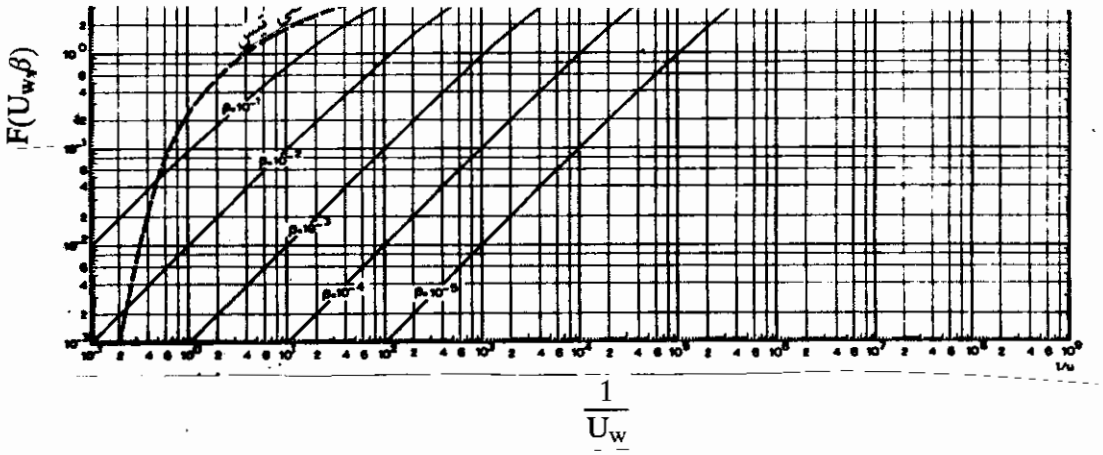
که در آن :

- $F(U_w,\beta)$ عاملی است که مقادیر عددی آن در جدول شماره ۴-۷ ارائه شده است.
- s_w افت در چاه پمپاژ در زمان t به متر
- r_w شعاع چاه در قسمت آبخوان (لایه اشباع) به متر
- r_c شعاع چاه در قسمت غیرقابل نفوذ یا بالای آبخوان به متر
- Q آبدهی ثابت چاه به مترمکعب به روز

جدول ۴-۷- مقادیر $F(U_w,\beta)$

$1/u_w$	$\beta=10^{-1}$	$\beta=10^{-2}$	$\beta=10^{-3}$	$\beta=10^{-4}$	$\beta=10^{-5}$
1(-1)	9.75(-3)	9.98(-4)	1.00(-4)	1.00(-5)	1.00(-6)
1(0)	9.19(-2)	9.91(-3)	9.99(-4)	1.00(-4)	1.00(-5)
2(0)	1.77(-1)	1.97(-2)	2.00(-3)	2.00(-4)	2.00(-5)
5(0)	4.06(-1)	4.89(-2)	4.99(-3)	5.00(-4)	5.00(-5)
1(1)	7.34(-1)	9.66(-2)	9.97(-3)	1.00(-3)	1.00(-4)
2(1)	1.26	1.90(-1)	1.99(-2)	2.00(-3)	2.00(-4)
5(1)	2.30	4.53(-1)	4.95(-2)	4.99(-3)	5.00(-4)
1(2)	3.28	8.52(-1)	9.83(-2)	9.98(-3)	1.00(-3)
2(2)	4.25	1.54	1.94(-1)	1.99(-2)	2.00(-3)
5(2)	5.42	3.04	4.72(-1)	4.97(-2)	5.00(-3)
1(3)	6.21	4.54	9.07(-1)	9.90(-2)	9.99(-3)
2(3)	6.96	6.03	1.69	1.96(-1)	2.00(-2)
5(3)	7.87	7.56	3.52	4.81(-1)	4.98(-2)
1(4)	8.57	8.44	5.53	9.34(-1)	9.93(-2)
2(4)	9.32	9.23	7.63	1.77	1.97(-1)
5(4)	1.02(1)	1.02(1)	9.68	3.83	4.86(-1)
1(5)	1.09(1)	1.09(1)	1.07(1)	6.24	9.49(-1)
2(5)	1.16(1)	1.16(1)	1.15(1)	8.99	1.82
5(5)	1.25(1)	1.25(1)	1.25(1)	1.17(1)	4.03
1(6)	1.32(1)	1.32(1)	1.32(1)	1.29(1)	6.78
2(6)	1.39(1)	1.39(1)	1.39(1)	1.38(1)	1.01(1)
5(6)	1.48(1)	1.48(1)	1.48(1)	1.48(1)	1.37(1)
1(7)	1.55(1)	1.55(1)	1.55(1)	1.55(1)	1.51(1)
2(7)	1.62(1)	1.62(1)	1.62(1)	1.62(1)	1.60(1)
5(7)	1.70(1)	1.70(1)	1.70(1)	1.71(1)	1.71(1)
1(8)	1.78(1)	1.78(1)	1.78(1)	1.78(1)	1.78(1)
2(8)	1.85(1)	1.85(1)	1.85(1)	1.85(1)	1.85(1)
5(8)	1.94(1)	1.94(1)	1.94(1)	1.94(1)	1.94(1)
1(9)	2.01(1)	2.01(1)	2.01(1)	2.01(1)	2.01(1)

روش کار به این ترتیب است که در روی کاغذ لگاریتمی گروه منحنی‌های نمونه $F(U_w,\beta)$ در مقابل $\frac{1}{U_w}$ برای مقادیر مختلف β با استفاده از جدول ۴-۷ ترسیم می‌شود. (شکل ۴-۱۳)



شکل ۴-۱۳ گروه منحنی‌های نمونه پاپادوپولوس -کوپر [مقادیر $F(U_w,\beta)$ در مقابل $\frac{1}{U_w}$]

در روی کاغذ لگاریتمی دیگر با همان مقیاس، مقادیر افت داخل چاه (s_w) را در مقابل مقادیر t ثبت می‌شود.

- منحنی پمپاژ روی منحنی‌های نمونه قرار داده و درحالی‌که محورهای آنها با یکدیگر موازیند آنقدر آنها را جابجا می‌کنند تا منحنی پمپاژ حداکثر انطباق را با یکی از منحنیهای نمونه داشته باشد.
- نقطه دلخواه A را روی صفحه منحنی‌ها انتخاب کرده و مقادیر $F(U_w,\beta)$ ، $\frac{1}{U_w}$ ، t و β یادداشت می‌شود.
- مقادیر $F(U_w,\beta)$ ، s_w و نیز مقدار Q را در (معادله ۴-۳۷) می‌گذارید و مقدار T محاسبه می‌شود.
- با قرار دادن مقادیر r_w ، $\frac{1}{U_w}$ ، T در (معادله ۴-۳۸) و یا با قراردادن مقادیر r_c و r_w و β در (معادله ۴-۳۹) مقدار (S) ضریب ذخیره که از دو راه به‌دست می‌آید باید به هم نزدیک باشند.

در مواردی که منحنی افت - زمان بر روی منحنی‌های $\beta = 10^{-2}$ و $\beta = 10^{-1}$ منطبق شود ضریب ذخیره محاسبه شده با استفاده از (فرمول ۴-۳۹) قابل قبول نیست.

توضیحات

فرض تحت فشار بودن آبخوان مورد آزمایش یکی از شرایط استفاده از این روش است، در صورتی‌که اغلب چاههای دهانه گشاد در آبخوانهای آزاد حفر شده‌اند. بعلاوه یکی دیگر از شرایط لازم استفاده از فرمولها، ثابت بودن ضریب قابلیت انتقال (T) و ضریب ذخیره (S) در طول مدت آزمایش است که البته در آبخوانهای تحت فشار در تمام مدت آبکشی با یک آبدهی ثابت سطح پیزومتریک بالاتر از سطح فوقانی آبخوان در لایه غیرقابل نفوذ قرار داشته که در این صورت این دو عامل (S,T) در تمام طول آزمایش ثابت خواهد ماند، ولی در مورد آبخوانهای آزاد سطح آب در

آبخوان افت کرده و درنتیجه ضخامت اشباع کاهش می‌یابد. اگر میزان این افت نسبت به ضخامت لایه اشباع افزایش یابد، ضرایب مذکور نیز تغییر خواهند کرد. بنابر این در این حالت لازم است افت‌های اندازه‌گیری شده در طول مدت آزمایش قبلاً تصحیح شوند (با استفاده از رابطه ۴-۵).

آن قسمت از منحنی نمونه که تقریباً به‌صورت خط راست است نماینده زمانی است که قسمت اعظم آب از ذخیره موجود چاه تخلیه می‌شود. بدین جهت نقاطی از منحنی پمپاژ که در روی این قسمت از منحنی نمونه قرار می‌گیرند نمی‌تواند نمایشگر واقعی اختصاصات آبخوان باشد.

از آنجا که تغییرات منحنی نمونه نسبت به تغییرات β ناچیز است مقدار ضریب ذخیره (S) که با این روش به‌دست می‌آید چندان قابل اطمینان نیست.

در صورت امکان بهتر است یک پیزومتر در فاصله خیلی کم از چاه پمپاژ حفر شود تا به کمک آن بتوان نسبت به قابل اغماض بودن مقدار افت در دیواره چاه کاملاً اطمینان یافت.

۴-۲-۸ محاسبه ضریب قابلیت انتقال در چاههای ناقص

در چاههایی که تمامی ضخامت آبخوان را حفر نکرده‌اند جریان شعاعی به طرف چاه فقط از بخش حفر شده دریافت می‌شود. به‌علاوه حفر چاه ناقص در آبخوان سبب ایجاد یک جریان قائم بطرف چاه خواهد شد (شکل ۴-۱۴) بنابراین سطح پیزومتریک در این گونه چاه‌ها فقط به r (فاصله پیزومتر از چاه) بستگی نداشته و تحت تأثیر جریان قائم نیز قرار خواهد گرفت به‌طوری‌که اگر دو پیزومتر فاصله یکسانی از چاه اصلی داشته ولی عمقهای متفاوتی داشته باشند، ارتفاع سطح پیزومتریک در آنها متفاوت است.

در پیزومترهایی که در فاصله ۱/۵ برابر ضخامت آبخوان از چاه قرار گرفته باشند جریان قائم قابل چشم‌پوشی است و بنابراین معادلات جریان شعاعی برای تحلیل نتایج پمپاژ در آنها کاربرد دارد. اما در پیزومترهایی که فاصله آنها کمتر از ۱/۵ برابر ضخامت آبخوان از چاههای ناقص است، جریانهای منحرف شده از خط شعاعی افقی سبب افزایش افت در یک آبدهی معین نسبت به چاه کامل می‌شود. موسکت[1] (۱۹۴۶) روابط تقریبی بین آبدهی یک چاه ناقص و چاه کامل را به‌صورت معادله ذیل بیان کرده است :

$$(\frac{Q}{s_w})p = \frac{Q}{s_w} \{\frac{l}{b} [1 + 7(\frac{r_w}{2l})^{1/2} \cos \frac{\pi l}{2b}]\} \qquad (۴۰-۴)$$

1- Muskat

زیرنویس P نشانه چاه ناقص[1] است.

معادله (۴-۴۰) برای حالتی است که بخش حفر شده یا مشبک در سمت بالایی آبخوان قرار گرفته باشد. در عمل معادله برای چاههایی که فقط بخشی از ضخامت آبخوان را حفر کرده باشند کاربرد دارد و برای مشبک کردن در بخش انتهایی یک چاه نمی‌توان از آن استفاده کرد.

برای به‌دست آوردن ظرفیت ویژه[2] چاهی که در تمامی ضخامت آبخوان حفر شده باشد معادله (۴-۴۰) به‌صورت ذیل درخواهد آمد :

$$\frac{Q}{s_w} = \frac{(Q/s_w)p}{(l/b)[1 + 7(r_w/2l)^{1/2} \cos(\pi l/2b)]} \qquad (۴۱-۴)$$

که در آن :

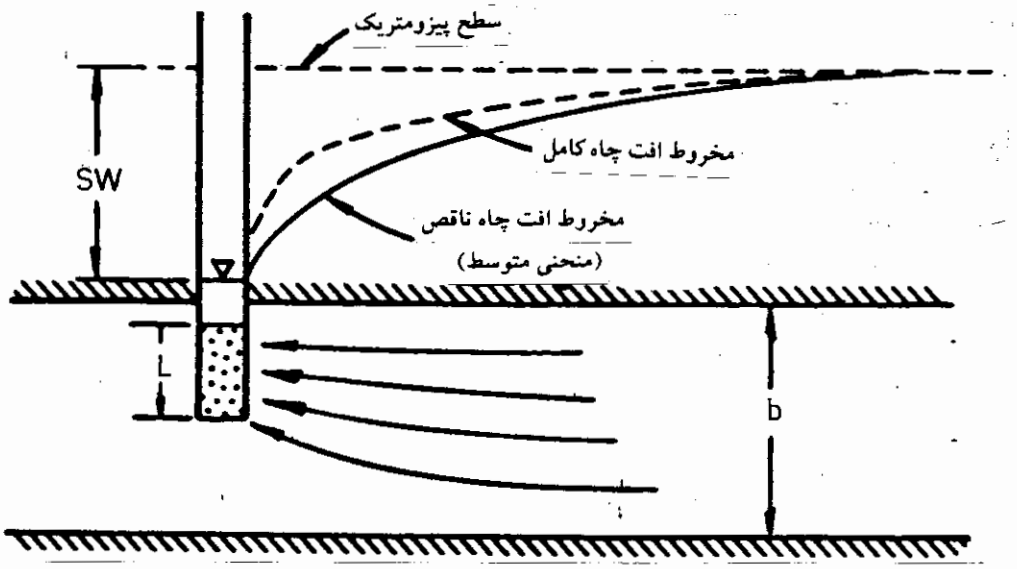
$(\frac{Q}{s_w})_p$ = ظرفیت ویژه چاه ناقص

l = ضخامت بخش اشباع شده چاه ناقص

b = ضخامت آبخوان

r_w = شعاع چاه ناقص

$\frac{Q}{s_w}$ = ظرفیت ویژه چاه کامل



شکل ۴-۱۴ جریان به طرف چاه ناقص

1- Partial penetrating well

2- Specific capacity

بدین ترتیب با اندازه‌گیری $(\frac{Q}{s_w})_p$ در چاه ناقص، ظرفیت ویژه یک چاه کامل از آبخوان موردنظر به‌دست می‌آید. این روش به شرطی اعتبار دارد که چاه حداقل ده درصد از بخش اشباع را قطع کرده باشد. معمولاً چاههایی که بیش از ۸۰ درصد بخش اشباع را قطع کنند به‌عنوان چاه کامل تلقی می‌شوند. با به‌دست آوردن ظرفیت ویژه و یا آبدهی مخصوص در یک چاه کامل می‌توان ضرایب هیدرودینامیک آبخوان را محاسبه کرد (مبحث ۴-۲-۹).

۴-۲-۹ برآورد ضریب قابلیت انتقال آبخوان با استفاده از داده‌های ظرفیت ویژه چاه

دانستن ظرفیت ویژه یک چاه در برآورد ضریب انتقال اهمیت دارد. معمولاً در چاههای بهره‌برداری آزمایش پمپاژ با هدف محاسبه ضرایب هیدرودینامیک انجام نمی‌گیرد. اما به هر حال با یک آزمایش چند ساعته،آبدهی و حداکثر افت ایجاد شده در چاه قابل اندازه‌گیری است. حاصل تقسیم مقدار آبدهی بر حداکثر افت ایجاد شده ظرفیت ویژه چاه نامیده می‌شود. در معادله ۴-۱۱ اگر Q بر حسب مترمکعب بر روز و t بر حسب روز، r و s برحسب متر قرار داده شود، ضریب قابلیت انتقال بر حسب متر مربع بر روز به دست خواهد آمد.

در این معادله T در هر دو سمت معادله به ترتیب در مقیاسهای حسابی (سمت چپ معادله) و لگاریتمی (سمت راست معادله) وجود دارد. بنابراین برای حل معادله باید مقادیری برای T فرض کرد و آن را برای به‌دست آوردن مقدار $\frac{Q}{s_w}$ حل کرد. وقتیکه مقدار $\frac{Q}{s_w}$ به‌دست آمده از معادله با مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایش مطابقت کرد، مقدار ضریب قابلیت انتقال آبخوان برآورد شده است.

این روش دارای دو نقص است، اول آنکه باید مقدار S نیز تخمین زده شده باشد و معلوم نیست که مقدار تخمین زده شده دقیقاً مقدار S حقیقی آبخوان باشد. دوم آنکه اساس فرضیه بر آن است که چاه با راندمان ۱۰۰ درصد کار کند. درحالیکه افت اندازه‌گیری شده در چاه تحت تأثیر افت شبکه نیز بوده است. بنابراین علیرغم صرف وقت زیاد برای جای‌گذاری مقادیر مختلف T و S برای محاسبه ظرفیت ویژه‌ای معادل ظرفیت ویژه اندازه‌گیری شده، ملاحظه می‌شود که T به‌دست آمده از دقت لازم برخوردار نیست. با این وصف روشهای تجربی مختلفی برای برآورد ضرایب هیدرودینامیک با استفاده از ظرفیت ویژه، ارائه شده که اساس محاسبات در تمامی آنها بر معادله تیس استوار است. و چند نمونه آن در ذیل توضیح داده می‌شود:

الف - در سال ۱۹۹۱ رازاک و هانتلی[1] مطالعات مفصلی برای به‌دست آوردن روابط بین T و ظرفیت ویژه در یک

1- Razack and Huntley

آبخوان آبرفتی در مراکش انجام دادند. بدین منظور داده‌های ۲۱۵ چاه که در آن T و ظرفیت ویژه مستقلاً به‌دست آمده بود، مورد استفاده قرار گرفت و بالاخره منجر به ارائه رابطه تجربی زیر گردید :

$$T = 15.3 \left(\frac{Q}{s_w}\right)^{0.67} \qquad (۴۲-۴)$$

که در آن :

T = ضریب قابلیت انتقال (مترمربع در روز)

Q = آبدهی چاه (مترمکعب در روز)

s_w = افت (متر)

بنابراین با به‌دست آوردن ظرفیت ویژه چاه کامل از طریق معادله (۴-۴۱) و جای‌گذاری آن در معادله (۴-۴۲) مقدار ضریب قابلیت انتقال حقیقی آبخوان قابل محاسبه خواهد بود.

ب - اگر در معادله (۴-۱۱) آبدهی را بر حسب لیتر در ثانیه و t بر حسب روز قرار داده شود و عبارت $T - 15.8112 \frac{Q}{s} \log T \times 10^{-6}$ برابر T' و عبارت $16.62 - 15.8112 \log r^2 \times 10^{-6}$ برابر K در نظر گرفته شود داریم:

$$T' = \frac{Q}{s}\left[K + 15.8112 \log \frac{t}{5S}\right] \qquad (۴۳-۴)$$

بر اساس رابطه $K = 16.62 - 15.8112 \log r^2 \times 10^{-6}$، جدول ۴-۸ برای r (شعاع چاه) و K تهیه شده است. در این رابطه شعاع چاه برحسب اینچ است.

جدول ۴-۸ مقادیر K برای شعاع چاههای مختلف

شعاع چاه اینچ	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
(K)	152.41	142.89	137.32	133.37	130.31	127.8	125.69	123.85	122.34	120.79	119.48	118.28

بنابراین پس از محاسبه r از رابطه فوق و یا جدول (۴-۸) مقدار T' از رابطه (۴-۴۳) تعیین می‌شود و با استفاده از نمودارهای (۴-۱۴) و یا (۴-۱۵) مقدار T (ضریب قابلیت انتقال حقیقی آبخوان) برآورد می‌شود. چون مقدار

ضریب ذخیره در رابطه (۴-۴۳) در مقیاس لگاریتمی است، فرض کردن مقدار آن و جای گذاری در رابطه فوق تاثیر ناچیزی بر محاسبه T و در نتیجه T دارد و ضریب قابلیت انتقال باتقریب قابل قبولی برآورد می‌شود.

ج - محاسبه T با استفاده از نمودار تغییرات $\frac{Q}{s}$ نسبت به T

بر اساس معادله کوپر - ژاکوب (رابطه ۴-۱۱) رابطه زیر برقرار است :

$$\frac{Q}{s} = \frac{T}{4.4 \log T + 4.4 \log [2.25\ t/(r^2_w.S)]}$$

در این معادله :

$\frac{Q}{s}$ = ظرفیت ویژه بر حسب مترمکعب بر ساعت به متر

T = ضریب قابلیت انتقال بر حسب متر مربع بر روز

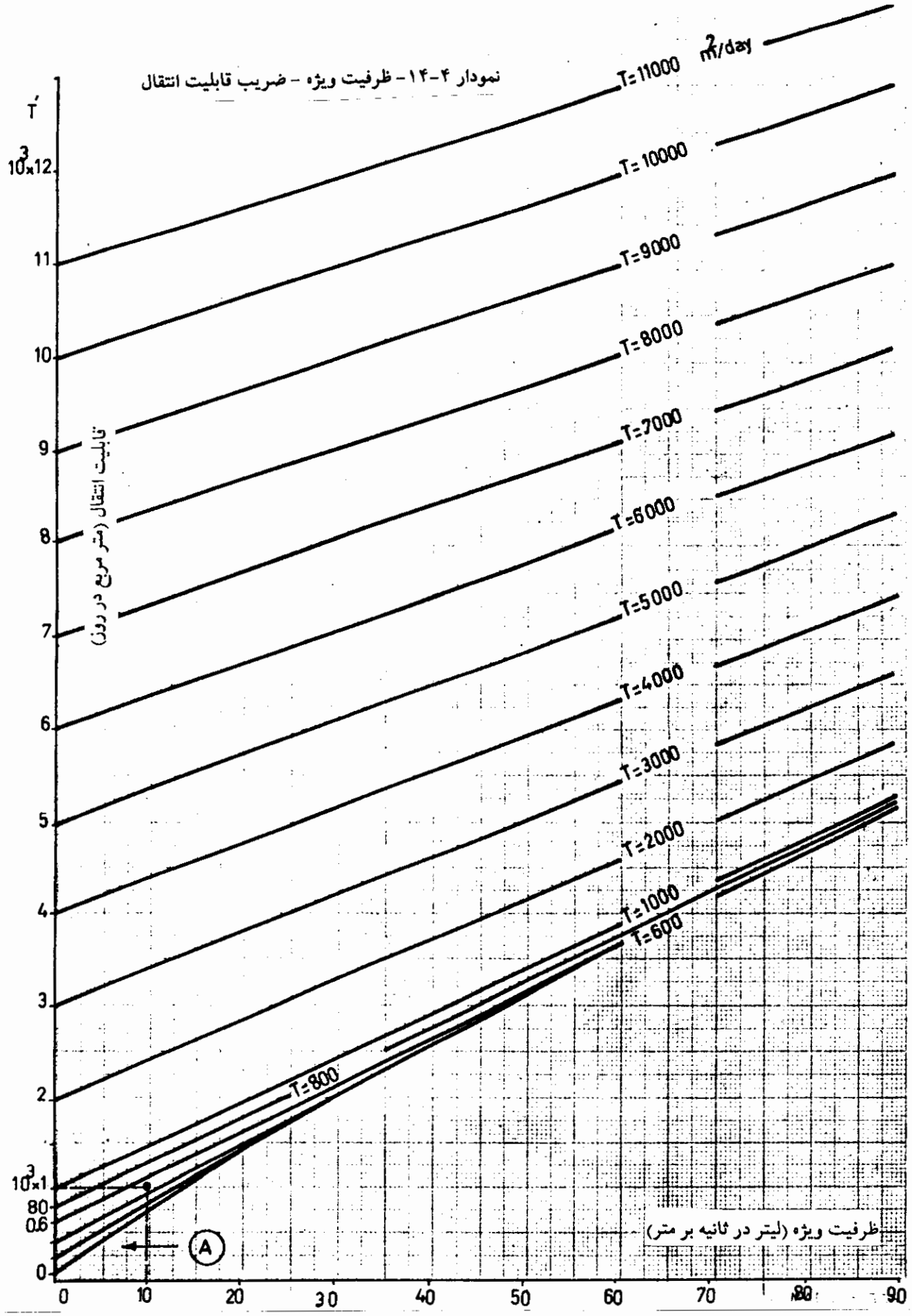
t = زمان برحسب روز

r = شعاع چاه بر حسب متر

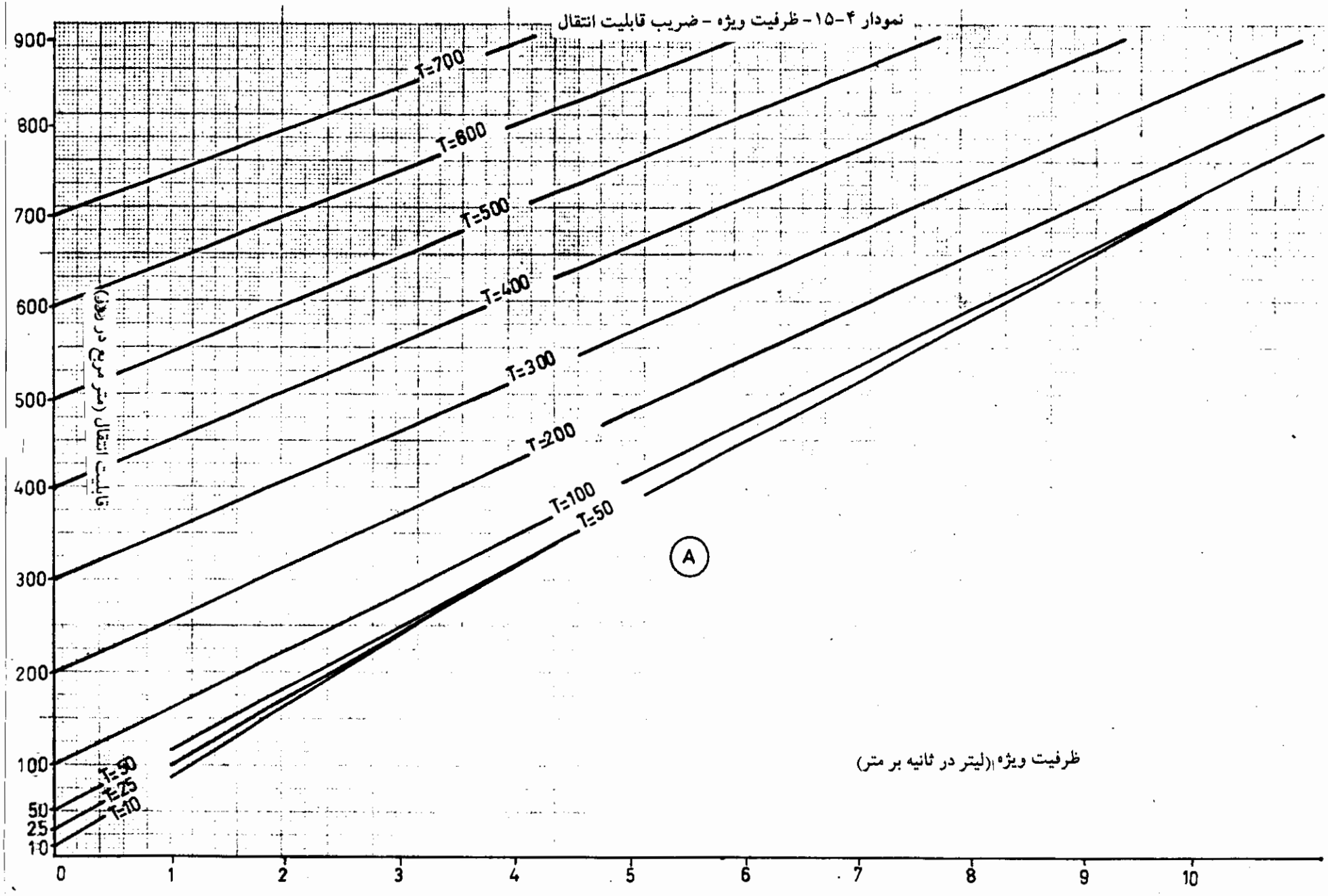
S = ضریب ذخیره

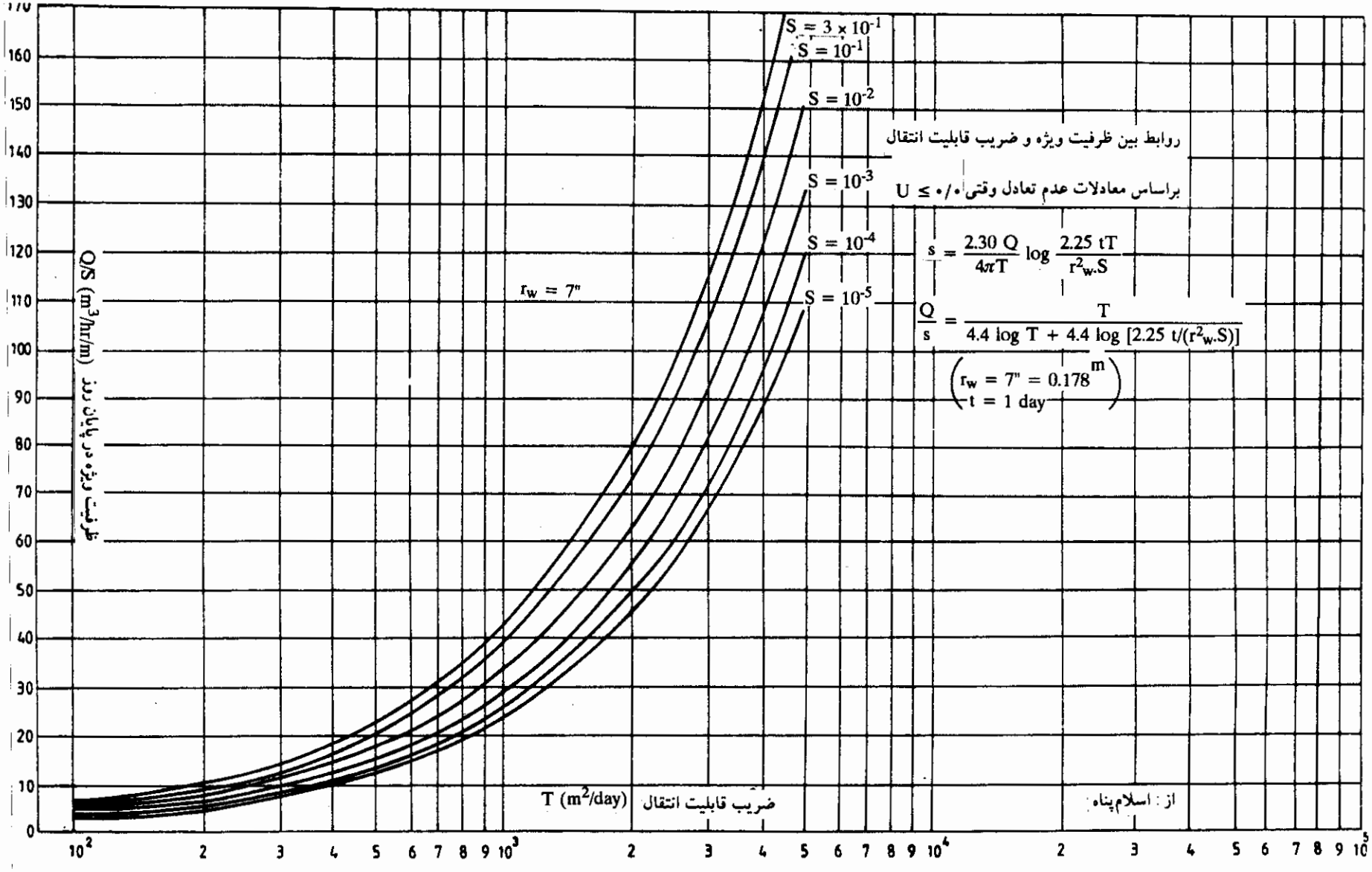
نمودار تغییرات $\frac{Q}{s}$ نسبت به T با فرض اینکه شعاع چاه (متر) r_w = ۰/۱۷۸ (۷ اینچ)، زمان پمپاژ t = ۲۴ ساعت و $u \leq 0.01$ باشد برای مقادیر مختلف ضریب ذخیره (S) بر روی کاغذ نیمه لگاریتمی ترسیم شده است (نمودار ۴-۱۶) با اندازه‌گیری آبدهی و افت سطح آب در چاه پس از ۲۴ ساعت پمپاژ ظرفیت ویژه چاه به‌دست می‌آید. باتوجه به شرایط آبخوان رقمی برای ضریب ذخیره در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از این نمودار مقدار تقریبی T به‌دست می‌آید.

مثال : آبدهی چاهی پس از ۲۴ ساعت پمپاژ ۳۰۰ مترمکعب بر ساعت و افت سطح آب حدود ۴ متر است (افت در آبخوان)، ظرفیت ویژه $\frac{Q}{s}$ برابر ۷۵ مترمکعب در ساعت بر متر خواهد بود در صورتی‌که ضریب ذخیره آبخوان آزاد را ۱۵ درصد در نظر بگیریم T حدود ۲۰۰۰ مترمربع بر روز به‌دست می‌آید.


نمودار ۴-۱۴- ظرفیت ویژه - ضریب قابلیت انتقال
T'
$10^3 \times 12$
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
$10^3 \times 1$
80
0.6
0
قابلیت انتقال (متر مربع در روز)
T=11000
T=10000
T=9000
T=8000
T=7000
T=6000
T=5000
T=4000
T=3000
T=2000
T=1000
T=600
T=800
m²/day
A
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
ظرفیت ویژه (لیتر در ثانیه بر متر)

نمودار ۴-۱۵- ظرفیت ویژه - ضریب قابلیت انتقال




روابط بین ظرفیت ویژه و ضریب قابلیت انتقال
براساس معادلات عدم تعادل وقتی U ≤ ۰/۰
$\frac{s}{} = \frac{2.30\ Q}{4\pi T} \log \frac{2.25\ tT}{r^2_w.S}$
$\frac{Q}{s} = \frac{T}{4.4 \log T + 4.4 \log [2.25\ t/(r^2_w.S)]}$
$r_w = 7" = 0.178^m$
t = 1 day
$S = 3 \times 10^{-1}$
$S = 10^{-1}$
$S = 10^{-2}$
$S = 10^{-3}$
$S = 10^{-4}$
$S = 10^{-5}$
$r_w = 7"$
Q/S (m^3/hr/m) ظرفیت ویژه در پایان روز
T (m^2/day) ضریب قابلیت انتقال
از : اسلام‌پناه

۴-۲-۱۰ تعیین مرزهای محدودکننده یک آبخوان

برای توضیح نحوه تعیین مرزهای هیدروژئولوژیک لازم است که ابتدا اشاره مختصری به قانون زمانها[1] داشته باش
بنابه این قانون اگر دو پیزومتر در فواصل r_1، r_2 ازیک چاه پمپاژی قرار گرفته باشند و افت در آنها برابر و یا مسا
صفر باشد ($s_1=s_2$) طبق معادله ۴-۱۱ خواهیم داشت :

$$g\frac{2.25\,Tt_1}{r_1^2\,S} = \log\frac{2.25\,Tt_2}{r_2^2\,S} \qquad (۴۴-۴)$$

و پس از ساده شدن :

$$\frac{t_1}{r_1^2}=\frac{t_2}{r_2^2} \qquad (۴۵-۴)$$

بنابراین نتیجه می‌گیریم دریک آبخوان معین وقتی‌که افت در پیزومترها برابرصفر باشد و یا در زمانهائی که افت د
پیزومترها برابر باشد، تغییرات زمان مستقیماً با تغییرات مربع فواصل پیزومترها از چاه مورد آزمایش متناسب است
و از تغییرات آبدهی پمپاژ تبعیت نمی‌کند. این اصل قانون زمانها نامیده شده است.

در اغلب موارد برای تشخیص فاصله و جهت مرزهای هیدروژئولوژیک ازیک چاه اطلاعات کافی زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی در یک ناحیه وجود دارد. در مواردی‌که چنین اطلاعاتی در دسترس نباشد، داده‌های آزمایش پمپاژ چاه باید تحلیل شوند. مخروط افت حاصل از پمپاژ دریک چاه معمولاً شکل مشخص و معینی برحسب نوع مرز موجود (تغذیه و یا نفوذناپذیر) به‌وجود می‌آورد که در مبحث ۲-۲-۲ به آن اشاره شد. برای تشخیص و برآورد فاصله و جهت مرزهای هیدروژئولوژیک با بهره‌گیری از داده‌های آزمایش پمپاژ، می‌توان از راه حل‌های تحلیلی ارائه شده توسط تیس و ژاکوب استفاده کرد.

روش تحلیل ژاکوب به سبب شکست شیب خط مستقیم برازش داده شده بر نقاط حاصل از داده‌های آزمایش (افت - زمان)، معمولاً برای تشخیص مرزها آسانتر از روش منحنی نمونه تیس است. چه، منحنی‌های حاصل از داده‌ها در مواردی تشخیص بین وجود یک مرز تغذیه در آبخوان و یا وجود یک آبخوان نشتی و یا آبخوانی با آبدهی تأخیری را مشکل می‌سازد.

1- law of times

۴-۲-۱۰-۱ تعیین موقعیت مرز هیدروژئولوژیک بااستفاده از راه حل ژاکوب (خط مستقیم):

حل معادله $s=\frac{2.3\ Q}{4\pi T}\log\left(\frac{2.25Tt}{r^2S}\right)$ نشان می‌دهدکه شیب خط نمودار نیمه لگاریتمی به میزان آبدهی و ضریب قابلیت آبخوان بستگی دارد. در آزمایشهای با آبدهی ثابت مقدار ضریب قابلیت آبخوان نیز ثابت فرض می‌شود. اگر داده‌های اندازه‌گیری شده (افت و زمان) در یک پیزومتر برروی کاغذ نیمه لگاریتمی رسم شود (زمان برروی محور لگاریتمی)، ملاحظه می‌شود که در اوائل آزمایش نقاط پیاده شده شکل منحنی دارند. با ادامه آزمایش به‌تدریج نقاط حاصل از داده‌ها برروی یک خط مستقیم قرار می‌گیرند. زمانی‌که ناحیه تحت تأثیر آزمایش به مرزی غیرقابل نفوذ می‌رسد، مقدار افت اندازه‌گیری شده دو برابر خواهد شد. همانگونه که قبلاً نیز در مبحث ۲-۲-۲ بیان شد، این امر تحت تأثیرافت ناشی از یک چاه مجازی است که در طرف دیگر مرز نفوذناپذیر و در فاصله‌ای برابر فاصله چاه مورد آزمایش از مرز قرار گرفته و با آبدهی برابر آبدهی چاه مورد آزمایش آب را از آبخوان تخلیه می‌کند.

حال اگر داده‌های اندازه‌گیری شده (افت و زمان) در پیزومتر یا پیزومترهایی که در فاصله‌ای معین از چاه مورد آزمایش قرارگرفته‌اند برروی کاغذ نیمه لگاریتمی ترسیم شود، خطوط برازش داده شده براین نقاط به‌صورت خطوط مستقیمی به‌دست خواهند آمد که دارای شیب‌های مختلف بوده و با شکست شیب از یکدیگر متمایزند. البته شکست شیب این خطوط ممکن است واضح و آنی نبوده بلکه روندی منحنی شکل داشته باشند. اما بهرحال اگر بر نقاط پیاده شده در مراحل زمانی مختلف در طول آزمایش خطوط مستقیمی برازش داده شود، اختلاف شیب در آنها مشهود خواهد بود (شکل ۴-۱۷). برای تشخیص فاصله مرز از چاه در روش تحلیل خط مستقیم به روش زیر عمل می‌شود :

- برنقاط حاصل از داده‌ها(افت – زمان) خطوط مستقیمی برازش داده می‌شود. بنابراین اگر مانند (شکل ۴-۱۷) در نزدیکی چاه مورد آزمایش یک مرز نفوذناپذیر وجود داشته باشد، دو خط مستقیم با شیب‌های متفاوت به‌دست می‌آید.
- برروی خط اول نقطه‌ای را که تقریباً محل تغییر شیب خط اول به دوم است، انتخاب و ارقام افت و زمان اندازه‌گیری شده دراین نقطه یادداشت می‌شود (در شکل ۴-۱۷، ۱ = s متر و زمان ۳۳۰ =t_R دقیقه).

  توضیح : باید توجه شود نقطه انتخاب شده یا یکی از نقاط حاصل از اندازه‌گیریست که برروی خط مستقیم قرارگرفته و یا نقطه‌ای است که برروی امتداد این خط واقع شده است.
- برروی خط مستقیم دوم (خط حاصل از نقاطی که شکست شیب نسبت به خط اول در آن مشهود است) نقطه‌ای را که اختلاف افت آن با خط اول برابر افت نقطه انتخابی برروی خط اول است، مشخص می‌کنیم (در شکل ۴-۱۷، ۱=s متر) و زمان نقطه مزبور یاداشت می‌شود (در شکل ۴-۱۷ ، ۳۲۹۰=t_i دقیقه).
- باتوجه به‌اینکه افت در چاه مجازی نسبت به پیزومتر برابر افت نقطه انتخاب شده در پیزومتر است، اگر فاصله

چاه مورد آزمایش تا پیزومتر معلوم باشد (در شکل ۴-۱۷ فاصله پیزومتر از چاه r_R=۶۰ متر) با بهره‌گیری از معادله قانون زمانها(معادله ۴-۴۵) فاصله چاه مجازی از پیزومتر به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{r_i^2}{t_i} = \frac{r_R^2}{t_R} \Rightarrow ri^2 = \frac{۳۲۹۰ \times (۶۰)^۲}{۳۳۰} = ۳۵۸۹۰/۹$$

فاصله چاه مجازی از پیزومتر r_i=۱۸۹/۵ متر

بنابراین فاصله تقریبی پیزومتر تا مرز نفوذناپذیر عبارت است از $x=\frac{r_i}{2}$=۹۵ متر. برای به‌دست آوردن فاصله چاه مورد آزمایش از مرز از چند پیزومتر در فواصل و جهات مختلف آن استفاده می‌شود و با رسم کمان فاصله این پیزومترها، تا چاه مجازی ابتدا محل چاه مجازی مشخص و سپس فاصله مرز تا چاه از طریق ترسیم به‌دست می‌آید.

مثال ۱ : ضریب قابلیت و ضریب ذخیره یک آبخوان نشتی تحت فشار به ترتیب T=۵۰۰ متر مربع بر روز و $S = ۲\times۱۰^{-۴}$ است. این آبخوان از یک طرف به‌وسیله مرز نفوذناپذیری محدود شده است. در این آبخوان چاهی که تمامی ضخامت آنرا حفر کرده با آبدهی ثابت ۷۲ متر مکعب بر ساعت پمپاژ می‌شود. پیزومتری در فاصله ۵۰ متری چاه مورد آزمایش، پس از دو ساعت پمپاژ تحت تاثیر مرز نفوذناپذیر قرار گرفته و افت اندازه‌گیری شده در آن قبل از تأثیر مرز برابر ۲ متر است. فاصله پیزومتر از مرز نفوذناپذیر را محاسبه کنید.

حل : زمان از شروع آزمایش تا وقتی‌که افت برابر ۲ متر در لحظه قبل از تأثیر مرز نفوذناپذیر است از معادله زیر به‌دست می‌آید :

$$s=\frac{2.3\ Q}{4\pi T} \log \frac{2.25\ Tt}{r^2\ S}$$

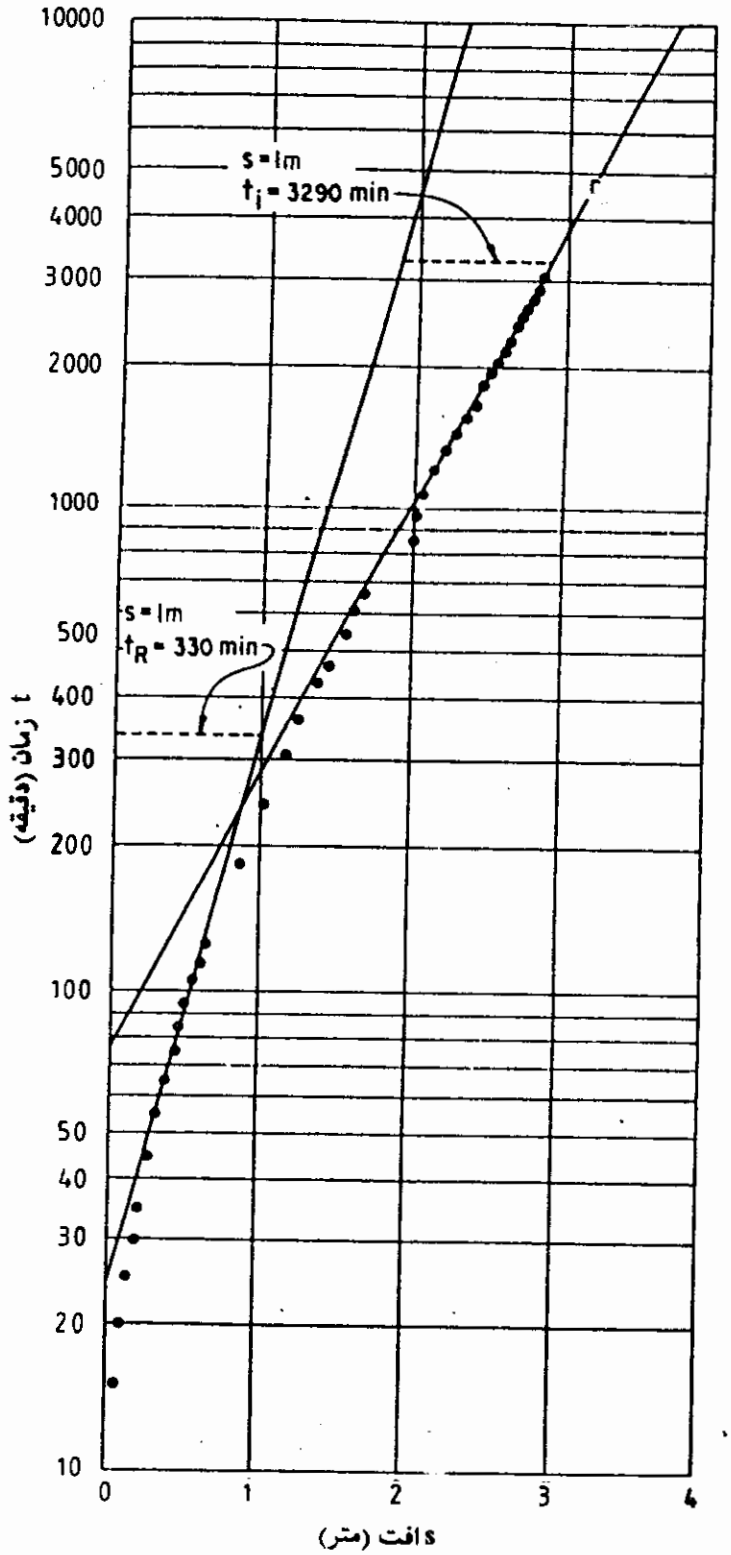
$$۲ = ۰/۶۳۲ \log ۲۲۵۰\ t$$

$$t = ۹۳۵ \text{ دقیقه}$$

فاصله پیزومتر اندازه‌گیری از چاهی مجازی که باهمان آبدهی آبخوان را تخلیه می‌کند از فرمول ذیل محاسبه می‌شود:

$$\frac{r^2}{t} = \frac{r_i^2}{t_i}$$

فاصله مرز نفوذناپذیر ازپیزومتر $x = \frac{r_i}{۲} = \frac{۱۳۹/۵}{۲} \cong ۷۰$ متر



شکل ۴-۱۷ تعیین مرز غیرقابل نفوذ بوسیله روش تحلیل خط مستقیم

مثال ۲ :

چاهی با آبدهی ثابت در نزدیکی مرزی غیرقابل نفوذ پمپاژ می‌شود. اندازه‌گیری افت در چهار پیزومتر به ترتیب شماره ۱ (r_1) به فاصله یکصدمتری شمال چاه مورد آزمایش، شماره ۲ (r_2) در فاصله ۲۰۰ متری شمال آن، شماره ۳ (r_3) در فاصله ۴۰۰ متری شمال و شماره ۴ (r_4) در فاصله ۲۰۰ متری شرق چاه انجام شده است.

مقادیر افت و زمان در پیزومترهای فوق قبل از آنکه مخروط افت در آنها تحت تأثیر مرز قرار گرفته باشد (قبل از شکست شیب) و اختلاف افت برابر افت اولیه و زمان مربوط در آنها پس از آنکه مخروط افت آنها تحت تأثیر مرز قرار گرفته (پس از شکست شیب) انتخاب و در جدول ۴-۹ ارائه شده است. مقادیر پیزومتر (۴) از شکل (۴-۱۷) به‌دست آمده است. در پیزومترهای ۱، ۲ و ۳ نیز مثل پیزومتر ۴ عمل می‌شود. در مورد t_i و t_R نیز قبلاً توضیح داده شد.

جدول ۴-۹

شماره پیزومتر	افت (متر)	t_R (دقیقه)	t_i (دقیقه)	r^2 (متر^2)
۱	۱	۹۴	۱۳۸۰	۱۰۰۰۰
۲	۱	۳۰۵	۲۳۲۵	۴۰۰۰۰
۳	۱	۱۱۵۰	۵۰۲۵	۱۶۰۰۰۰
۴	۱	۳۳۰	۳۲۹۰	۴۰۰۰۰

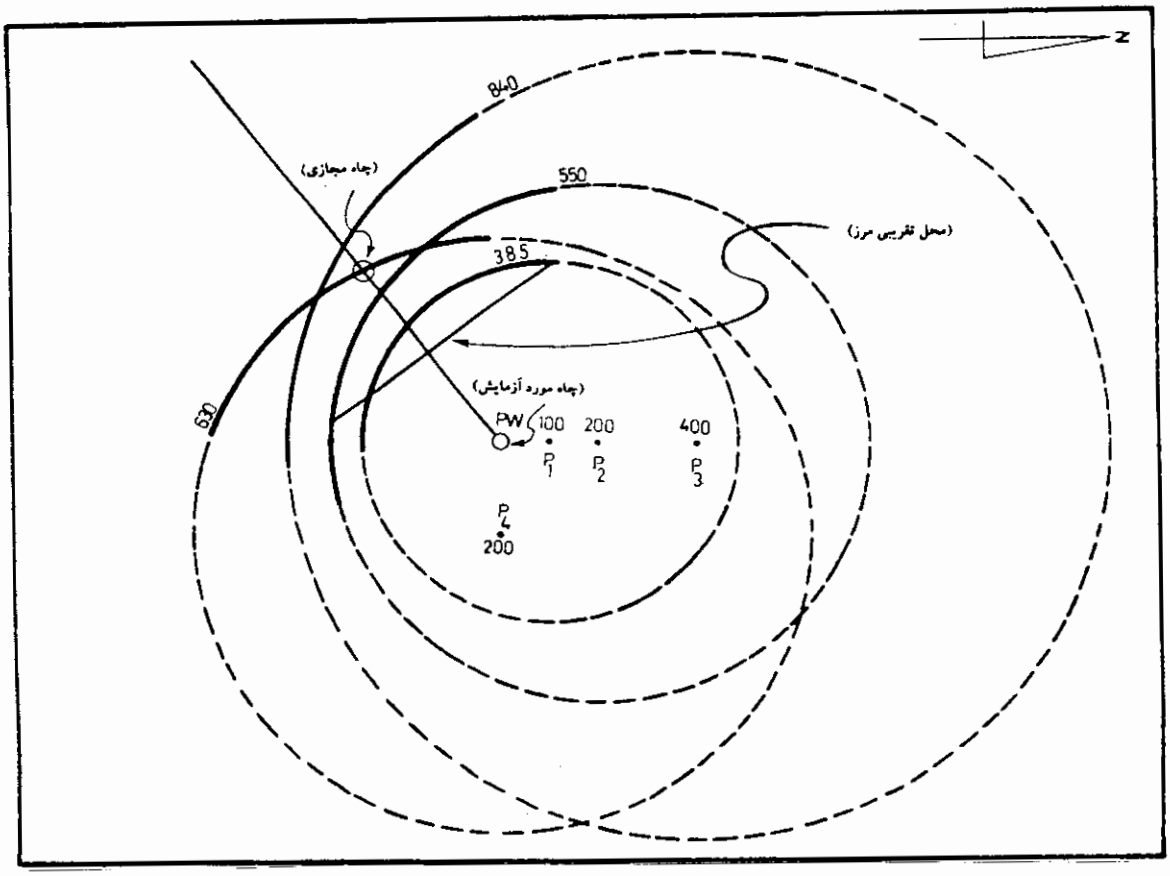
با استفاده از قانون زمانها فاصله چاه مجازی نسبت به پیزومترها عبارتست از :

$$r_i^2 = \frac{r^2 t_i}{t_R}$$

بنابراین

$r_{i1} \cong$ ۳۸۵ متر، $r_{i2} \cong$ ۵۵۰ متر، $r_{i3} \cong$ ۸۴۰ متر، $r_{i4} \cong$ ۶۳۰ متر

برای به‌دست آوردن فاصله تقریبی چاه مورد آزمایش از مرز غیرقابل نفوذ بدین ترتیب عمل می‌شود که فواصل پیزومترها نسبت به چاه مجازی به‌صورت دوایری با شعاع‌های فوق رسم می‌شود (شکل ۴-۱۸). این دوایر در یک جهت تقریباً مماس بر یکدیگرند و یا به یکدیگر نزدیک می‌شوند. بنابراین فاصله تقریبی چاه مجازی در نقطه‌ای بین محل تقاطع چندکمان دایره‌ها انتخاب می‌شود. در (شکل ۴-۱۸) محل چاه مجازی تقریباً در آزیموت ۲۳۰ درجه از امتداد سه پیزومتر اول و در فاصله ۴۶۰ متری چاه مورد آزمایش قرار دارد و بنابراین مرز غیر قابل نفوذ با همان آزیموت و در فاصله ۲۳۰ متری از چاه قرارگرفته است.



شکل ۴-۱۸- تعیین مرز نفوذناپذیر با استفاده از راه‌حل ژاکوب

۴-۲-۱۰-۲ تعیین موقعیت مرز با استفاده از راه حل تیس

اگر داده‌های حاصل از آزمایش (افت - زمان) چاهی که در نزدیکی مرز محدودکننده آبخوان قرار گرفته، بر روی یک کاغذ لگاریتمی ترسیم شود، زمانیکه منحنی حاصل از نقاط را بر منحنی نمونه تیس منطبق کنیم، ملاحظه می‌شود در ابتدا دو منحنی بر یکدیگر منطبق‌اند. باادامه آزمایش و زمانی که مخروط افت تحت تأثیر مرز محدودکننده قرار گیرد بتدریج منحنی داده‌ها از منحنی نمونه جدامی‌شود به‌گونه‌ای که اگر چاه مورد آزمایش در نزدیکی مرز تغذیه واقع شده باشد، درافت‌های اندازه‌گیری شده در پیزومتر یا پیزومترها نسبت به منحنی نمونه روندی کاهنده به‌وجود می‌آید. این امر بیانگر وجود یک مرز تغذیه در نزدیکی چاه است. برای تحلیل داده‌ها باید یک چاه مجازی در طرف دیگر مرز و در فاصله‌ای برابر فاصله چاه مورد آزمایش از آن در نظر گرفت که برابر آبدهی تخلیه، آبخوان را تغذیه کند. در نتیجه تحت تأثیر تغذیه ناشی از این چاه مجازی، سطح آب بالا آمده و در محل مرز افت ایجاد شده ناشی از پمپاژ را خنثی می‌کند.

برای تعیین موقعیت و فاصله مرز از چاه موردآزمایش از روش تحلیلی منحنی نمونه تیس به ترتیب زیر عمل می‌شود:

- منحنی حاصل از داده‌ها در کاغذ لگاریتمی بر منحنی نمونه تیس منطبق می‌شود (شکل ۴-۱۹).
- قبل از آنکه این دو منحنی از یکدیگر جدا شوند نقطه‌ای را بر روی منحنی انتخاب و مقادیر افت (s_i) و زمان (t_R) را یادداشت می‌شود.

- پس از آنکه دو منحنی از یکدیگر فاصله گرفتند (تحت تأثیر وجود مرز) در نقطه‌ای که اختلاف افت دو منحنی برابر افت اندازه‌گیری شده قبلی باشد (افت نقطه انتخابی در بند ۲)، زمان (t_i) یادداشت می‌شود.
- اگر فاصله پیزومتر تا چاه مورد آزمایش معلوم باشد با استفاده از معادله قانون زمانها، فاصله چاه مجازی از پیزومتر اندازه‌گیری (r_i) محاسبه می‌شود.
- برای تعیین موقعیت و فاصله مرز نسبت به چاه مورد آزمایش باید داده‌های اندازه‌گیری شده در چند پیزومتر که در فواصل و جهات مختلف از چاه قرار دارند، بهمان ترتیبی که در روش تحلیل خط مستقیم (ژاکوب) شرح داده شد، عمل شود.

مثال : چاهی با آبدهی ثابت در نزدیکی مرز تغذیه واقع شده و اندازه‌گیری افت در چهار پیزومتر از شماره ۱ تا ۴ که سه پیزومتر اول در شمال چاه و به ترتیب در فواصل ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ متری و پیزومتر شماره ۴ در شرق آن و در فاصله ۲۰۰ متری چاه حفر شده، انجام شده است (شکل ۴-۲۰).

جدول ذیل مقادیر t_i, t_R, s_i اندازه‌گیری شده در این پیزومترها را از چاه مورد آزمایش نشان می‌دهد:

جدول ۴-۱۰

شماره پیزومتر	افت (s_i) (متر)	زمان t_R (دقیقه)	زمان t_i (دقیقه)
۱	۰/۴۴	۲۲	۳۰۰
۲	۰/۱۹	۳۶	۱۸۵
۳	۰/۱۲	۱۰۵	۲۵۰
۴	۰/۰۹	۲۰	۱۱۵

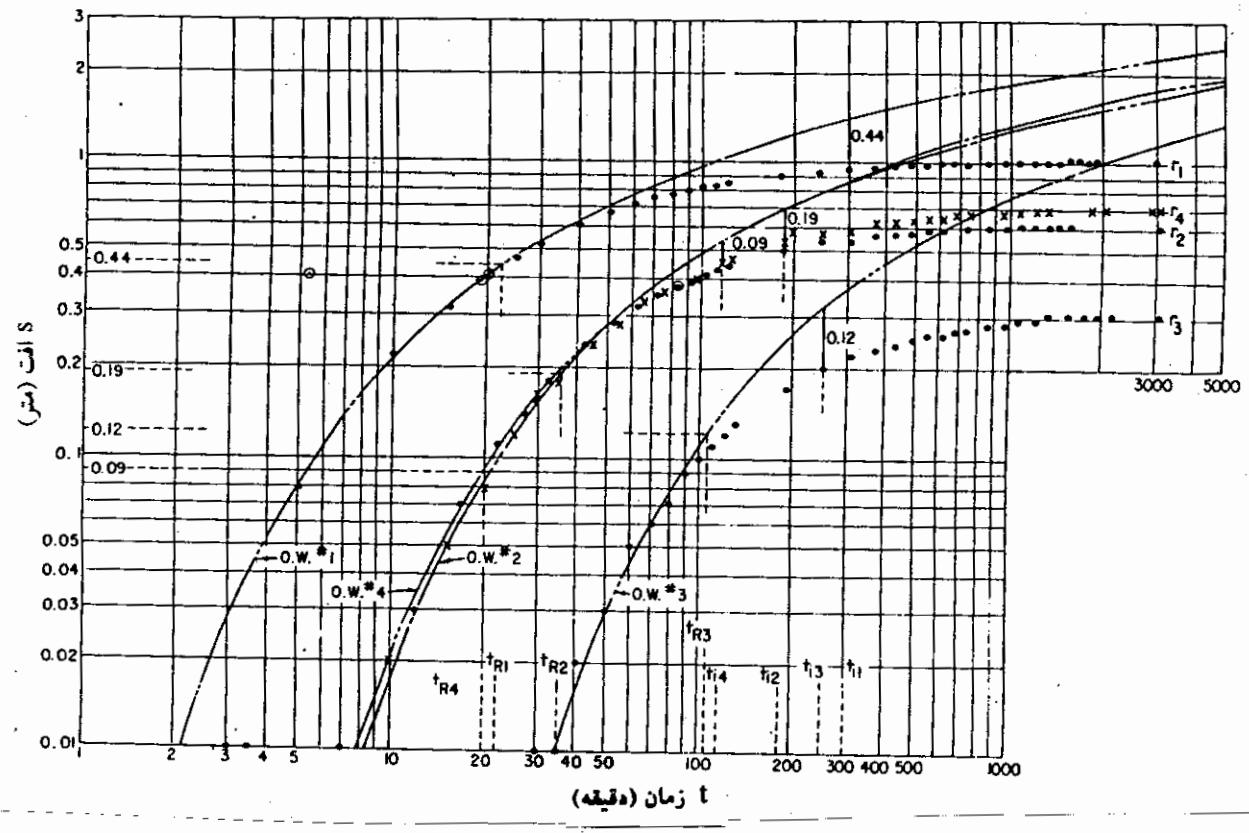
می‌خواهیم فاصله و موقعیت چاه مورد آزمایش را از مرز محاسبه کنیم.
حل : با بهره‌گیری از معادله قانون زمانها داریم:

$$\frac{ri^2}{ti}=\frac{r^2_R}{t_R}$$

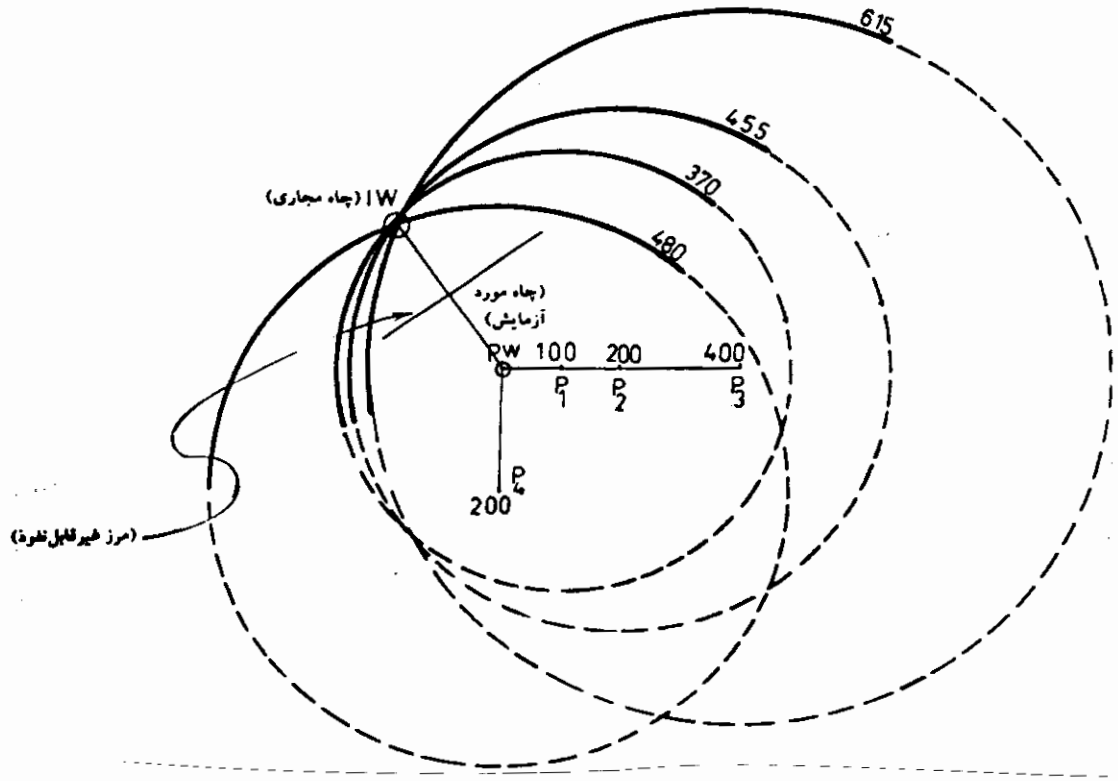
بنابراین مقادیر ri (فاصله چاه مجازی از پیزومترها) عبارتست از:

$r_{i1} \cong$ ۳۷۰ متر، $r_{i2} \cong$ ۴۵۵ متر، $r_{i3} \cong$ ۶۱۵ متر، $r_{i4} =$ ۴۸۰ متر

حال با استفاده از مقادیر فوق ابتدا فاصله چاه مجازی تا چاه مورد آزمایش، موقعیت آن و سپس فاصله و موقعیت مرز تغذیه از چاه از طریق ترسیم به‌دست می‌آید (شکل ۴-۲۰). چنانکه ملاحظه می‌شود فاصله تقریبی مرز از چاه مورد آزمایش $x=\frac{ri}{2}=$ ۲۰۰ متر و موقعیت آن در آزیموت ۱۵۰ درجه نسبت به امتداد پیزومتر شماره ۴ قرار دارد.



شکل ۴-۱۹- انطباق منحنی حاصل از داده‌ها بر روی منحنی تیس



شکل ۴-۲۰- تعیین موقعیت مرز با استفاده از راه‌حل تیس

۴-۲-۱۱ محاسبه ضرایب هیدرودینامیک در نزدیک مرز تغذیه :

در شرایطی که چاه مورد آزمایش در نزدیکی مرز تغذیه قرار گرفته باشد، سطح آب در پیزومتر اندازه‌گیری، ابتدا فقط تحت تأثیر پمپاژ افت می‌کند. زمانی که مخروط افت توسعه یافته و به مرز تغذیه برسد، افت‌های اندازه‌گیری شده به سبب تأثیر تغذیه ناشی از وجود مرز به ترتیبی تغییر می‌کند که در مقایسه با شرایط آبخوان نامحدود (شرایط قبل از تأثیر تغذیه از مرز) به تدریج کاهش می‌یابد. این وضع همچنان ادامه خواهد یافت تا شرایط تعادل برقرار شود، یعنی میزان آب ورودی به چاه توسط آبخوان با تخلیه چاه برابر شود. به عبارت دیگر اگر زمان آزمایش طولانی شود افت اندازه‌گیری شده در پیزومتر نسبت به زمان ثابت می‌شود. بنابراین با استفاده از معادله جریان ماندگار (معادله تیم) ضریب قابلیت را می‌توان محاسبه کرد.

در شرایط جریان غیرماندگار (زمانی که افت در پیزومترها ثابت نشده)، شرایط ذیل برقرار است:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

افت اندازه‌گیری شده (s_r) عبارت است از :

$$s_r = s - s_i \qquad (۴۶-۴)$$

که در آن :

s = افت در شرایطی که مرز تغذیه نزدیک چاه مورد آزمایش وجود نداشته باشد و یا در آزمایش چاهی که در نزدیکی مرز تغذیه واقع شده مخروط افت هنوز تا مرز گسترش نیافته باشد.

s_i = کاهش افت (یا افزایش سطح آب نسبت به شرایط آبخوان نامحدود) در پیزومتر تحت تأثیر تغذیه از مرز

s_r = افت اندازه‌گیری شده در پیزومتر وقتی که مخروط افت آن تا مرز تغذیه توسعه یافته باشد.

بنابراین مقدار افت در معادله تیس چاهی که در نزدیکی مرز تغذیه قرار گرفته و مخروط افت آن تا مرز توسعه یافته، به صورت ذیل خواهد بود :

$$s_r = \frac{Q}{4\pi T} [W(u) - W(u_i)] \qquad (۴۷-۴)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

$$u_i = \frac{r_i^2 S}{4Tt}$$

حال معادله کوپر - ژاکوب برای حالات فوق نوشته می‌شود :

افت در شرایطی که مرز تغذیه وجود ندارد.

$$s = \frac{2.3\ Q}{4\pi T} \log \frac{2.25\ Tt}{r^2\ S}$$

کاهش افت تحت تأثیر مرز تغذیه

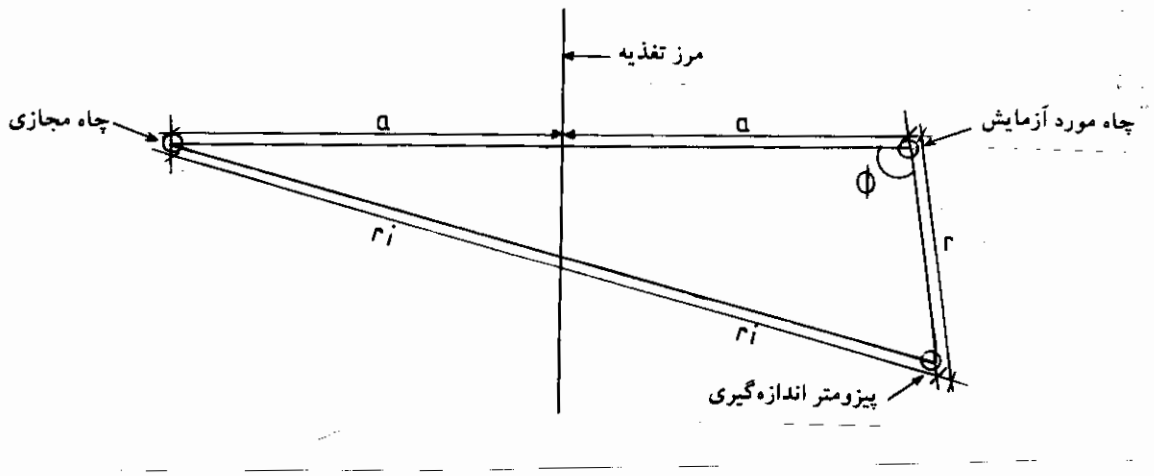
$$s_i = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25\ Tt}{r_i^2\ S}$$

افت در شرایطی که مرز تغذیه بر اندازه‌گیریها اثر کرده است.

$$s_r = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{r_i}{r} \qquad (۴۸-۴)$$

در شرایطی که چاهی در نزدیکی مرز تغذیه واقع باشد (شکل ۴-۲۱) برای به‌دست آوردن r_i (فاصله پیزومتر از چاه مجازی) داریم :

$$r_i = \sqrt{[(۲a)^۲ + r^۲ - ۲(۲ar)\ \cos\phi}} \qquad (۴۹-۴)$$



شکل ۴-۲۱ آزمایش پمپاژ در نزدیکی مرز تغذیه

که در آن :

r_i = فاصله پیزومتر اندازه‌گیری از چاه مجازی

a = فاصله چاه مورد آزمایش از مرز تغذیه = فاصله چاه مجازی از مرز تغذیه

r = فاصله چاه مورد آزمایش از پیزومتر اندازه‌گیری

ϕ = زاویه بین خطی که چاه اصلی را به چاه مجازی و خطی که چاه اصلی را به پیزومتر متصل می‌کند.

بنابراین برای به‌دست آوردن (T) با استفاده از جریان ماندگار، اگر داده‌های افت - فاصله را در چند پیزومتر اندازه‌گیری در یک آزمایش پمپاژ که برای مدت معینی انجام شده داشته باشیم، مقادیر افت (s_r) را در مقابل فواصل پیزومترها در یک کاغذ نیمه لگاریتمی رسم و مقدار Δs_r را در یک سیکل لگاریتمی (محور r) محاسبه می‌کنیم. سپس با داشتن مقدار آبدهی (Q) مقدار T از معادله تیم ($T = \frac{2/3\,Q}{2\pi\Delta s_r}$) محاسبه می‌شود. آن گاه با استفاده از رابطه (۴-۴۸) مقدار r_i محاسبه می‌شود.

برای محاسبه ضریب ذخیره ابتدا مقادیر u و u_i با استفاده از معادلات $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$ و $u_i = \frac{r_i^2 S}{4Tt}$ از طریق آزمون و خطا و فرض کردن مقادیری برای ضریب ذخیره، به‌دست آمده و با مراجعه به جدول (شماره ۴-۱) مقادیر $W(u)$ و $W(u_i)$ را مشخص و با جایگذاری آنها در معادله (۴-۴۷) مقدار s_r محاسبه می‌شود. اگر مقدار s_r محاسبه شده با مقدار اندازه‌گیری شده برابر و یا به آن نزدیک باشد مقدار ضریب ذخیره مفروض صحیح است، در غیر این صورت با فرض مقدار دیگری برای ضریب ذخیره محاسبات تکرار می‌شود تا آنکه s_r محاسبه و اندازه‌گیری شده به یکدیگر نزدیک و یا با هم برابر شوند. با داشتن مقدار r_i می‌توان با استفاده از رابطه (۴-۴۹) فاصله چاه مورد آزمایش از مرز تغذیه را تعیین کرد.

مثال :

چاهی که در ارتباط هیدرولیکی با رودخانه‌ای است، با آبدهی ۱۰۸ مترمکعب در ساعت به‌طور مداوم در یک دوره سه روزه پمپاژ شده است. در پایان آزمایش، افت در سه پیزومتر که در فواصل ۱۸، ۴۵ و ۸۰ متری چاه، بر روی یک خط در امتداد چاه و موازی با رودخانه حفر شده‌اند، به ترتیب ۰/۲۸۲، ۰/۱۷۷ و ۰/۰۹۹ متر اندازه‌گیری شده. ضریب قابلیت انتقال و ضریب ذخیره آبخوان را محاسبه کنید.

حل :

الف - برای به‌دست آوردن ضریب قابلیت انتقال نمودار فاصله - افت را روی کاغذ نیمه‌لگاریتمی (شکل ۴-۲۲) رسم کرده و مقدار Δs_r در یک سیکل لگاریتمی از محور r برابر ۰/۲۸ متر به‌دست می‌آید.

با استفاده از رابطه زیر ضریب قابلیت انتقال آبخوان برابر است با :

$$T = \frac{۲/۳\,Q}{۲\pi\Delta s_r} = \frac{۲/۳ \times ۱۰۸ \times ۲۴}{۲\pi \times ۰/۲۸} = ۳۳۸۹$$ مترمربع بر روز

برای به‌دست آوردن r_i با استفاده از رابطه (۴-۴۸) و (۴-۴۹) و افت اندازه‌گیری شده در پیزومتر شماره ۲ داریم :

$$s_r = \frac{۲/۳\,Q}{۲\pi\,T} \log\left[\frac{\sqrt{۴a^۲ + r^۲ - ۴ar\cos\phi}}{r}\right]$$

چون پیزومترها بر روی یک خط در امتداد چاه و موازی با رودخانه قرار گرفته‌اند $\phi = 90°$ است و $\cos\phi = ۰$

$$۰/۱۷۷ = \frac{۲/۳ \times ۱۰۸ \times ۲۴}{۲ \times ۳/۱۴ \times ۳۳۸۹} \log\left[\frac{\sqrt{۴a^۲ + (۴۵)^۲}}{۴۵}\right]$$

فاصله چاه مورد آزمایش تا مرز تغذیه (متر) $a = ۹۳/۷۹۶ \cong ۹۴$

بنابراین با استفاده از رابطه (۴-۴۹) مقدار r_i عبارتست از :

$$r_i = \sqrt{(۲a)^۲ + r^۲} = \sqrt{(۲\times۹۴)^۲ + (۴۵)^۲} \cong ۱۹۳$$

برای محاسبه ضریب ذخیره ابتدا مقدار آن $S = ۰/۰۰۲۵$ فرض می‌شود.

بنابراین با جایگذاری مقادیر در رابطه زیر داریم :

$$u = \frac{r^۲S}{۴Tt} = \frac{(۴۵)^۲ \times ۰/۰۰۲۵}{۴ \times ۳۳۸۹ \times ۳} = ۱/۲۵ \times ۱۰^{-۴}$$

مقدار $W(u)$ از جدول (شماره ۴-۱) برابر ۸/۴۱۰۹ به‌دست می‌آید و مقدار u_i عبارت است از :

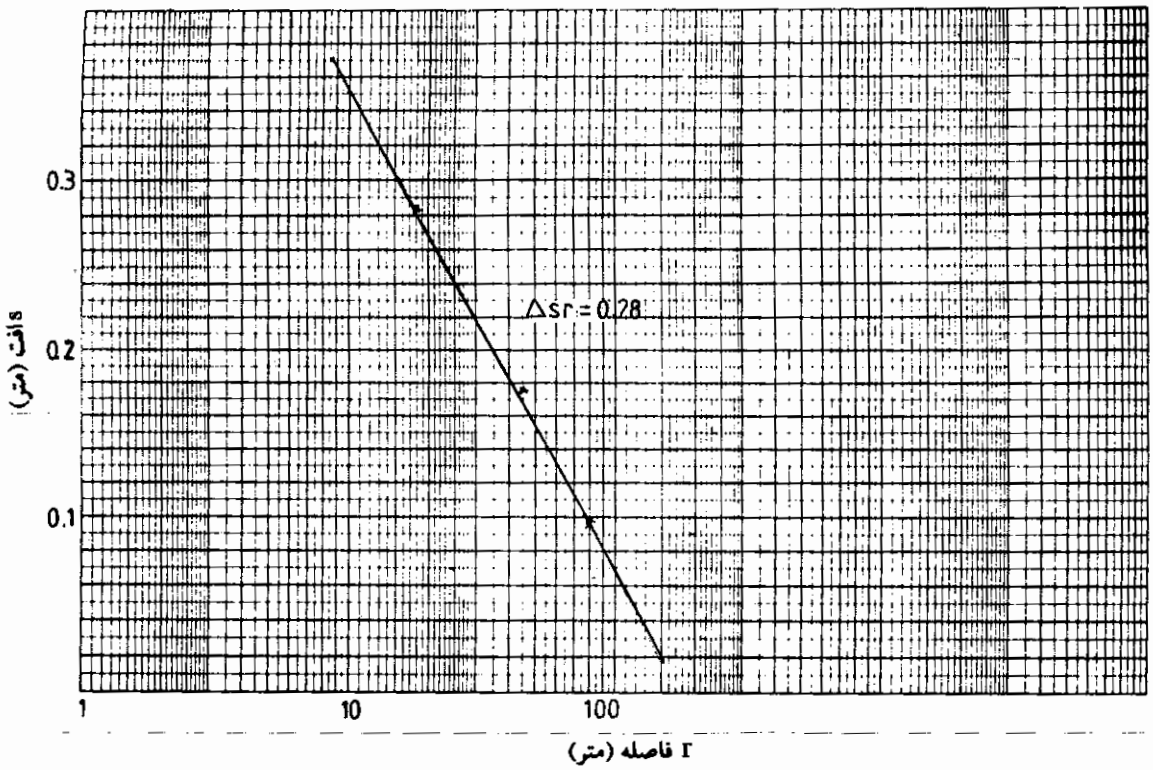
$$u_i = \frac{(۱۹۳)^۲ \times ۰/۰۰۲۵}{۴ \times ۳۳۸۹ \times ۳} = ۲/۲۹\times۱۰^{-۳} \cong ۲/۳\times۱۰^{-۳}$$

و از (جدول شماره ۴-۱)، $W(u_i) = ۵/۴۹۹۹$ به‌دست می‌آید.

حال مقدار s_r با قرار دادن مقادیر به‌دست آمده در معادله (۴-۴۷) برابر است با :

$$s_r = \frac{۱۰۸ \times ۲۴}{۴ \times ۳/۱۴ \times ۳۳۸۹}\ [۸/۴۱۰۹ - ۵/۴۹۹۹] = ۰/۱۷۷$$

ملاحظه می‌شود که مقدار محاسبه شده برابر مقدار اندازه‌گیری شده است، بنابراین ضریب ذخیره آبخوان (S) حدود $۲/۵ \times ۱۰^{-۳}$ و ضریب قابلیت (T) حدود ۳۴۰۰ مترمربع بر روز صحیح است.



شکل ۴-۲۲- منحنی تغییرات افت - فاصله

۴-۲-۱۲ برآورد T با استفاده از شبکه خطوط هم‌پتانسیل و خطوط جریان

در مناطقی که نتایج آزمون پمپاژ به قدر کافی در دست نیست، می‌توان مقدار T را در نقاطی که فاقد چاه مناسب برای آزمایش است با استفاده از نقشه‌های هم تراز آب زیرزمینی (نقشه‌های سطح ایستابی یا سطح پیزومتریک) برآورد کرد. با فرض وجود شرایط همسان، خطوط جریان را می‌توان به صورت عمود بر خطوط هم‌پتانسیل رسم کرد و یک شبکه جریان تشکیل داد. برای برآورد T، یکی از لوله‌های جریان (بخش واقع بین دو خط جریان) در نظر گرفته می‌شود (شکل ۴-۲۳). اگر مقدار T در یکی از قطعات لوله جریان معلوم باشد می‌توان T را در قطعات دیگر تخمین زد. برای توضیح این مطلب دو خط جریان را در نظر می‌گیریم. خطوط جریان را می‌توان به عنوان مرزهای نفوذناپذیر تلقی کرد. بنابراین جریان آبی که از مقطع A عبور می‌کند، از مقطع B نیز می‌گذرد. باتوجه به معادله دارسی می‌توانیم بنویسیم :

$$q_A = T_A W_A \frac{\Delta H_A}{L_A} \qquad (۵۰-۴)$$

که در آن :

q_A = میزان جریان آب در قطعه A

T_A = ضریب قابلیت انتقال در قطعه A

W_A = عرض میانگین قطعه A

L_A = طول میانگین قطعه A

ΔH_A = افت سطح ایستابی یا پیزومتریک در طول قطعه A

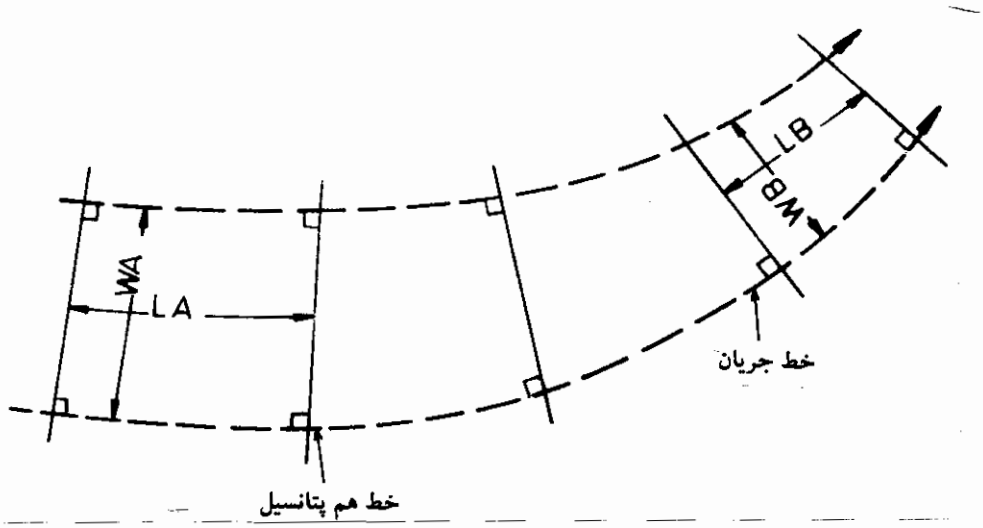
$\frac{\Delta H_A}{L_A}$ = گرادیان هیدرولیک در طول قطعه A

رابطه مشابهی را می‌توان برای قطعه B نیز نوشت :

$$q_B = T_B W_B \frac{\Delta H_B}{L_B} \qquad (۴-۵۱)$$

وقتی معادله‌های (۴-۵۰) و (۴-۵۱) به هم تقسیم و ساده شود، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$T_B = \frac{q_B L_B W_A \Delta H_A}{q_A L_A W_B \Delta H_B} T_A \qquad (۴-۵۲)$$



شکل ۴-۲۳- برآورد T با استفاده از شبکه خطوط هم‌پتانسیل و خطوط جریان

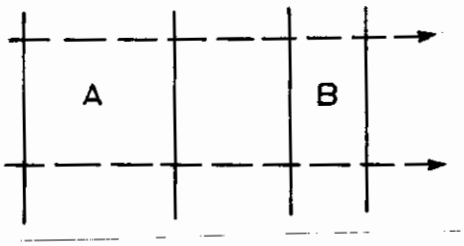
بنابراین با معلوم بودن مقدار T_A می‌توان ضریب قابلیت انتقال را در تمام قطعات دیگر لوله جریان موردنظر به دست آورد. این کار مستلزم اندازه‌گیری فواصل خطوط جریان و خطوط هم‌پتانسیل در قطعات موردنظر (مثلاً برحسب میلی‌متر)، داشتن اختلاف رقوم منحنی‌های تراز و همچنین معلوم بودن نسبت $\frac{q_B}{q_A}$ است. $\frac{q_B}{q_A}$ نمایانگر تغییرات نسبی

آبدهی در لوله جریان به علت تغذیه یا تخلیه‌ای است که در این فاصله صورت می‌گیرد. اگر مطمئن باشیم که مقدار q در این فاصله ثابت است، $\frac{q_B}{q_A}$ برابر یک می‌شود. از طرف دیگر ΔH معمولاً در هر نقشه هم‌تراز آب زیرزمینی ثابت است. به این ترتیب رابطه (۴-۵۲) به صورت زیر ساده می‌شود.

$$T_B = \frac{L_B\, W_A}{L_A\, W_B}\, T_A \qquad (۴-۵۳)$$

اگر T در بیش از یک قطعه در لوله جریان معلوم باشد، می‌توان T را از طریق آنها نیز برآورد کرد و به این ترتیب میانگین نتایج به‌دست آمده از قطعات مختلف را به عنوان T میانگین قطعه موردنظر به حساب آورد. با استفاده از روش فوق می‌توان T را در تمام قطعات یک لوله جریان برآورد کرد. در شرایط خاصی که خطوط جریان موازی باشد (شکل ۴-۲۴)، معادله ۴-۵۳ به صورت زیر ساده می‌شود :

$$T_B = \frac{L_B}{L_A}\, T_A \qquad (۴-۵۴)$$



شکل ۴-۲۴- شبکه خطوط هم‌پتانسیل در حالی که خطوط جریان موازی‌اند

۴-۲-۱۳ تعیین T با استفاده از مطالعات ژئوفیزیک

ضریب قابلیت انتقال آبخوان آبرفتی به وضعیت دانه‌بندی، شکل و فرم دانه‌های تشکیل دهنده، درجه حرارت و ضخامت آن بستگی دارد. مقاومت عرضی آبخوان نیز علاوه بر موارد فوق به کیفیت شیمیایی آب و تغییرات آن وابسته است. به‌منظور حذف عوامل کیفی در مقاومت عرضی حاصل از مطالعات ژئوالکتریک، با استفاده از نتایج تجزیه شیمیایی نمونه آبهای برداشت شده در یک ناحیه که دارای پراکندگی مناسبی باشند و بهره‌گیری از دیاگرام شلوم برژه[1] (شکل ۴-۲۵) و یا جدول (۴-۱۱) که براساس دیاگرام مزبور تهیه شده، می‌توان اقدام کرد. به عبارت دیگر می‌توان مقاومت عرضی آبخوان را نسبت به یک نمک واحد مثلاً نمک طعام سنجید. چون تمامی کاتیونها و آنیونها برحسب نمک واحد بیان می‌شوند، بنابراین ابتدا نقشه باقیمانده خشک معادل نمک واحد با استفاده از دیاگرام

1- schlumberger

جدول ۴-۱۱- جدول ضرایب تبدیل آنیون‌ها و کاتیون‌ها به نمک معادل (NaCl) براساس مقادیر مختلف باقیمانده خشک برحسب میلی‌گرم در لیتر (۲۰۰ تا ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)

T.D.S	CO^{-}_{3}	HCO^{-}	Cl^{-}	SO^{--}_{4}	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^{+}	K^{+}
۲۰۰	۱/۰۲	۰/۳۵	۱	۰/۷۵	۱/۲۸	۱/۸۲	۱	۰/۹۲
۲۵۰	۱/۰۱	۰/۳۵	۱	۰/۷۳	۱/۲۵	۱/۸۰	۱	۰/۹۲
۳۰۰	۱	۰/۳۵	۱	۰/۷۲	۱/۲۲	۱/۷۸	۱	۰/۹۳
۳۵۰	۱	۰/۳۴	۱	۰/۷۲	۱/۲۱	۱/۷۵	۱	۰/۹۴
۴۰۰	۱	۰/۳۳	۱	۰/۷۲	۱/۲۰	۱/۷۴	۱	۰/۹۵
۴۵۰	۱	۰/۳۳	۱	۰/۷۲	۱/۲۰	۱/۷۳	۱	۰/۹۵
۵۰۰	۰/۹۹	۰/۳۳	۱	۰/۷۱	۱/۲۰	۱/۷۲	۱	۰/۹۶
۵۵۰	۰/۹۹	۰/۳۳	۱	۰/۷۰	۱/۱۸	۱/۷۱	۱	۰/۹۷
۶۰۰	۰/۹۸	۰/۳۳	۱	۰/۷۰	۱/۱۷	۱/۶۹	۱	۰/۹۷
۶۵۰	۰/۹۸	۰/۳۳	۱	۰/۷۰	۱/۱۶	۱/۶۸	۱	۰/۹۸
۷۰۰	۰/۹۷	۰/۳۲	۱	۰/۷	۱/۱۵	۱/۶۷	۱	۰/۹۸
۷۵۰	۰/۹۶	۰/۳۲	۱	۰/۷۰	۱/۱۴	۱/۶۶	۱	۰/۹۷
۸۰۰	۰/۹۵	۰/۳۲	۱	۰/۶۹	۱/۱۳	۱/۶۵	۱	۰/۹۷
۸۵۰	۰/۹۵	۰/۳۲	۱	۰/۶۸	۱/۱۲	۱/۶۴	۱	۰/۹۶
۹۰۰	۰/۹۴	۰/۳۲	۱	۰/۶۸	۱/۱۱	۱/۶۳	۱	۰/۹۶
۹۵۰	۰/۹۳	۰/۳۲	۱	۰/۶۸	۱/۱۱	۱/۶۲	۱	۰/۹۵
۱۰۰۰	۰/۹۲	۰/۳۲	۱	۰/۶۸	۱/۱۱	۱/۶۲	۱	۰/۹۵
۱۵۰۰	۰/۹۰	۰/۳۱	۱	۰/۶۵	۱/۰۵	۱/۵۷	۱	۰/۹۴
۲۰۰۰	۰/۸۸	۰/۳۱	۱	۰/۶۳	۰/۹۸	۱/۵۲	۱	۰/۹۳
۲۵۰۰	۰/۸۵	۰/۳۰	۱	۰/۶۲	۰/۹۵	۱/۵۰	۱	۰/۹۳
۳۰۰۰	۰/۸۲	۰/۳۰	۱	۰/۶۰	۰/۹۱	۱/۴۷	۱	۰/۹۱
۳۵۰۰	۰/۸۰	۰/۳۰	۱	۰/۵۸	۰/۸۸	۱/۴۳	۱	۰/۹۱
۴۰۰۰	۰/۷۸	۰/۲۹	۱	۰/۵۷	۰/۸۵	۱/۴۲	۱	۰/۹۱
۴۵۰۰	۰/۷۴	۰/۲۹	۱	۰/۵۶	۰/۸۳	۱/۴۰	۱	۰/۹۰
۵۰۰۰	۰/۷۲	۰/۲۹	۱	۰/۵۵	۰/۸۲	۱/۳۸	۱	۰/۹۰
۱۰۰۰۰	۰/۶۲	۰/۲۸	۱	۰/۵۰	۰/۸۰	۱/۲۸	۱	۰/۹۰

۴-۳ انتخاب روش تحلیل

روشهای مختلفی برای تحلیل نتایج آزمایشهای پمپاژ ارائه شده است که هریک از آنها در شرایط خاص اعتبار دارند. برای انتخاب روش یاروشهای مناسب تحلیل باید تا حد امکان اطلاعات لازم در مورد خصوصیات آبخوان و چاه از راههای مختلف به دست آید. مهمترین اطلاعاتی که می‌تواند به انتخاب روش مناسب برای تحلیل آزمایشهای پمپاژ کمک کند، عبارتند از:

۴-۳-۱ خصوصیات آبخوان

تعیین خصوصیات آبخوان مثل ضخامت ، عمق و نوع آبخوان درانتخاب روشهای تحلیل مؤثر است. این گونه اطلاعات از راههای زیر به دست می‌آید:

۴-۳-۱-۱ اطلاعات قبل از آزمایش پمپاژ

قبل از آزمایش، اطلاعات زیر می‌تواند در تعیین خصوصیات آبخوان کمک مؤثری باشد :

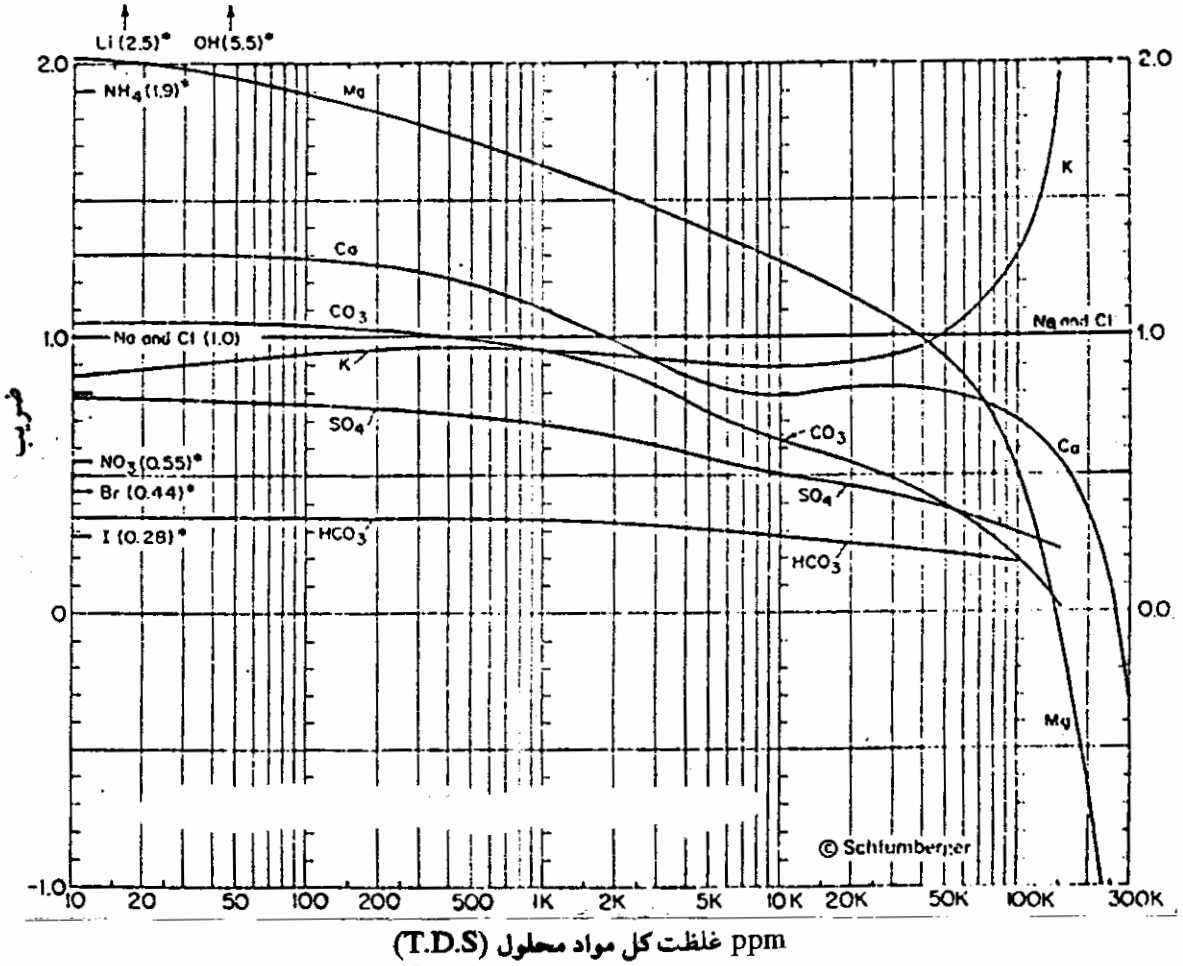
- نتایج حفاری چاهها به ویژه چاههای اکتشافی اطلاعات دقیقی درمورد ضخامت و عمق آبخوان ارائه می‌دهند. مطالعه ستون زمین‌شناسی چاه، به تعیین نوع آبخوان نیز می‌تواند کمک کند. چگونگی تغییرات سطح آب در چاه در حین حفاری (ضربه‌ای) عامل مهمی در تشخیص آبخوانهای آزاد و تحت فشار از یکدیگر است.
- نتایج بررسی‌های ژئوفیزیک می‌تواند اطلاعات کلی در مورد موقعیت و ضخامت لایه‌های آبدار و تا اندازه‌ای جنس سازندها و در نتیجه نوع آبخوان دراختیار ما قرار دهد.
- اطلاعات موجود در چاههای مجاور نیز تا اندازه‌ای در تشخیص خصوصیات آبخوان در محل مورد نظر مؤثرند.

۴-۳-۱-۲ داده‌های حاصل از آزمایش پمپاژ

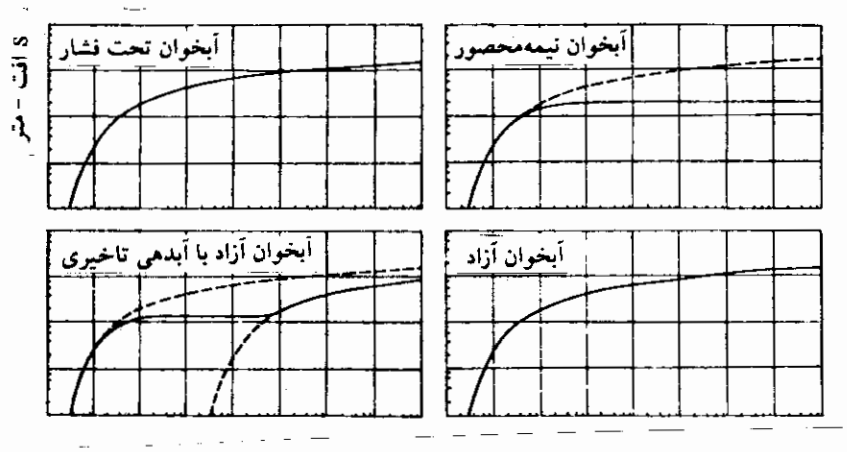
پس از آزمایش پمپاژ نیز از داده‌های به‌دست آمده می‌توان در تعیین نوع آبخوان استفاده کرد. در شکل (۴-۲۶) منحنی‌های افت - زمان در روی محورهای مختصات لگاریتمی برای چند نوع آبخوان نمونه نشان داده شده است، که از آنها در تعیین نوع آبخوان می‌توان کمک گرفت. وقتی که اندازه‌گیری افت به زمان در پیزومترها در روی نمودارهای نیمه لگاریتمی پیاده شوند، مقدار t_0 (محل تقاطع خط مستقیم افت - زمان با محور زمان) در آبخوانهای تحت فشار خیلی کمتر (معمولاً کسری از دقیقه) و در آبخوانهای آزاد بیشتر (در حد چند دقیقه) است (شکل ۴-۲۷). در حین آزمایش پمپاژ تغییرات افت در آبخوانهای تحت فشار تقریباً بلافاصله در پیزومترها تأثیر می‌گذارد، در حالی که در آبخوانهای آزاد، افت در پیزومترها با تأخیر صورت می‌گیرد. به هر حال با توجه به نوع آبخوان (آزاد، تحت فشار، نشتی یا آزاد با آبدهی تأخیری) یکی از روشهای مناسب پیش‌گفته انتخاب می‌شود.

شلوم‌برژه یا جدول (۴-۱۱) برای آبخوان تهیه شده و سپس با انطباق این نقشه و نقشه مقاومت عرضی (RT)، میزان T.D.S معادل و مقاومت عرضی هر نقطه دلخواه تعیین می‌شود. با تقسیم حاصلضرب آن دو بر عدد ۱۰۰۰، مقاومت عرضی تصحیح شده نقطه مزبور برای میزان نمک پایه ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر محاسبه می‌شود.

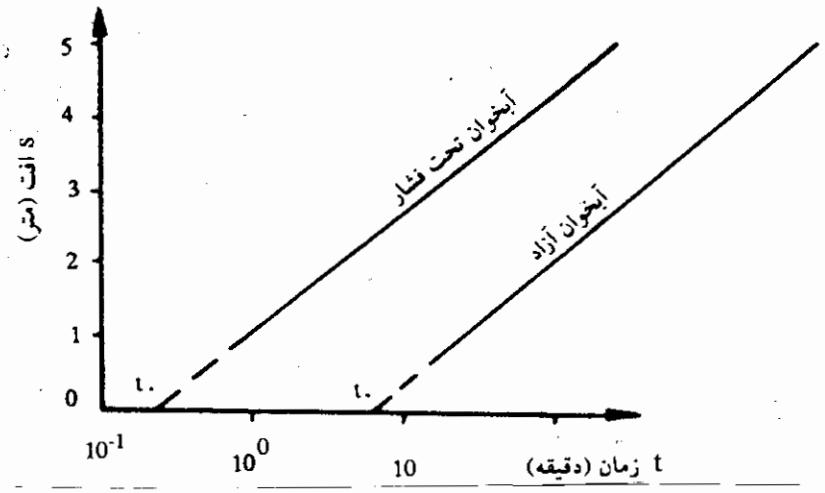
بر این اساس نقشه مقاومت عرضی تصحیح شده (RT_{co}) با روش درون‌یابی با استفاده از مقاومت عرضی تصحیح شده از نقاط نمونه‌برداری شده تهیه خواهد شد. سپس با استفاده از ارقام ضریب قابلیت انتقال (T) حاصل از آزمایشهای پمپاژ در نقاط آزمایش شده و مقاومت عرضی تصحیح شده برحسب دو عامل مزبور در مقیاس حسابی نقاطی به دست می‌آید که با برازش دادن مناسب‌ترین خط بر این نقاط رابطه بین دو عامل T و RT_{co} به‌دست می‌آید. با استفاده از معادله خط و در دسترس داشتن RT_{co} هر نقطه دلخواه در ناحیه، میزان T محاسبه خواهد شد.



شکل ۴-۲۵- نمودار روابط بین کاتیونها - آنیونها نسبت به نمک واحد (شلوم برژه)



شکل ۴-۲۶- منحنی‌های نمونه افت - زمان برای چهار نوع آبخوان



شکل ۴-۲۷ نمودار نیمه لگاریتمی افت - زمان برای آبخوانهای آزاد و تحت فشار(t_0 در آبخوانهای تحت فشار معمولاً خیلی کمتر از آبخوانهای آزاد است)

۴-۳-۲ ساختمان چاه

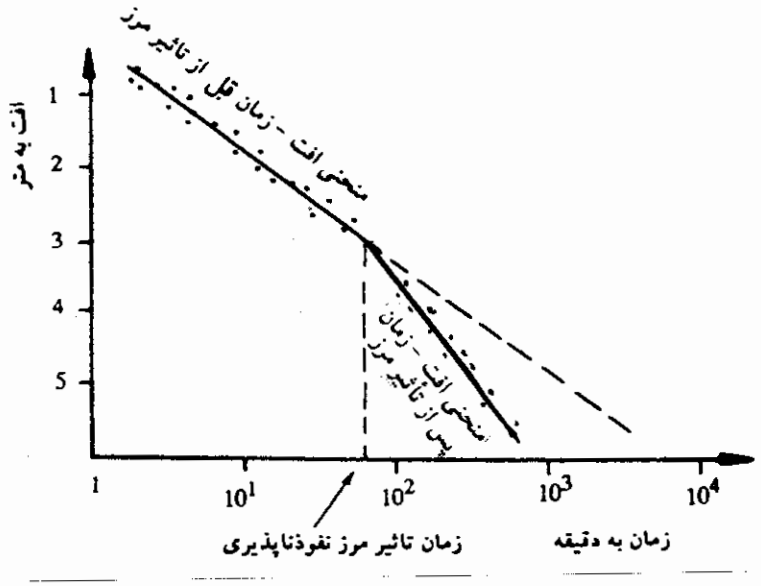
مشخصات چاه مثل عمق ، قطر و طول لوله مشبک در انتخاب روش تحلیل اهمیت دارد. در اغلب روشهای تحلیل، چاه باید در تمام ضخامت آبخوان حفر شده و دارای لوله مشبک باشد. چنانچه این شرایط برقرار نباشد باید از روشهای تحلیل چاههای ناقص استفاده کرد. به علاوه اگر قطر چاه به طور غیرمعمول زیاد بود، روش مربوط به چاههای دهانه گشاد باید مورد استفاده قرار گیرد (روش پاپا دوپولوس).

۴-۳-۳ نوع جریان

چنانچه در پایان آزمایش پمپاژ سطح آب در چاه یا پیزومترها ثابت شود، می‌توان از روشهای تحلیل در شرایط ماندگار برای محاسبه T استفاده کرد. در صورتی‌که چنین شرایطی ایجاد نشود باید از روشهای غیرماندگار (تیس، ژاکوب و...) استفاده شود.

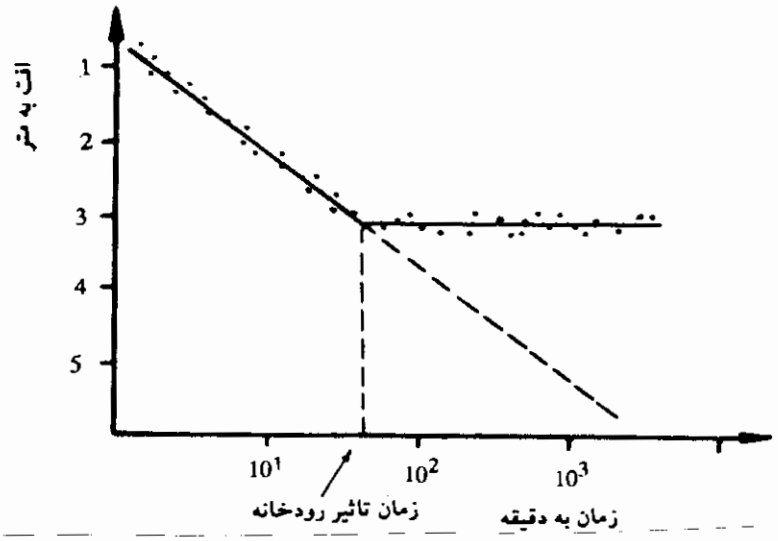
۴-۳-۴ شرایط مرزی

معادلات جریانهای شعاعی عموماً بر مبنای نامحدود بودن گسترش آبخوان بنا نهاده شده‌اند. منظور از نامحدود بودن آبخوان آن است که در محدوده مخروط افت نهایی چاه هیچگونه مرز فیزیکی یا هیدرولیکی (مثل سازندهای نفوذناپذیر، گسل، رودخانه، دریاچه و غیره) وجود نداشته باشد. اگر چنین مرزهایی وجود نداشتند، معادلات فوق مستقیماً قابل استفاده‌اند. در صورتی‌که چنین مرزهایی وجود داشته باشند شکل منحنی‌های افت - زمان از لحظه برخورد مخروط افت با مرز، تغییر پیدا خواهد کرد. شکل کلی منحنی افت - زمان در روی محور مختصات نیمه‌لگاریتمی برای مرز نفوذناپذیر و تغذیه در شکلهای (۴-۲۸) و (۴-۲۹) نشان داده شده است. در این شرایط در صورتی‌که زمان رسیدن به مرز نسبتاً طولانی باشد محاسبه ضرایب هیدرودینامیک براساس داده‌های افت نسبت به زمان قبل از برخورد مخروط با مرز صورت می‌گیرد. اگر این زمان کوتاه باشد، روشهایی برای برآورد ضرایب هیدرودینامیک وجود دارد (مبحث ۴-۲-۱۱)



شکل ۴-۲۸- منحنی افت نسبت به زمان (در شرایط مرز نفوذناپذیر)

افزایش ناگهانی شیب خط افت - زمان در روی نمودار نیمه لگاریتمی می‌تواند نشانه محدود بودن آبخوان باشد. در این آزمایش مخروط افت ممکن است بایک مرز نفوذناپذیر برخورد کرده باشد.



شکل ۴-۲۹- منحنی افت نسبت به زمان (در شرایط تأثیر رودخانه)

افقی شدن یا کاهش شیب منحنی افت - زمان در روی نمودار لگاریتمی می‌تواند نشانه وجود یک مرز تغذیه باشد.

۴-۳-۵ اطلاعات دیگر

علاوه بر اطلاعات فوق داشتن اطلاعات اولیه در مورد روند تغییرات سطح ایستابی یا پیزومتریک براثر عواملی غیر از پمپاژ، وجود یا فقدان افت شبکه در چاه ، گرادیان هیدرولیک و وضعیت چاههای اطراف نیز در تحلیل داده‌های پمپاژ مفید است.

۵- آزمایش چاه

به‌طوری که در مقدمه دستورالعمل آزمایشهای پمپاژ بیان شد، این آزمایشها برای رسیدن به دو هدف کلی، "آزمایش آبخوان" و "آزمایش چاه" انجام می‌گیرد. در مبحث قبل در خصوص آزمایش آبخوان مطالبی ارائه گردید و در این جا بشرح مطالب مربوط به آزمایش چاه می‌پردازیم. آزمایش چاه به‌منظور کسب اطلاعات لازم در موردمیزان آبدهی و افت در چاه، محاسبه ضرائب افت در آبخوان و افت در لوله جدار یا تلفات چاه و تعیین راندمان چاه، محاسبه ظرفیت ویژه و انتخاب موتور پمپ مناسب برای بهره‌برداری از چاه انجام می‌گیرد.

افت اندازه‌گیری شده در یک آزمایش پمپاژ با آبدهی معین را افت کلی[1] می‌گویند. به‌عبارت دیگر اختلاف ارتفاع بین سطح ایستابی یا پیزومتریک و سطح آب داخل چاه در حال پمپاژ (سطح دینامیک)، افت کلی نامیده می‌شود که عبارتست از مجموع "افت ایجاد شده در آبخوان"[2] و افت حاصل از تلفات چاه یا افت شبکه[3]

۵-۱ افت آبخوان و تلفات چاه

طبق قانون دارسی جریان در آبخوان آبرفتی (لایه متخلخل) به سبب سرعت نسبتاً کم، جریانی است آرام یا ورقه‌ای[4]. بنا به تعریف، جریان آرام یا ورقه‌ای جریانی است که در آن هر ذره تقریباً به صورت موازی با ذرات دیگر حرکت کند. در جریانهای آرام افت بار، به طور خطی با سرعت تغییر می‌کند. بنابراین می‌توان گفت که تغییرات افت در آبخوان با آبدهی پمپاژ متناسب است. این رابطه بامعادلات عمومی جریان بیان می‌شود. اما وقتی چاهی را پمپاژ می‌کنیم، با پائین رفتن سطح آب درچاه گرادیان هیدرولیک در اطراف چاه به تدریج زیاد می‌شود و در نتیجه سرعت جریان به طرف چاه افزایش می‌یابد. هرچه آبدهی چاه بیشتر شود گرادیان هیدرولیک و در نتیجه سرعت جریان در اطراف چاه بیشتر خواهد شد. با افزایش سرعت آب زیرزمینی جریان آشفته یا متلاطم[5] در اطراف چاه ایجاد می‌شود. در جریان متلاطم مولکولهای آب مسیر نامنظمی دارند و در هم تداخل می‌کنند. در این نوع جریان افت بار، به طور نمائی با سرعت جریان تغییر می‌کند. براثر تلاطم، میزان آب ورودی به چاه محدود می‌شود و این امر افت بیشتری در چاه ایجاد می‌کند و بهمین دلیل است که افت اندازه‌گیری شده در یک چاه در حال پمپاژ که اصطلاحاً افت کلی نامیده می‌شود، متشکل از مجموع افت‌های زیر است:

الف - افت ناشی از جریان آرام در آبخوان

ب - افت حاصل از جریان آشفته در نزدیکی چاه

1- total drawdown

2- aquifer Loss

3- well loss

4- laminar

5- turbulent

آبخوان محصور

$$Q=\frac{2\pi T(h_2-h_1)}{\ln(r_2/r_1)}$$

آبخوان آزاد

$$Q=\frac{\pi K(h_2^2-h_1^2)}{\ln(r_2/r_1)}$$

با توجه به این معادلات ملاحظه می‌شود که اولاً در صورتی‌که پمپاژ چاه در مدت زمان نسبتاً طولانی ادامه داشته باشد با ثابت شدن تقریبی سطح آب دیگر تغییرات افت نسبت به زمان وجود ندارد. بنابراین افت مستقیماً با آبدهی پمپاژ متناسب است (صرفنظر از تأثیر افت بر ضریب قابلیت انتقال در آبخوان آزاد) و ثانیاً Q با عکس لگاریتم (r2/r1) متناسب است. بنابراین اگر سایر عوامل ثابت درنظر گرفته شوند، تغییرات آبدهی نسبت به شعاع چاه به‌صورت لگاریتمی است. بدین معنا که اگر شعاع چاه دو برابر شود، آبدهی فقط حدود ۱۰ درصد افزایش می‌یابد.

برای روشن شدن موضوع فرض می‌کنیم در آبخوانی محصور چاهی به شعاع ۰/۱ متر حفر شده و با پده ثابت آن قدر پمپاژ می‌شود تا سطح آب در چاه تقریباً ثابت شود. در این حال شعاع تأثیر ۱۰۰۰ متر فرض می‌شود. حال می‌خواهیم ببینیم با دو برابر کردن شعاع چاه در صورت ثابت بودن سایر عوامل، آبدهی چه مقدار تغییر می‌کند. بنا به رابطه جریان ماندگار داریم:

$$Q_1 = \frac{2\pi \times T \times \Delta s}{ln\left(\frac{1000}{0/1}\right)}$$

$$Q_2 = \frac{2\pi \times T \times \Delta s}{ln\left(\frac{1000}{0/2}\right)}$$

و از آنجا داریم :

$$\frac{Q_2}{Q_1} \cong 1/08$$

بنابراین ملاحظه می‌شود که با دو برابر شدن شعاع چاه آبدهی فقط حدود ۸ درصد افزایش می‌یابد.

در شرایط ماندگار، اگر شعاع چاه دو برابر شود. سطح آبگیری چاه نیز دو برابر می‌شود و طبق قانون دارسی Q = V.A سرعت نصف می‌شود. (بعبارت دیگر $\frac{V_1}{V_2} = \frac{R_2}{R_1}$) بدین ترتیب هرچه شعاع چاه کوچکتر باشد سرعت جریان آب ورودی و امکان تشکیل جریان آشفته بیشتر و مقدار افت شبکه زیادتر خواهد بود. بنابراین افت شبکه را می‌توان با به حداقل رسانیدن سرعت ورودی چاه به حداقل رساند. بدین ترتیب معادله یک آبخوان تحت فشار در چاه علاوه بر افت آبخوان شامل افت شبکه جدار خواهد بود. پس داریم:

$$s_w=h_o-h_w=\frac{Q}{2\pi T}\ln\frac{r_o}{r_w}+CQ^n \qquad (۲-۵)$$

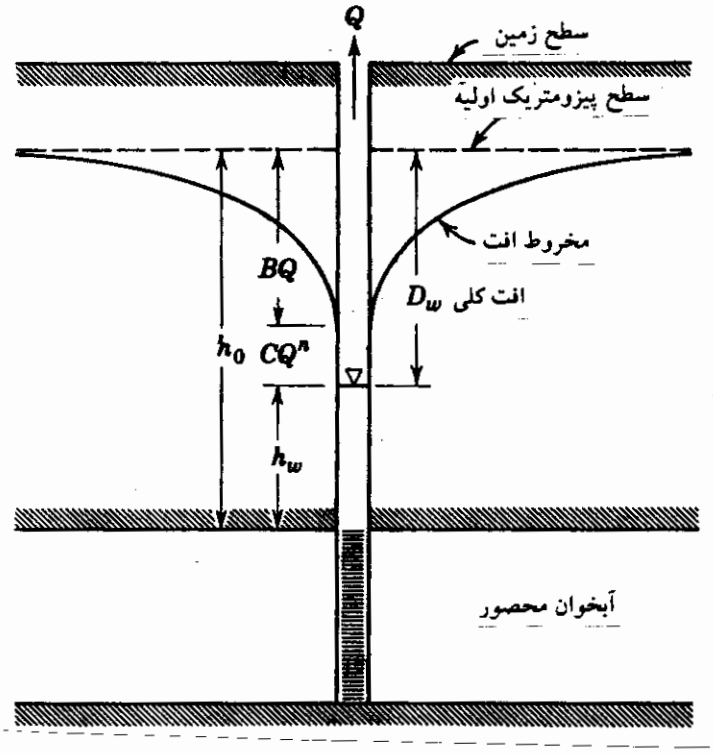
و نتیجه می‌گیریم که در آبدهی‌های نسبتاً کم تلفات چاه ناچیز است و با افزایش آبدهی تلفات چاه به‌طور نمایی با Q در تغییر است. این وضع در شکل (۵-۲) نشان داده شده است.

ج - افت در شبکه اسکرین

د - افت در داخل چاه

این مجموعه در شکل (۵-۱) نشان داده شده است. بنابراین با توجه به مطالب فوق و شکل (۵-۱) می‌توان نوشت:

$$s_w = BQ + CQ^n \qquad (۱-۵)$$



شکل ۵-۱ رابطه بین تلفات چاه با افت کلی در یک آبخوان محصور

که در آن

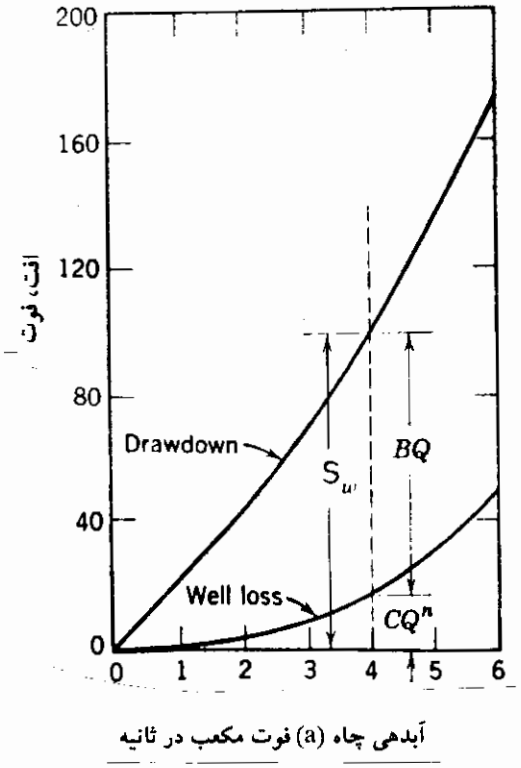
s_w = افت کلی در چاه

BQ = افت آبخوان (بند الف)

CQ^n = تلفات یا افت در چاه که مجموع افت‌های بند ب، ج و د است.

برای آنکه تلفات چاه را بحداقل برسانیم باید سرعت جریان در نزدیکی چاه را به کمترین مقدار ممکن برسانیم. معادله ۵-۱ نشان می‌دهد که تغییرات افت در آبخوان با آبدهی متناسب است، یعنی با توان اول آبدهی تغییر می‌کند (جریان آرام). در حالیکه تغییرات افت شبکه یا تلفات چاه با توانی از Q متناسب است (جریان آشفته). برای روشن شدن موضوع معادلات عمومی جریان را مورد بررسی قرار می‌دهیم، چنانکه در بخش اول نشریه اشاره شد معادلات جریانهای ماندگار در آبخوانهای محصور و آزاد به‌صورت زیر است:

توان Q از بیشتر از یک تا بیش از ۳ می‌تواند تغییر کند. اگر مقدار n برابر ۲ باشد وقتی سرعت ورود نصف شود مقدار افت شبکه ۷۵٪ و اگر n = ۳ فرض شود مقدار افت شبکه ۸۷/۵٪ کاهش پیدا خواهد کرد.
بنابراین در صورت وجود افت شبکه افزایش قطر چاه نقش مهمی در کاهش تلفات چاه خواهد داشت.



شکل ۵-۲- تغییرات افت کلی (sw)، افت آبخوان (BQ) و تلفات چاه (CQ^n) در مقابل آبدهی .

ژاکوب مقدار n را در معادله (۵-۱) برابر ۲ پیشنهاد کرده اما به نظر روراباگ[1] n=۲/۵ مناسب‌تر است. لنوکس[2] در تحلیل آزمونهائی که انجام داده است، مقدار n را تا ۳/۵ و حتی در بعضی موارد کمتر از ۲ نیز گزارش کرده است.

مناسب‌ترین راه برای به‌دست آوردن n از راه تجربی و به‌وسیله آزمایش پمپاژ افت پله‌ای است که روراباگ پیشنهاد کرده است. اما با فرض n=۲ که ژاکوب پیشنهاد کرده بروشهای ترسیمی و محاسباتی نیز می‌توان افت آبخوان و افت شبکه یا تلفات چاه را در آزمایش پمپاژ پله‌ای با تقریب قابل قبولی به‌دست آورد که بعداً هریک از روشهای فوق تشریح خواهند شد.

1- Roraubagh 2- Lennox

۵-۲ آزمایش افت و برگشت پله‌ای

آزمایش افت پله‌ای معمولاً در چند پله یعنی با تغییر دادن آبدهی در هر پله انجام می‌گیرد. اندازه‌گیری سطح آب در هر پله تا ثابت شدن تقریبی سطح آب (سطح دینامیک) ادامه می‌یابد. به‌منظور افزایش حدود دقت آزمایشها علاوه بر پیش‌بینی وسائل اندازه‌گیری که در بند ۳-۲ بخش اول این نشریه آمده، با نصب شیر فلکه بر روی لوله تخلیه برای تنظیم آبدهی چاه در هر پله به ویژه هنگامی که از الکتروپمپ استفاده می‌شود، ضروریست. آزمایش افت پله‌ای به دو صورت "آبدهیهای کم به زیاد" و "آبدهیهای زیاد به کم" انجام می‌شود. افزایش یا کاهش آبدهی هنگام استفاده از پمپهای توربینی و موتور دیزل با تغییر دور موتور صورت می‌گیرد. در آزمایش افت پله‌ای ، در شروع آزمایش سطح آب در چاه باید به سطح ایستابی رسیده‌باشد. آزمایشهای آبدهی حداقل به حداکثر، بدین ترتیب انجام می‌شودکه پله اول با حداقل آبدهی ممکن شروع می‌شود. در این آزمایش قبل از روشن کردن موتور، سطح آب در چاه اندازه‌گیری می‌شود و سپس با روشن‌کردن موتور و شروع پمپاژ سطح آب حتی‌المقدور تا ثابت شدن آن اندازه‌گیری می‌شود. در پله دوم با افزودن دور موتور یا بازکردن شیر فلکه، آبدهی را به‌میزان معینی افزایش داده و تا رسیدن به سطح دینامیک در فواصل زمانی معین افتها اندازه‌گیری می‌شود. بهمین ترتیب با افزودن بر مقدار آبدهی اندازه‌گیری سطح آب به‌گونه‌ای که در بالاگفته شد ادامه می‌یابد افزایش میزان آبدهی حداقل در سه پله انجام می‌گیرد.

آزمایشهای افت پله‌ای آبدهیهای حداکثر به حداقل بدین صورت است که اولین پله از بالاترین آبدهی ممکن شروع می‌شود و پس از ثابت شدن تقریبی سطح آب (سطح دینامیک)، افت ایجاد شده اندازه‌گیری می‌شود، پله دوم با کاهش دادن دور موتور (کاهش آبدهی) شروع و به محض ثابت شدن تقریبی سطح آب، مقدار افت اندازه‌گیری می‌شود. به‌همین ترتیب، کاهش دادن آبدهی، افت سطح آب در پله‌های بعدی اندازه‌گیری می‌شود تا اینکه در پله آخر با خاموش کردن موتور، اندازه‌گیری سطح آب تا رسیدن به سطح ایستابی اولیه ادامه می‌یابد.

۵-۳ تجزیه و تحلیل نتایج اندازه‌گیریهای آزمایش افت پله‌ای :

تجزیه و تحلیل داده‌های اندازه‌گیری برای به‌دست آوردن ضرائب افت آبخوان (B)و افت شبکه (C)، تعیین راندمان چاه و مشخص کردن آبدهی بحرانی و تعیین موتور پمپ مناسب انجام می‌شود، برای محاسبه افت آبخوان و افت شبکه جدار چاه (تلفات چاه) روشهای ترسیمی و محاسباتی وجود دارد که در هر یک از آنها ابتدا ضرائب افت و سپس افتهای مربوط محاسبه می‌شود.

۵-۳-۱ روش ترسیمی (با فرض n=۲)

با توجه به رابطه (۵-۱) وقتی n=۲ باشد داریم:

$$s_w = BQ + CQ^2 \qquad (۵-۳)$$

اگر این معادله به Q تقسیم شود داریم :

$$\frac{s_w}{Q} = B + CQ \qquad (۵-۴)$$

رابطه ۵-۴ یک معادله خطی است و عبارت $\frac{s_w}{Q}$ افت ویژه نامیده می‌شود. بدین ترتیب با رسم نمودار تغییرات افت ویژه در مقابل آبدهی (Q) در کاغذی با مقیاس حسابی ضرایب B و C قابل محاسبه است.

بنابراین براساس داده‌های حاصل ازآزمایش افت پله‌ای، ابتدا جدولی مشتمل بر تغییرات آبدهی، افت،افت ویژه و ظرفیت ویژه در مراحل مختلف آزمایش تنظیم می‌شود (جدول ۵-۱)

جدول شماره ۵-۱

پله	آبدهی Q (m^3/hr)	افت s (m)	افت ویژه s/Q ($m/m^3/hr$)	ظرفیت ویژه Q/s ($m^3/hr/m$)	ملاحظات
اول	Q_1	s_1	s_1/Q_1	Q_1/s_1	
دوم	Q_2	s_2	s_2/Q_2	Q_2/s_2	
سوم	Q_3	s_3	s_3/Q_3	Q_3/s_3	
چهارم	Q_4	s_4	s_4/Q_4	Q_4/s_4	
پنجم	Q_5	s_5	s_5/Q_5	Q_5/s_5	

حال با رسم نمودار تغییرات $\frac{s_w}{Q}$ به Q (شکل ۵-۳)، بر نقاط به‌دست آمده خطی برازش داده می‌شود. این خط محور افت ویژه را در نقطه‌ای قطع می‌کند که نشان‌دهنده مقدار B است و شیب یا ضریب زاویه این خط برابر با C است (شکل ۵-۳). با جایگذاری مقادیر به‌دست آمده (B و C)، مقادیر افت آبخوان (BQ) و افت شبکه (CQ^2) در رابطه (۵-۳) در مراحل مختلف آزمایش نیز قابل محاسبه است.

مثال :

نتایج اندازه‌گیری یک آزمایش افت پله‌ای در آبخوان آزاد در (جدول ۵-۲) آمده است.

جدول شماره ۵-۲

پله	آبدهی Q m^3/hr	افت s m	افت ویژه s/Q $m/m^3/hr$	راندمان درصد	ΔQi m^3/hr	Δsi m
اول	۳۰	۰/۳۷	۰/۰۱۲۳	۸۹		
دوم	۸۵	۱/۲۵	۰/۰۱۴۷	۷۵	۵۵	۰/۸۸
سوم	۱۱۰	۱/۷۵	۰/۰۱۵۹	۶۹	۲۵	۰/۵
چهارم	۱۴۰	۲/۴۲	۰/۰۱۷۳	۶۴	۳۰	۰/۷۱

با استفاده از داده‌های جدول فوق نمودار تغییرات افت ویژه $(\frac{s}{Q})$ به آبدهی (Q) را روی کاغذ میلیمتری رسم می‌کنیم (شکل ۵-۳). از روی این نمودار مقادیر B و C به شرح زیر به دست می‌آید:

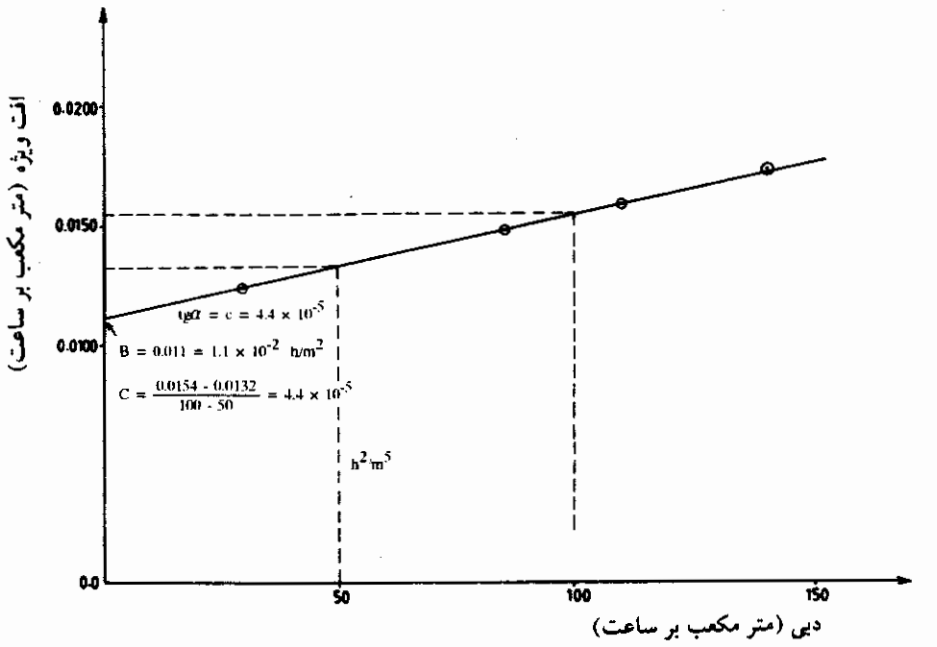
$$B = ۰/۰۱۱ = ۱/۱ \times ۱۰^{-۲}\ h/m^۲ \Rightarrow ۳۹/۶ sec/m^۲$$

$$C = \frac{۰/۰۱۵۴ - ۰/۰۱۳۲}{۱۰۰ - ۵۰} = ۴/۴ \times ۱۰^{-۵} h^۲/m^۵ \Rightarrow ۵۷۰ sec^۲/m^۵$$

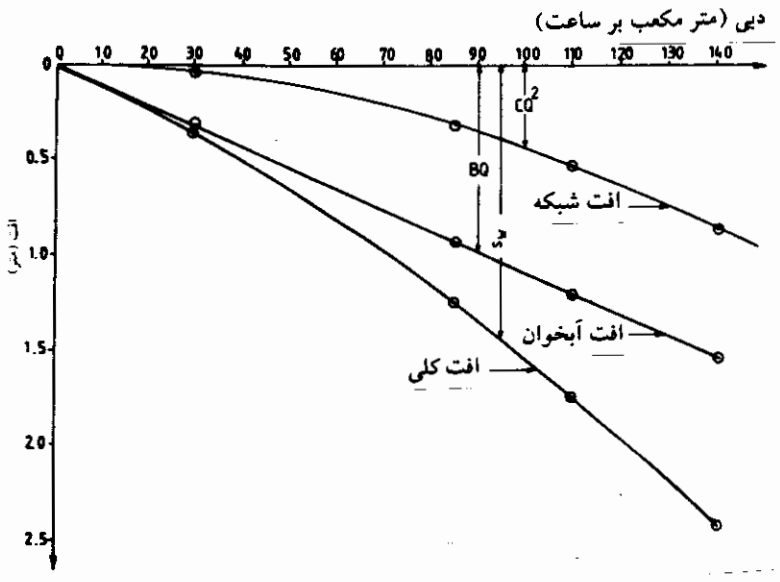
با استفاده از داده‌های جدول ۵-۲ و با توجه به معادله ۵-۳ مقادیر افت در آبخوان، افت در شبکه و افت کل قابل محاسبه است که در شکل ۵-۴ تغییرات آنها نسبت به آبدهی نشان داده شده است.

«بازده[1]» یا «راندمان» چاه، که از تقسیم افت آبخوان (BQ) به افت کل (sw) به‌دست می‌آید، برای پله‌های مختلف در مثال فوق (جدول ۵-۲) محاسبه شده که نتایج آن به صورت نمودار شکل ۵-۵ نمایش داده شده است. روشن است که هرچه مقدار راندمان چاه بیشتر باشد، چاه شرایط مطلوبتری برای بهره‌برداری دارد.

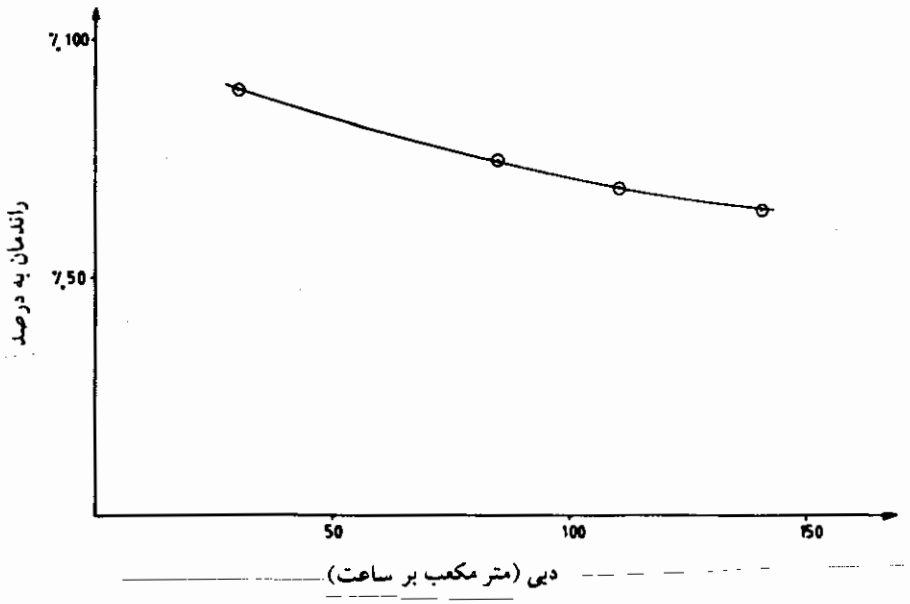
1- efficiency



نمودار ۵-۳- نمودار تغییرات افت ویژه - آبدهی



شکل ۵-۴- منحنی تغییرات افت کلی (Sw)، افت آبخوان (BQ) و افت شبکه (CQ^2) نسبت به آبدهی مربوط به مثال جدول شماره ۵-۲



شکل ۵-۵- منحنی بازده چاه

۵-۳-۲ روش Roraubagh

در روش قبل $n = ۲$ فرض شده است. ولی چنانکه گفته شد مؤلفین مختلف مقادیر متفاوتی برای n در نظر می‌گیرند Roraubagh روشی برای برآورد n بشرح ذیل پیشنهاد کرده است :

معادله ۵-۱ را با تقسیم طرفین معادله به Q به‌صورت زیر می‌نویسیم :

$$\frac{Sw}{Q} = B + CQ^{n-1} \qquad (۵-۵)$$

از طرفین معادله لگاریتم می‌گیریم :

$$\log\left(\frac{Sw}{Q} - B\right) = \log C + (n - ۱)\log Q \qquad (۶-۵)$$

حال اگر $\frac{Sw}{Q} - B$ را در یک کاغذ با مقیاس لگاریتمی در مقابل Q رسم کنیم خط مستقیمی به‌دست می‌آید که شیب آن برابر $n - ۱$ است و محل تقاطع آن با محور $\frac{Sw}{Q} - B$ وقتی $Q = ۱$ باشد نمایانگر مقدار C است.

اما چون مقدار B نامعلوم است چنین نموداری را نمی‌توان ترسیم کرد. بنابراین در این روش ابتدا مقادیر مختلفی را برای B فرض کرده و $\frac{Sw}{Q}$ - B را در مقابل Q روی کاغذ لگاریتمی رسم می‌کنیم. معمولاً اولین مقدار B برابر صفر در نظر گرفته می‌شود که منحنی مقعری به طرف بالا به‌دست می‌آید. سپس مقدار B را به تدریج افزایش می‌دهیم تا خط مستقیمی حاصل شود (اگر مقدار C زیاد در نظر گرفته شود منحنی مقعر دیگری در طرف دیگر خط مستقیم، رو به پایین به‌دست می‌آید). شیب خط مستقیم برابر ۱ - n است و از آنجا مقدار n محاسبه می‌شود. مقدار C با جایگذاری مقادیر B ، n ، Sw و Q مربوطه در معادله ۵-۱ محاسبه خواهد شد.

مثال : در یک آزمایش افت پله‌ای مقادیر Sw و Q به شرح ذیل است :

Q (m^3/day)	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۴۰۰۰	۶۰۰۰	۸۰۰۰
Sw(m)	۴/۵۶	۱۰/۷۴	۲۹/۴۸	۵۸/۲۶	۹۸/۴۱

مقدار $\frac{Sw}{Q}$ - B برای مقادیر مختلف B عبارتست از :

B = ۰	$۴/۵۶\times۱۰^{-۳}$	$۵/۳۷\times۱۰^{-۳}$	$۷/۳۷\times۱۰^{-۳}$	$۹/۷۱\times۱۰^{-۳}$	$۱/۲۳\times۱۰^{-۲}$
B = ۰/۰۰۲	$۲/۵۶\times۱۰^{-۳}$	$۳/۳۷\times۱۰^{-۳}$	$۵/۳۷\times۱۰^{-۳}$	$۷/۷۱\times۱۰^{-۳}$	$۱/۰۳\times۱۰^{-۲}$
B = ۰/۰۰۳	$۱/۵۶\times۱۰^{-۳}$	$۲/۳۷\times۱۰^{-۳}$	$۴/۳۷\times۱۰^{-۳}$	$۶/۷۱\times۱۰^{-۳}$	$۹/۳\times۱۰^{-۳}$
B = ۰/۰۰۴	$۵/۶\times۱۰^{-۴}$	$۱/۳۷\times۱۰^{-۳}$	$۳/۳۷\times۱۰^{-۳}$	$۵/۷۱\times۱۰^{-۳}$	$۸/۳\times۱۰^{-۳}$
B = ۰/۰۰۵	$-۴/۴\times۱۰^{-۴}$	$۳/۷\times۱۰^{-۴}$	$۲/۳۷\times۱۰^{-۳}$	$۴/۷۱\times۱۰^{-۳}$	$۷/۳\times۱۰^{-۳}$

حال براساس داده‌ها $\frac{Sw}{Q}$ - B را در مقابل Q بر روی کاغذ لگاریتمی رسم می‌کنیم (نمودار ۵-۶). ملاحظه می‌شود وقتی B = ۰/۰۰۴ فرض می‌شود خط مستقیم به‌دست می‌آید. شیب این خط یعنی ۱ - n = ۱/۳ است. بنابراین n=۲/۳ خواهد بود. حال با استفاده از داده‌های افت کلی (Sw)، Qهای اندازه‌گیری شده، مقدار افت آبخوان (BQ) و افت شبکه (CQ^n) با توجه به فرمول زیر محاسبه می‌شود، نتایج محاسبات در جدول ۵-۳ آمده است.

$$Sw = ۰/۰۰۴Q + CQ^{۲/۳}$$

$$۴/۵۶ = ۰/۰۰۴\,(۱۰۰۰) + C\,(۱۰۰۰)^{۲/۳} \Rightarrow C = ۷/۰۷ \times ۱۰^{-۸}$$

$$۱۰/۷۴ = ۰/۰۰۴\,(۲۰۰۰) + C\,(۲۰۰۰)^{۲/۳} \Rightarrow C = ۷ \times ۱۰^{-۸}$$

$$۲۹/۴۸ = ۰/۰۰۴\,(۴۰۰۰) + C\,(۴۰۰۰)^{۲/۳} \Rightarrow C = ۶/۹۹ \times ۱۰^{-۸}$$

$$۵۸/۲۶ = ۰/۰۰۴\,(۶۰۰۰) + C\,(۶۰۰۰)^{۲/۳} \Rightarrow C = ۷ \times ۱۰^{-۸}$$

$$۹۸/۴۱ = ۰/۰۰۴\,(۸۰۰۰) + C\,(۸۰۰۰)^{۲/۳} \Rightarrow C = ۷ \times ۱۰^{-۸}$$

جدول ۵-۳- محاسبه افت آبخوان و افت شبکه

آبدهی Q (m^3/day)	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۴۰۰۰	۶۰۰۰	۸۰۰۰
افت کلی اندازه‌گیری s_w(m)	۴/۵۶	۱۰/۷۴	۲۹/۴۸	۵۸/۲۶	۹۸/۴۱
افت آبخوان BQ (m)	۴	۸	۱۶	۲۴	۳۲
افت شبکه $CQ^{2.3}$ (m)	۰/۵۶	۲/۷۴	۱۳/۴۸	۳۴/۲۶	۶۶/۴۱

ملاحظه می‌شود که افت شبکه یا تلفات چاه به سرعت با افزایش دادن آبدهی زیاد می‌شود به‌طوریکه در آبدهی ۸۰۰۰ مترمکعب در روز حدود ۶۸درصدافت کلی مربوط به تلفات در چاه است در حالیکه در اولین پله تلفات شبکه چاه حدود ۱۲ درصد بوده است.

این امر اهمیت ساختمان یک چاه را اعم از چگونگی گراول پکینگ و طراحی شبکه اسکرین، بیان می‌کند. اصولاً چهار دلیل عمده برای انجام گراول پک در چاه وجود دارد که عبارتست از :

۱- افزایش ظرفیت ویژه چاه

۲- کاهش دادن ماسه‌دهی در سازندهای دانه‌ریز

۳- کمک به تحکیم ساختمان چاه

۴- کاهش دادن پوسته‌گذاری در چاههایی که در آبخوانهای با پتانسیل پوسته‌گذاری[1] حفر می‌شوند.

در چاههایی که منحنی دانه‌بندی مواد آبخوان در ردیف ماسه متوسط دانه‌رده‌بندی شده، منحنی گراول پکینگ آنها باید در ردیف ماسه بسیار درشت دانه یا گراول ریزدانه باشد. یعنی متوسط اندازه دانه‌های سازند ۰/۳۸ میلیمتر و متوسط اندازه دانه‌های گراول پک مورد نیاز ۱/۸ میلیمتر است.

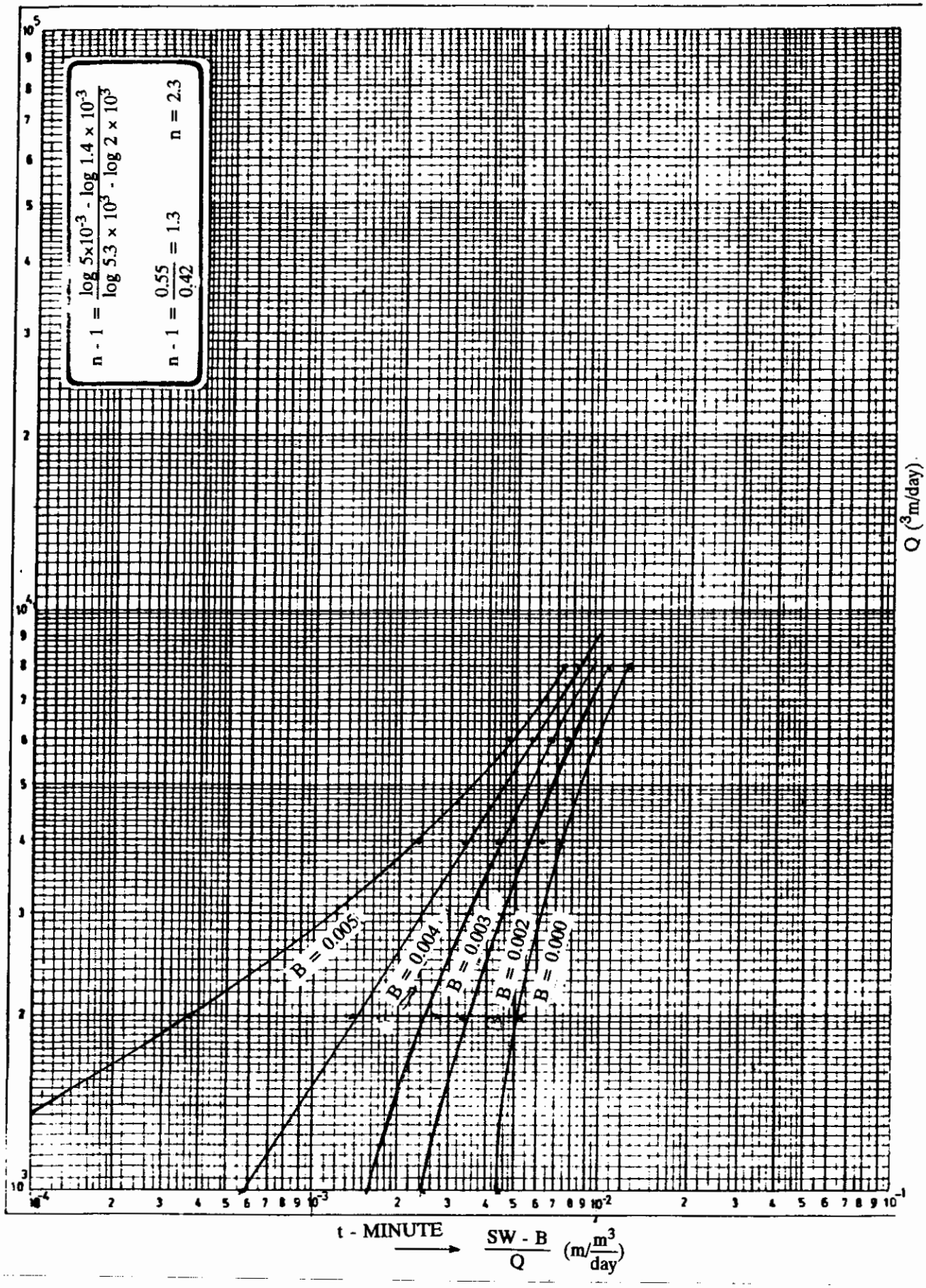
نسبت گراول پکینگ[2] با معادله زیر تعیین می‌شود :

$$GPR = \frac{\text{٪۵۰ gravel pack}}{\text{٪۵۰ formation}} \qquad (۵-۷)$$

براساس مطالعات انجام شده اگر نسبت گراول پکینگ به دانه‌بندی بین ۴ تا ۵ باشد، چاه دارای راندمان بالایی است در حالیکه اگر این نسبت بین ۷ تا ۱۰ باشد راندمان چاه کم است و چنانچه این نسبت بیش از ۱۰ باشد، چاه ماسه‌دهی خواهد داشت و در صورتیکه این نسبت بیش از ۲۰ باشد چاه به شدت ماسه‌دهی داشته و غیرقابل بهره‌برداری می‌شود.

1- incrustation

2- gravel pack ratio


$n - 1 = \frac{\log 5\times10^{-3} - \log 1.4 \times 10^{-3}}{\log 5.3 \times 10^{-3} - \log 2 \times 10^{-3}}$
$n - 1 = \frac{0.55}{0.42} = 1.3$
n = 2.3
B = 0.005
B = 0.004
B = 0.003
B = 0.002
B = 0.000
Q (^{3}m/day)
t - MINUTE
$\frac{SW - B}{Q}$ (m/$\frac{m^3}{day}$)

۵-۴ سرعت بحرانی و بده بحرانی

مقدار آبدهی مناسب در چاههای بهره‌برداری جدید و میزان افت به ازای آبدهی مورد نظر با استفاده از آزمایشهای پمپاژ با آبدهی متغیر به‌دست می‌آید. این‌گونه اطلاعات از نظر تعیین قدرت موتور، انتخاب پمپ مناسب و عمق نصب پمپ لازم است.

مقدار بده بهره‌برداری از چاه هیچگاه نباید از یک حد معینی که سبب ایجاد سرعت بحرانی[1] در اطراف چاه می‌شود، تجاوز کند. سرعت بحرانی آب زیرزمینی عبارتست از حداکثر سرعتی که جریان آب در یک لایه متخلخل می‌تواند به صورت آرام[2] باشد. در جریانهای آرام سرعت‌ها نسبتاً کم است و افت بارها به طور خطی با سرعت تغییر می‌کند (افت بار متناسب با توان اول سرعت آب است). وقتی چاهی را پمپاژ می‌کنیم با پائین‌رفتن سطح آب در چاه، گرادیان هیدرولیک در اطراف چاه بتدریج زیاد می‌شود و در نتیجه طبق قانون دارسی سرعت جریان آب بطرف چاه افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش بده سرعت جریان ممکن است آنقدر زیاد شود که جریانی آشفته یا متلاطم[3] در اطراف چاه ایجاد شود. در این نوع جریان افت بارها به طور نمائی با سرعت جریان تغییر می‌کند. براثر تلاطم هم میزان آب ورودی به چاه محدود می‌شود و هم ماسه‌ها و ذرات دانه ریز آبخوان ممکن است به حرکت درآمده و منافذ لوله‌های جدار را مسدود سازد. میزان آبدهی چاه را به ازاء رسیدن به سرعت بحرانی، اصطلاحاً "بده بحرانی"[4] می‌گویند.

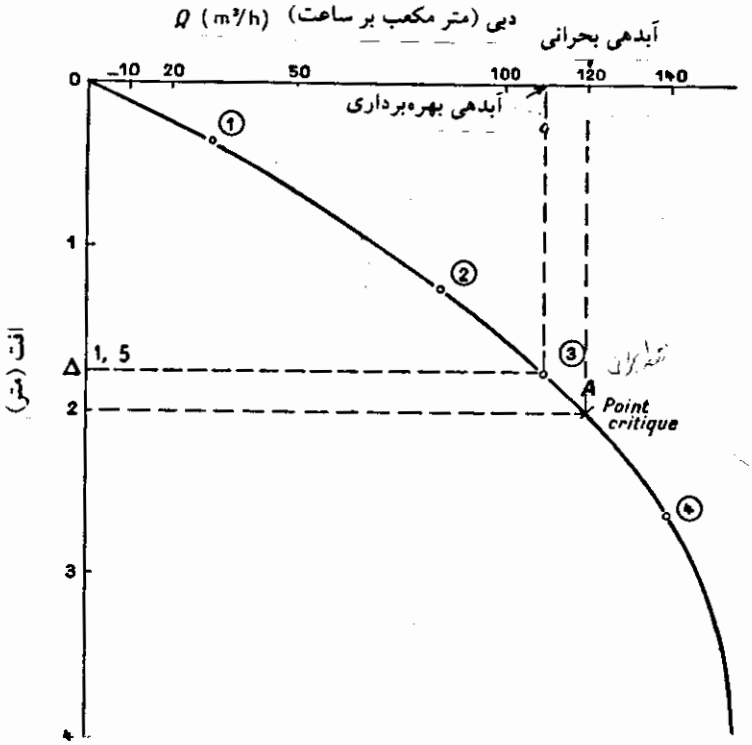
برای محاسبه بده بحرانی می‌توان از نتایج آزمایش افت پله‌ای استفاده کرد. برای این کار منحنی تغییرات افت کلی (Sw) به آبدهی (Q) یا منحنی Sw=f (Q) راروی محورهای مختصات رسم می‌کنیم، که به آن "منحنی مشخصه" چاه نیز می‌گویند.

در شکل ۵-۷ آزمایش افت پله‌ای چهار مرحله‌ای در چاهی که در یک آبخوان آزاد حفر شده، نشان داده شده است. این چاه به ترتیب بابده‌های Q1, Q2, Q3وQ4 پمپاژ شده تا آن که سطح آب در چاه در افتهای Sw1, Sw2,Sw3 و Sw4 ثابت شده است. با انتقال نقاط بر روی محورهای مختصات، منحنی مشخصه چاه مورد نظر به‌دست می‌آید.

منحنی مشخصه آبخوانهای آزاد معمولاً به صورت یک سهمی است. در افتهای کم، نخستین بخش این منحنی (از مبدأ مختصات تا نقطه A، شکل ۵-۷) را می‌توان مشابه یک خط مستقیم دانست، یعنی نقاط پیاده شده تقریباً روی یک خط مستقیم قرار می‌گیرند. از نقطه A به بعد دیگر نقاط روی این خط مستقیم واقع نمی‌شوند و شیب منحنی زیاد

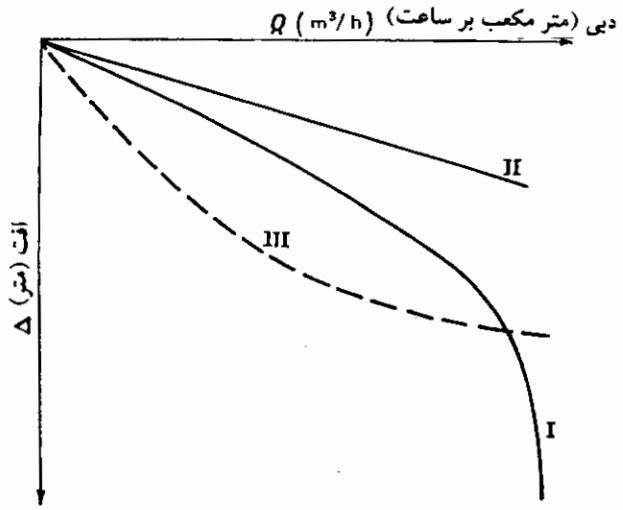
1- critical velosity
2- laminar
3- turbulent flow
4- critical discharge

می‌شود. به عبارت دیگر افزایش کمی در مقدار آبدهی موجب افت زیاد سطح آب می‌شود. به این ترتیب نقطه A نقطه بحرانی است و آبدهی مربوط به نقطه بحرانی معرف "بده بحرانی" یا حداکثر آبدهی مجاز بهره‌برداری در چاه است که هرگز نباید مقدار بده بهره‌برداری از چاه از این مقدار بیشتر شود، زیرا بهره‌وری چاه را کاهش می‌دهد و ممکن است موجب ماسه‌دهی آن شود. بده بحرانی در شکل ۵-۷ حدود ۱۲۰ متر مکعب بر ساعت است. البته شرط احتیاط آن است که بده بهره‌برداری کمتری انتخاب شود.



شکل ۵-۷ منحنی مشخصه چاه در یک آبخوان آزاد برای تعیین بده بحرانی (بده بحرانی در این چاه تقریباً ۱۲۰ متر مکعب بر ساعت و میزان افت به ازای این بده حدود ۲ متر است)

اگر چاه مورد آزمایش به خوبی تجهیز شود و آزمایش افت پله‌ای به درستی انجام شده باشد، نمودار تغییرات $Sw=f(Q)$ معمولاً به صورت یک سهمی یا به صورت خط مستقیمی با شیب کم است. ولی گاهی به علل مختلف مثلاً انجام نادرست آزمایش، اشتباه در اندازه‌گیریها، توسعه و شستشوی نامناسب چاه، یاعدم برقراری شرایط ماندگار، ممکن است منحنی مشخصه چاه به صورت هذلولی باشد (منحنی III در شکل ۵-۸ که در این صورت نمی‌توان تفسیر درستی انجام داد). در شکل ۵-۸ منحنی I مربوط به یک آبخوان آزاد یا آبخوان تحت فشار با افت خیلی زیاد است و خط II نیز نشان‌دهنده یک آبخوان تحت فشار با افت ناچیز است.روشن است که در چنین آبخوانی ظرفیت ویژه $(\frac{Q}{s})$ مقدار ثابتی است.



شکل ۵-۸ شکلهای مختلف منحنی‌های مشخصه چاه I - در آبخوانهای آزاد یا آبخوانهای تحت فشار با افت زیاد II- در آبخوان تحت فشار III- در شرایط آزمایش نامناسب.

۵-۵ پمپ و موتور

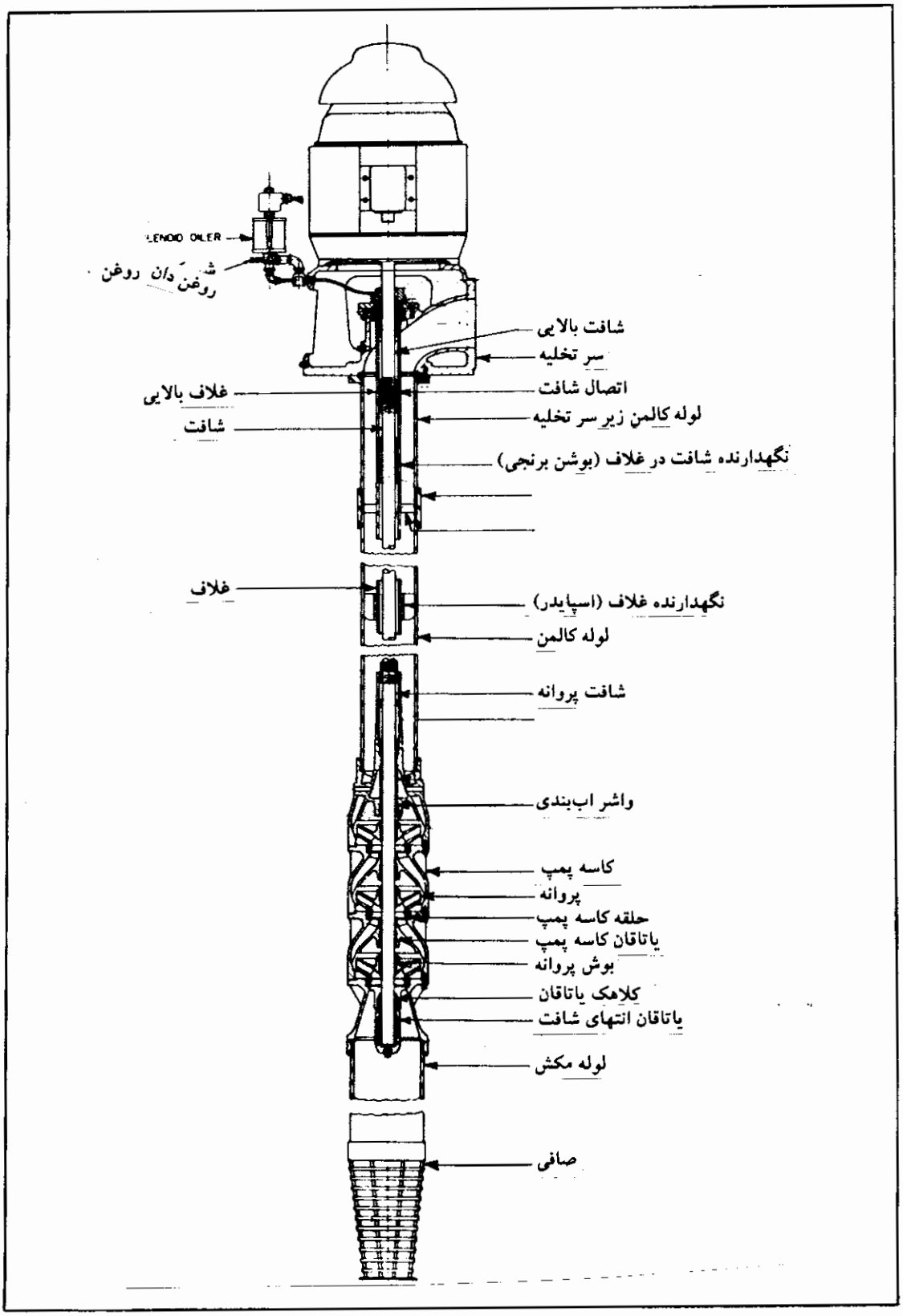
بعضی از چاههای آب، آرتزین و یا خود جریان هستند که نیازی به پمپ و موتور ندارند ولی اینگونه چاهها کمیابند. در اکثر چاهها سطح استاتیک در زیر سطح زمین قرار دارد و به همین جهت غالباً لازم است که آب چاه به روشهای مصنوعی از آن استخراج شود. در گذشته تخلیه آب از چاه به‌وسیله دلو و چرخ چاه با استفاده از نیروی انسانی و یا بهره‌گیری از چهارپایان انجام می‌شده است. سپس تلمبه‌های دستی متداول شده است که با حرکت پیستون در داخل یک لوله و با استفاده از نیروی مکش، آب را از چاههای کم عمق تخلیه می‌کند. در بعضی از این پمپها از انرژی باد نیز استفاده می‌شود. این روشها در برخی از نقاط دنیا هنوز متداول است. ولی با استفاده از این روشها آب چندان زیادی نمی‌توان به دست آورد. تنها می‌توان برای مصارف جزیی و خانگی آب به اندازه کافی به دست آورد.

۵-۵-۱ پمپهای مورد استفاده در چاههای آب

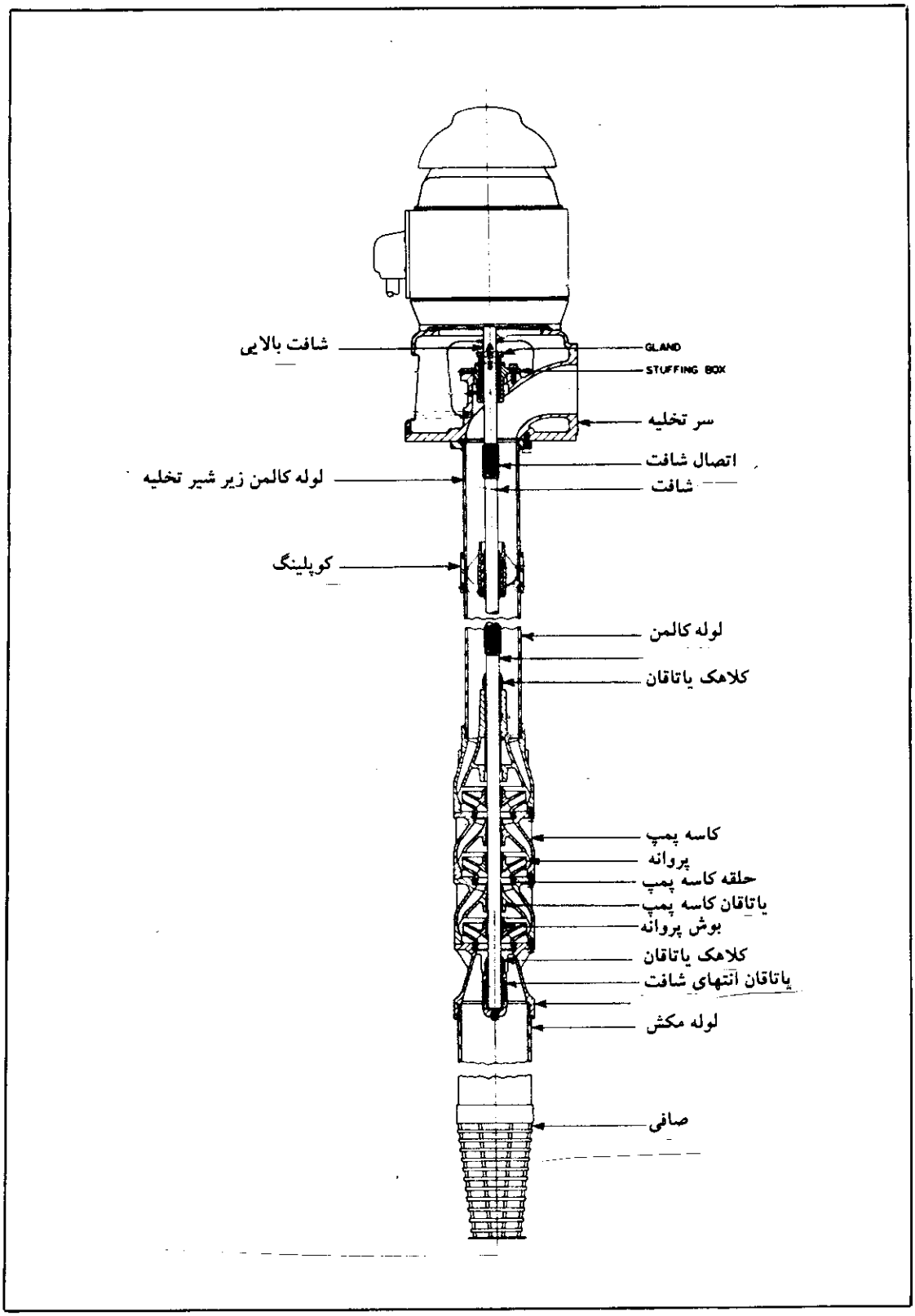
امروزه استحصال آب از چاههای عمیق و نیمه عمیق برای مصارف کشاورزی، صنعت یا شهری معمولاً با استفاده از پمپهای پروانه‌ای صورت می‌گیرد. این پمپها عموماً از سه قسمت زیر تشکیل شده است :

- کاسه[1] یا محفظه ثابت پمپ که معمولاً از جنس چدن ساخته می‌شود و در داخل آن شیارهایی برای عبور جریان آب تعبیه شده است.

1- bowl



شکل ۵-۹- مقطعی قائمی از یک پمپ توربینی غلاف‌دار (شافت بسته) عمل روان‌کاری با روغن انجام می‌گیرد



شکل ۵-۱۰- مقطعی قائمی از یک پمپ توربینی بدون غلاف (شافت باز) عمل روانکاری با آب انجام می‌گیرد

- پروانه[1] یا قسمت متحرک، که معمولاً از برنز ساخته می‌شود، با استفاده از نیروی محرکه به چرخش درمی‌آید و براثر نیروی گریز از مرکز آب را در شیارهای کاسه به سمت دهانه خروجی هدایت می‌کند.
- شافت[2] یا محور پمپ، که از جنس فولاد ضدزنگ است، نیروی محرکه را از موتور به پروانه‌ها انتقال می‌دهد.

نیروی محرکه این‌گونه پمپها به وسیله موتورهای الکتریکی یا دیزلی تأمین می‌شود.

پمپها معمولاً به دو صورت در چاههای آب مورد استفاده قرار می‌گیرند:

- ۵-۵-۱-۱ پمپهایی که در خارج از آب نصب می‌شوند یا پمپهای گریز از مرکز[3] با محور افقی (پمپهای سر چاهی یا کمر چاهی)
- ۵-۵-۱-۲ پمپهایی که در داخل آب نصب می‌شوند یا پمپهای با محور قائم (انواع پمپهای توربینی)

۵-۵-۱-۱ پمپهای با محور افقی

این پمپها برای پمپاژ آب از چاههای نیمه عمیق که سطح آب در آنها بالاست مورد استفاده قرار می‌گیرند. محور این پمپها افقی است و دارای یک دهانه ورودی و یک دهانه خروجی است که معمولاً قطر دهانه ورودی بزرگتر از دهانه خروجی است. این پمپها در سر چاه یا در قسمتهای پایین‌تر خارج از آب نصب می‌شوند. دهانه ورودی این پمپها به یک لوله فلزی یا یک لوله خرطومی شکلی متصل است و در انتهای آن سوپاپ یک طرفه‌ای تعبیه شده، که در داخل چاه قرار می‌گیرد. برای رانش آب، از دهانه خروجی پمپ به محل موردنظر، از یک لوله فلزی استفاده می‌شود.

نیروی محرکه این‌گونه پمپها به‌وسیله الکتروموتورهایی که معمولاً با پمپ هم محورند یا به‌وسیله انواع موتورها که اغلب دیزلی هستند، تأمین می‌شود. موتورها دیزلی نیز ممکن است با پمپ هم محور باشند و یا در بعضی موارد برای افزایش دور پمپ نسبت به دور موتور از تسمه پروانه و پولی استفاده شود.

نحوه راه‌اندازی این‌گونه پمپها بدین صورت است که کاسه و لوله خرطومی از آب پر می‌شود، سوپاپ انتهای لوله از خروج آب جلوگیری می‌کند. سپس با روشن کردن موتور، پروانه پمپ به چرخش درمی‌آید و آب داخل کاسه پمپ در اثر نیروی گریز از مرکز به طرف دهانه خروجی رانده می‌شود. درکاسه پمپ تقریباً خلاء ایجاد می‌شود. اختلاف فشار ایجاد شده داخل کاسه پمپ و سطح آزاد آب باعث حرکت آب در چاه در لوله مکش پمپ می‌شود.

1- impeller
2- shaft
3- centrifugal pumps

ارتفاع مکش این‌گونه پمپها، چون خلاء ایجاد شده در کاسه پمپ کامل نیست، عموماً بیشتر از ۵ تا ۶ متر نیست ولی این پمپها قادرند آب را تا ارتفاعهای مختلف برسانند و عمل مکش و رانش را تواماً انجام دهند. با افزایش تعداد طبقات پمپ (اتصال سری) می‌توان آب را تا ارتفاع موردنظر انتقال داد.

از این‌گونه پمپها برای پمپاژ آب از چاههای نیمه عمیق یا دهانه گشاد که عمق سطح آب کم است استفاده می‌شود. این پمپها در ابعاد بسیار گوناگون و ظرفیتهای مختلف ساخته می‌شوند و علاوه بر پمپاژ چاههای نیمه‌عمیق برای آبکشی از رودخانه‌ها، انهار و دریاچه‌ها و همچنین در ایستگاههای پمپاژ خط انتقال آب مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۵-۵-۱-۲ پمپهای با محور قائم

ساختمان اینگونه پمپها مشابه پمپهای سرچاهی است با این تفاوت که محور پمپ عمودی است و در داخل آب و در عمق دلخواه قابل نصب است.

این پمپها نیز دو دسته هستند:

- پمپهای توربینی[1] شافت و غلاف‌دار.
- الکتروپمپهای شناور[2].

پمپهای توربینی شافت و غلاف‌دار

این پمپها از قسمتهای زیر تشکیل شده است:

- توربین
- سیستم انتقال نیرو و آب
- سر تخلیه
- توربین نیروی محرکه

توربین پمپ از بالا به پایین شامل گلویی، طبقات (کاسه و پروانه)، لوله مکش[3] و صافی[4] است.

-گلویی محل اتصال طبقات پمپ به لوله انتقال آب (کالمن[5]) است.

- توربین پمپ از چندین طبقه تشکیل شده که هر طبقه شامل کاسه و پروانه است. پروانه به شافت که نیروی محرکه را

1- turbine pumps

2- submersible pumps

3- suction pipe

4- strainer

5- column

به آن می‌رساند متصل است. پروانه‌ها معمولاً دو نوع ساخته می‌شوند باز و بسته (مطابق شکل ۵-۹ و ۵-۱۰). ظرفیت آبدهی پمپ را یک طبقه آن که معمولاً پایین‌ترین کاسه توربین را تشکیل می‌دهد، مشخص می‌کند و ارتفاع آبرسانی به تعداد طبقات توربین بستگی دارد. جنس کاسه‌ها عموماً چدنی و شکننده است و پروانه‌ها معمولاً از برنز ساخته می‌شود. مشخصات فنی هر طبقه پمپ توربینی به وسیله منحنی‌هایی که در آزمایشگاه کارخانه سازنده تهیه می‌شود معین می‌شود که به آن منحنی مشخصه پمپ می‌گویند. این منحنی‌ها شامل ارتفاع آبرسانی، قدرت مورد نیاز هر طبقه و راندمان پمپ در آبدهیهای مختلف است (شکل ۵-۱۱). میزان آبدهی و ارتفاع آبرسانی این پمپها در دورهای مختلف متفاوت است و معمولاً منحنی‌های مشخصه توربین را کارخانه‌های سازنده برای دورهای مختلف ارائه می‌کند. گاهی نیز منحنی‌های مشخصه برای اندازه‌های مختلف پروانه‌های توربین در نمودار واحدی نشان داده می‌شود (شکل ۵-۱۲).

سرعت چرخش پمپهای توربینی شافت و غلاف‌دار معمولاً ۱۴۶۰ و ۱۷۶۰ دور در دقیقه است.

به طوری که در شکل ۵-۱۱ مشاهده می‌شود این پمپ با ۱۷۶۰ دور در دقیقه برای آبدهی ۸۰لیتر بر ثانیه بیشترین بازده (۸۳٪) را دارد و در این شرایط ارتفاع آبرسانی هر طبقه پمپ ۹/۲ متر و قدرت مورد نیاز ۱۱/۸ اسب بخار است. اگر پمپ توربینی با سرعتی متفاوت با آنچه که برای آن طراحی شده به کار افتد، دیگر رابطه بین دور پمپ و ارتفاع کل به صورتی که در روی منحنی مشخصه آمده، نخواهد بود. آبدهی، ارتفاع آبرسانی و قدرت مورد نیاز پمپ در دورهای مختلف را می‌توان، با توجه به روابط زیر محاسبه کرد:

- آبدهی پمپ مستقیماً متناسب با دور پمپ است
- ارتفاع آبرسانی متناسب باتوان دوم دور پمپ است.
- قدرت مورد نیاز با توان سوم دور پمپ تغییر می‌کند.

مثلاً اگر پمپ فوق که در ۱۷۶۰ دور در دقیقه با راندمان ۸۳٪، ۸۰ لیتر بر ثانیه آب را به ارتفاع ۹/۲ متر پمپاژ می‌کند و توان لازم برای این کار ۱۱/۸ اسب بخار است، در ۱۴۶۰ دور در دقیقه به کار افتد، آبدهی، ارتفاع آبرسانی و قدرت مورد نیاز پمپ به شرح زیر محاسبه می‌شود:

آبدهی در ۱۴۶۰ دور در دقیقه $\rightarrow \frac{۱۴۶۰}{۱۷۶۰} \times ۸۰ = ۶۶ \text{ Lit/s}$

ارتفاع کل دینامیک[1] یک طبقه در ۱۴۶۰ دور در دقیقه $= \frac{۱۴۶۰^۲}{۱۷۶۰^۲} \times ۹/۲ = ۶/۳ \text{m}$

قدرت مورد نیاز در ۱۴۶۰ دور در دقیقه $= \frac{۱۴۶۰^۳}{۱۷۶۰^۳} \times ۱۱/۸ = ۶/۷۵ \text{ hp}$ اسب بخار

تعداد طبقات پمپ با تقسیم ارتفاع آبرسانی کل به ارتفاع آبرسانی هر طبقه به‌دست می‌آید. توربین پمپ عموماً با قطر اسمی و شماره پروانه مشخص می‌شود، قطر اسمی بر حسب اینچ است. معمولاً قطر لوله جدار چاه ۲ اینچ بیش از قطر اسمی توربین انتخاب می‌شود.

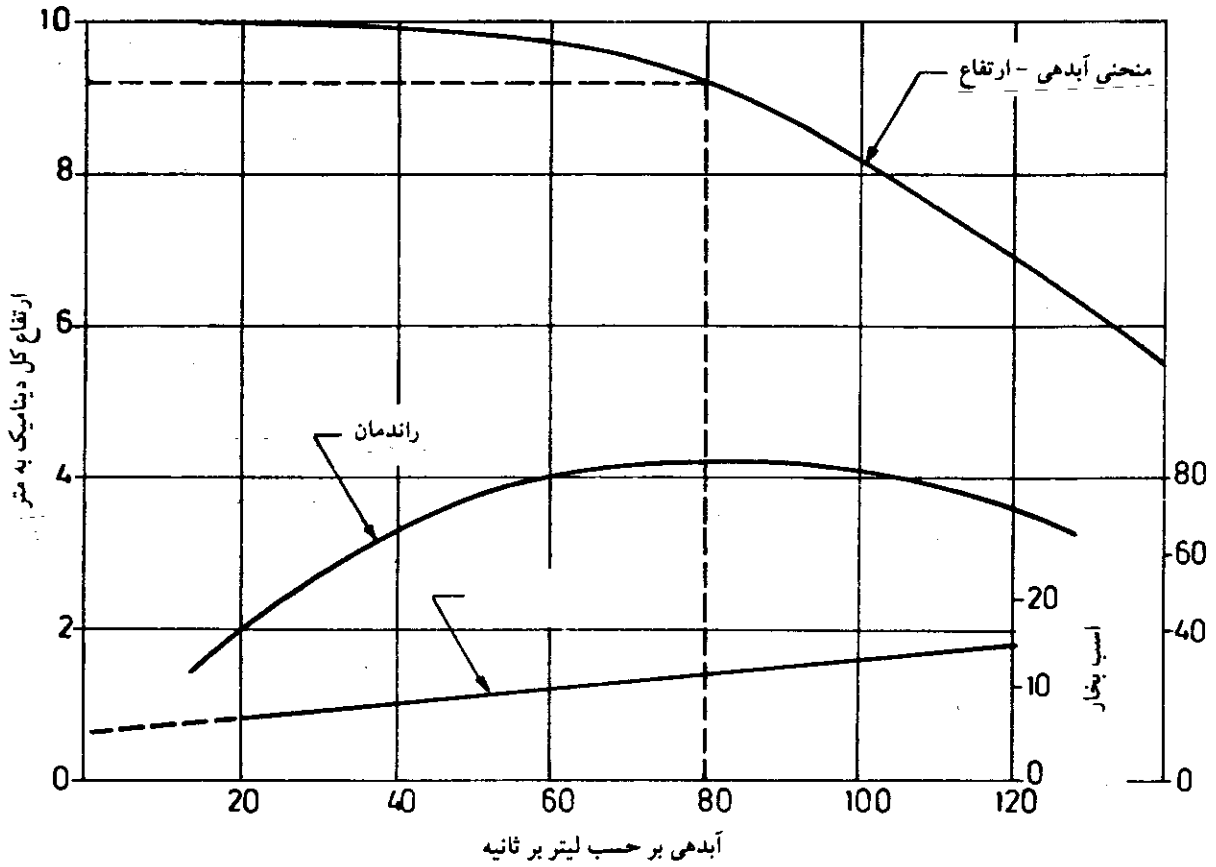
1- total dinamic head

لوله مکش[1]

این لوله نظیر کاسه پمپ از چدن ساخته می‌شود و در زیر طبقات پمپ قرار می‌گیرد و دارای یاطاقان برنجی بلندی است که قسمت انتهایی شافت ضد زنگ داخل توربین را نگاهداری می‌کند. کار لوله مکش هدایت آب به سمت توربین پمپ است.

صافی[2]

صافی دارای شکل مخروطی است و به انتهای لوله مکش وصل می‌شود. شبکه صافی از ورود مواد جامد و دانه‌درشت که پمپ قادر به تخلیه آنها نیست و به پروانه صدمه می‌زند، جلوگیری می‌کند.

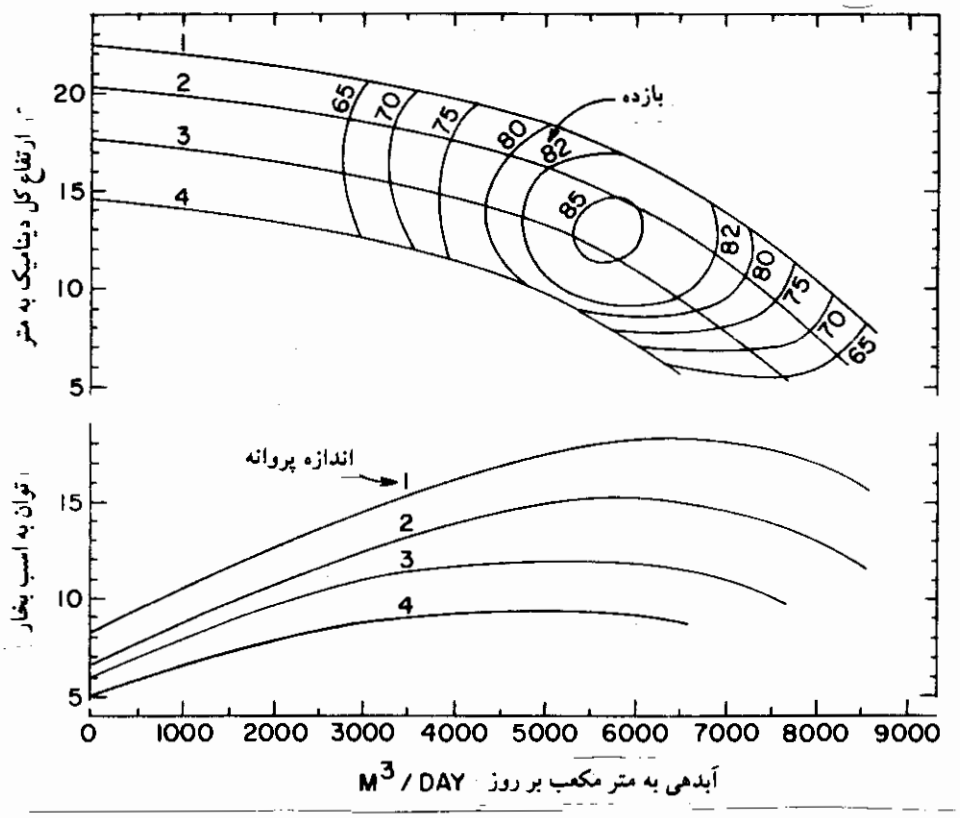


شکل ۵-۱۱- منحنی‌های مشخصه نمونه برای یک طبقه از پمپهای توربینی در ۱۷۶۰ دور در دقیقه

1- suction pipe

2- strainer

179-5-11-a



شکل ۵-۱۲- منحنی‌های مشخصه یک پمپ معین برای اندازه‌های مختلف پروانه در ۱۷۶۰ دور در دقیقه

سیستم انتقال نیرو و آب

این مجموعه شامل شافت، غلاف[1] و لوله‌های انتقال آب (کالمن) است.

شافت : شافت میله‌ای فولادی است که حرکت چرخشی را از جعبه دنده یا الکتروموتورقائم به پروانه‌ها منتقل می‌کند: طول هر بند شافت معمولاً ۱۰ فوت (حدود ۳ متر)است ، ولی طول شافتی که پروانه‌های توربین به آن متصل است، متفاوت بوده و معمولاً بیش از ۲۵ فوت (حدود ۷/۶ متر) نیست. شافتها به‌وسیله بوشن‌های فولادی که اصطلاحاً کوپلینگ شافت نامیده می‌شوند، به هم متصل می‌شوند. شافت از فولاد مقاومی تهیه می‌شود که مقاومت کافی در مقابل چرخش و کشش داشته باشد. قطر شافت با توجه به قدرت و عمق نصب پمپ بین $\frac{3}{4}$ تا ۴ اینچ متغیر است. عمل روانکاری[2] و خنک کردن شافت به دو صورت انجام می‌گیرد. در پمپ‌های غلافدار یا شافت بسته (شکل ۵-۹) این عمل به وسیله روغن و در پمپهای بدون غلاف یا شافت باز (شکل ۵-۱۰) به‌وسیله آب انجام می‌گیرد. استفاده از پمپهای غلافدار در چاههای عمیق بیشتر متداول است. از پمپهای بدون غلاف بیشتر در چاههای کم عمق استفاده می‌شود.

1- shaft tube

2- lubrication

179-5-12-0

معمولاً در چاههایی که تازه حفاری و تکمیل شده‌اند، اعم از بهره‌برداری و یا اکتشافی، آزمایش پمپاژ به وسیله پمپ‌های توربینی شافت و غلافدار مجهز به موتور دیزل انجام می‌شود. زیرا در اینگونه چاهها قبل از انجام آزمایش پمپاژ باید عمل توسعه و شستشو چاه صورت گیرد که مستلزم تغییر دور موتور است. قدرت آبکشی پمپ به تناسب آبدهی آبخوان و ارتفاع رانش تعیین می‌شود. برای این کار از انواع پمپهای با لوله آبده ۶ یا ۸ اینچ و در شرایطی که آبدهی چاه بیش از ۱۰۰ لیتر بر ثانیه برآورد شود از پمپ ۱۰ اینچ استفاده می‌شود.

۳-۲ وسایل اندازه‌گیری

مهمترین قسمت در یک آزمایش پمپاژ، اندازه‌گیریهای تغییرات سطح آب در پیزومترها و چاه پمپاژی و اندازه‌گیری بده چاه است. این اندازه‌گیریها باید به دفعات زیاد و با حداکثر دقت در حین آزمایش انجام شود. زیرا این دو عامل پایه و اساس تمام محاسبات پمپاژ برای به‌دست آوردن ضرایب هیدرودینامیک آبخوان و ضرایب هیدرولیکی چاه هستند. بنابراین برای انجام صحیح و دقیق این اندازه‌گیریها باید پیش‌بینی‌های لازم قبل از شروع پمپاژ به‌عمل آید. لوازم و تجهیزاتی که برای این اندازه‌گیریها مورد نیاز است عبارتند از وسایل اندازه‌گیری آبدهی و وسایل اندازه‌گیری سطح آب.

۳-۲-۱ وسایل اندازه‌گیری آبدهی

برای اندازه‌گیری آبدهی چاه در هنگام آزمایشهای پمپاژ از وسائل مختلفی استفاده می‌شود که مناسب‌ترین آنها "روزنه[1]" است، زیرا علاوه بر دقت کافی در تعیین میزان آبدهی چاه، با مشاهده ارتفاع آب در لوله روزنه و استفاده از جداول استاندارد شده، آبدهی آزمایش (Q) را درهر لحظه می‌توان مشخص کرد. بنابراین نصب روزنه بر روی لوله خروجی پمپهای آزمایشی الزامی است. در صورتی‌که آزمایش پمپاژ به‌طور موردی و با استفاده از موتور پمپ نصب شده بر روی چاه انجام شود، چنانچه روزنه در دسترس نباشد می‌توان از وسایل دیگری مانند خط‌کش جت یا روش حجمی آبدهی چاه را برآورد کرد. اکنون روشهای مختلف اندازه‌گیری آبدهی شرح داده می‌شود.

۳-۲-۱-۱ روش حجمی

بهترین روش اندازه‌گیری آبدهی چاه در صورت امکان، استفاده از شمارنده (کنتور) حجمی مجهز به وسیله اندازه‌گیری آبدهی لحظه‌ای است. ساختمان شمارنده‌ها متفاوت است و اغلب آنها حجم آب عبوری را به طور تجمعی نشان می‌دهد (شبیه کنتور آب منازل). ولی در آزمایشهای پمپاژ اندازه‌گیری مداوم آبدهی لحظه‌ای چاه، در طول آزمایش موردنظر است. بنابراین باید از انواع شمارنده‌هایی که آبدهی لحظه‌ای را نشان می‌دهند استفاده شود. در بعضی موارد این شمارنده‌ها مجهز به دستگاه ثبات هستند که برای کنترل تغییرات آبدهی در طول مدت آزمایش مفید

1- orifice

غلاف : غلاف لوله‌ای است که شافت در آن قرار گرفته و از فولاد مخصوصی ساخته می‌شود. طول هر بند غلاف نیز ۱۰ فوت است که به کمک بوشن‌های برنجی به هم متصل می‌شود. این بوشن‌های برنجی، شافت را نیز در وسط غلاف نگه می‌دارند. پایین‌ترین قسمت غلاف به وسیله کاسه نمد عایق‌بندی می‌شود تا از خروج روغن داخل غلاف جلوگیری کند. در مجاورت کاسه نمد مجرای باریکی تعبیه شده که مقدار ناچیزی روغن از آن به داخل چاه می‌ریزد. این عمل از غلیظ شدن و کثیف شدن روغن جلوگیری می‌کند. در صورتی که کاسه نمد فوق به‌خوبی طراحی نشده باشد ورود روغن به چاه از حد معمول بیشتر شده که موجب آغشته شدن آب استخراجی با روغن می‌شود. غلاف به‌وسیله گیره‌های سه‌پایه متشکل از لاستیک فشرده (به نام اسپایدر) در وسط لوله کالمن ثابت نگه داشته می‌شود.

سر تخلیه[1]

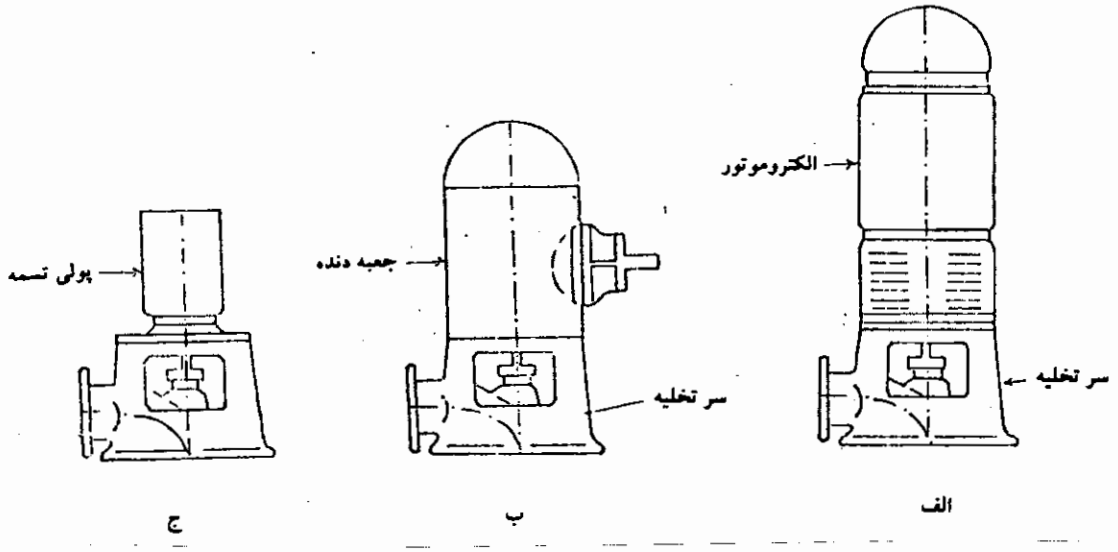
لوله‌های کالمن در بالا به سر تخلیه متصل می‌شود و در نتیجه تمام وزن پمپ و لوله‌های کالمن به وسیله آن تحمل می‌شود. سرتخلیه در سطح زمین عموماً بر روی فونداسیون بتونی قرار می‌گیرد. حرکت آب در داخل سرتخلیه از حالت قائم در یک مسیر زانویی شکل به حالت افقی تبدیل می‌شود و از لوله تخلیه خارج می‌شود. شافت از وسط سرتخلیه عبور می‌کند و به جعبه دنده یا مستقیماً به الکتروموتور قائم متصل می‌شود. ابعاد سر تخلیه معمولاً با ۳ رقم مشخص می‌شود (مثلاً ۱۲″ ×۶″ ×۶″)، که این ارقام به ترتیب از سمت چپ قطر ورودی، قطر خروجی و تکیه‌گاه جعبه دنده یا الکتروموتور قائم را برحسب اینچ نشان می‌دهد.

نیروی محرکه

نیروی محرکه پمپهای توربینی شافت و غلافدار معمولاً به‌وسیله الکتروموتور و یا موتورهای دیزل تامین می‌شود. کاربرد الکتروموتورها به دو صورت عمودی و یا افقی است.

- الکتروموتورهای عمودی بر روی سرتخلیه نصب و محور پمپ (شافت) مستقیماً به الکتروموتور متصل می‌شود. در این حالت دور پمپ معادل دور الکتروموتور خواهد بود. معمولاً پمپهایی که با ۱۴۶۰ دور در دقیقه کار می‌کنند مجهز به الکتروموتور عمودی‌اند.
- الکتروموتورهای افقی و موتورهای دیزل مستقیماً با محور پمپ درگیر نیستند و نیروی محرکه آنها از طریق میل گاردن و جعبه دنده یا تسمه و پولی به محور پمپ منتقل می‌شود و معمولاً دور پمپ بیش از دور الکتروموتور و یا موتور دیزل است که بستگی به نسبت تبدیل جعبه دنده و یا اختلاف قطر پولی‌ها دارد (شکل ۵-۱۳)

1- discharge head



شکل ۵-۱۳

الف - الکتروموتور قائم که مستقیماً روی سرتخلیه نصب شده‌است.

ب - جعبه دنده که نیروی محرکه موتور را به محور پمپ منتقل می‌کند

ج - پولی که به تسمه نیروی محرکه موتور را به محور پمپ منتقل می‌کند.

جعبه دنده وسیله‌ای است که نیروی الکتروموتور افقی یا موتور دیزلی را از طریق میل گاردان به شافت منتقل می‌کند. در این وسیله با استفاده از چرخ دنده افقی و قائم حرکت دورانی افقی موتور به حرکت دورانی قائم محور پمپ تبدیل می‌شود. اختلاف قطر چرخ دنده‌ها، نسبت دور موتور به دور پمپ را تعیین می‌کند که آن را نسبت تبدیل می‌گویند. نسبت تبدیل جعبه دنده‌ها ممکن است ۵:۶، ۳:۴ ، ۲:۳ و ۱:۱ باشد.

در ایران معمولاً نسبت تبدیل جعبه دنده‌ها ۵ به ۶ است که به ازای هر ۵ دور چرخش محور موتور، محور پمپ ۶ دور می‌چرخد. بنابراین اگر با این جعبه دنده سرعت چرخش موتور ۱۵۰۰ دور در دقیقه باشد، چرخش محور پمپ ۱۸۰۰ دور در دقیقه خواهد بود. جعبه دنده‌ها با ابعاد و قدرتهای انتقال مختلف ساخته می‌شوند و باید متناسب با قدرت موردنیاز انتخاب شوند.

برای خنک کردن جعبه دنده یک لوله جریان آب ورودی به جعبه دنده پیش‌بینی شده‌است. هنگام نصب جعبه دنده به سرتخلیه، لوله خروجی چاه باید طوری نصب شود که جریان آب در جدار جعبه دنده به سهولت برقرار شود. برخی از جعبه دنده‌ها نیز به وسیله پروانه‌ای که در بالای آنها تعبیه شده خنک می‌شوند و به گردش آب نیازی ندارند.

محفظه چرخ دنده ها در جعبه دنده از روغن مخصوصی پر شده است که پس از یک دوره معین بهره‌برداری طبق دستورالعمل کارخانه تعویض می‌شود. در بالای جعبه دنده‌ها یا بر روی الکتروموتورهای قائم پیچی معروف به پیچ تنظیم (پیچ رگلاژ) وجود دارد که با استفاده از آن شافت پمپ بالا و پایین رفته و موقعیت پروانه‌ها در کاسه پمپ تنظیم می‌شود، به طوری که به راحتی و بدون اصطکاک در داخل کاسه چرخش داشته باشد.

پمپ‌های شناور

این‌گونه پمپ‌ها از یک الکتروموتور و چند طبقه توربین تشکیل شده که در داخل آب قرار می‌گیرند. الکتروموتور در پائین‌ترین قسمت آخرین طبقه پمپ قرار گرفته است و جریان الکتریکی از سرچاه به‌وسیله کابل به الکتروموتور منتقل می‌شود. ساختمان پمپهای شناور تا حدودی همانند پمپ‌های توربینی شافت و غلافدار است. با این تفاوت که فاقد شافت است. محل ورود آب به این‌گونه پمپ‌ها بالای الکتروموتور و زیرتوربین (صافی) واقع است. این پمپ‌ها دارای پروانه‌ایست که با سرعت زیاد در داخل کاسه می‌چرخد و در اثر چرخش پروانه آب داخل پمپ تحت نیرو گریز از مرکز، در داخل لوله بالا می‌رود.

استفاده از پمپ‌های شناور در قیاس با پمپ‌های شافت و غلاف‌دار دارای مزایای زیر است:

- در صورت وجود انحراف در چاه و لوله جدار چنانچه از پمپ‌های شافت و غلاف‌دار استفاده شود ممکن است شافت در اصطکاک با غلاف سائیده شده و پس از مدتی بریده شود. بنابراین استفاده از پمپ‌های شناور که بدون شافت و غلاف است، مقرون به صرفه خواهد بود.
- پمپ‌های شناور نسبت به پمپ‌های شافت و غلاف‌دار ارزان بوده و بهره‌برداری از آنها آسانتر است و نیازی به ایجاد تأسیسات و تجهیزات زیاد از قبیل جعبه‌دنده، موتورخانه و غیره ندارد.
- چون پمپهای شناور فاقد شافت و غلاف است، آب خارج شده از چاه آغشته به روغن نیست. در چاههایی که مصارف شرب دارند، معمولاً از پمپهای شناور باید استفاده کرد.

ولی از معایب پمپ‌های شناور نسبت به پمپ‌های توربینی این است که چون الکتروموتور در داخل آب قرار گرفته است، در صورت وجود اشکال در آن بایستی آنرا از چاه بیرون کشیده و تعمیر کرد. این امر سبب صرفه هزینه بیشتری نسبت به پمپ‌های توربینی می‌شود.

۵-۵-۲ انتخاب پمپ و تعیین قدرت موتور

برای انتخاب پمپ مناسب و تعیین قدرت موتور، اطلاعات دقیقی در موارد زیر باید در دست باشد:

۵-۵-۲-۱میزان بده بهره‌برداری از چاه : آبدهی چاه براساس مقدار آب مورد نیاز تعیین می‌شود. اما در هر حال باید کمتر از آبدهی بحرانی باشد. آبدهی بحرانی براساس نتایج تحلیل آزمایشهای افت پله‌ای تعیین می‌شود که قبلاً مورد بحث قرار گرفت.

۵-۵-۲-۲عمق سطح آب قبل از شروع پمپاژ (عمق سطح استاتیک)

۵-۵-۲-۳افت سطح آب در چاه به ازای آبدهی مورد نظر که براساس آزمایشهای افت پله‌ای (منحنی مشخصه چاه) تعیین می‌شود (عمق سطح دینامیک).

۵-۵-۲-۴ارتفاع صعود آب از سطح زمین تا محل تخلیه یا ذخیره آن در مخزن.

۵-۵-۲-۵نوسانات فصلی، سالانه و بلندمدت سطح ایستابی یا پیزومتریک که براساس مطالعات منطقه‌ای و با اندازه‌گیری منظم سطح آب در چاههای مشاهده‌ای قابل محاسبه است.

۵-۵-۲-۶پیش‌بینی نیازهای آینده

۵-۵-۲-۷قطر داخلی لوله جداری که پمپ در آن قرار می‌گیرد.

۵-۵-۲-۸میزان انحراف چاه از حالت مستقیم و شاغولی

۵-۵-۲-۹عمق چاه

۵-۵-۲-۱۰ کیفیت آب چاه (از نظر خورندگی و پوسته‌گذاری[1])

برای انتخاب پمپ و موتور ارتفاع کل دینامیک[2] باید در حد ممکن به دقت تعیین شود.

ارتفاع کل دینامیک به صورت زیر بیان می‌شود:

$$h_t = h_e + h_f + h_v \qquad (۸-۵)$$

که در آن :

h_t = ارتفاع کل دینامیک به متر

h_e = مجموع رانش قائم آب از سطح در حال پمپاژ (سطح دینامیک) در چاه تا نقطه تخلیه به متر

h_f = تلفات ناشی از اصطکاک آب در لوله‌ها، اتصالات، شیرها و غیره برحسب ارتفاع آب و به متر

h_v = بار سرعت[3] در لوله تخلیه بر حسب ارتفاع آب و به متر (بار لازم برای ایجاد جریان)

1- incrustation

2- total dynamic head

3- velociy head

در حالتی که آب چاه مستقیماً وارد شبکه توزیع شود، h_e عبارتست از مجموع فاصله قائم از سطح دینامیک در چاه تا سطح زمین به اضافه بار هیدرواستاتیک لازم در سر چاه. به علاوه چنانکه قبلاً گفته شد باید نوسانات سطح آب، تأثیر چاههای مجاور و نیازهای آینده را در نظر گرفت.

برای تعیین مجموع تلفات ناشی از اصطکاک (h_f) جداول و نمودارهایی وجود دارد که مقادیر افت انرژی را در شرایط مختلف تعیین می‌کنند. به منظور سهولت انجام کار و با توجه به اینکه تجربه نشان داده است که مجموع تلفات ناشی از عامل اصطکاک معمولاً کمتر از ۵ درصد ارتفاع پمپاژ در چاههای آب است، افت فشار ناشی از تلفات در کلیه اجزاء پمپها را بین ۳ تا ۴ درصد ارتفاع پمپاژ می‌توان در نظر گرفت.

بار سرعت (h_v) از رابطه $\frac{v^2}{2g}$ به دست می‌آید که در آن v سرعت آب و g شتاب گرانش است. مقدار v معمولاً کم و قابل صرف‌نظر کردن است. مثلاً اگر سرعت آب را ۲ متر بر ثانیه در نظر بگیریم (که معمولاً بیش از این مقدار نیست)، بار سرعت فقط ۰/۲ متر خواهد بود. بار سرعت تنها در تأسیساتی که مقدار آبدهی زیاد و ارتفاع رانش و بار هیدرواستاتیک خیلی کم باشد، در نظر گرفته می‌شود.

در پمپهای توربینی، که پمپهای با بده متغیر نامیده می‌شوند، وقتی سرعت پمپ ثابت است، با افزایش ارتفاع کل دینامیک (h_t)، مقدار بده (Q) کاهش می‌یابد. در یک سرعت معین Q تقریباً با عرض و قطر پروانه و h_t با توان دوم قطر پروانه متناسب است. در پمپهای توربینی قطر پروانه به وسیله قطر لوله جدار محدود می‌شود. بنابراین ارتفاع رانش یک طبقه پمپ مقداریست محدود و برای افزایش دادن ارتفاع آبرسانی در چاهها الزاماً باید تعداد طبقات پمپها را افزایش داد.

اکثر کارخانه‌های پمپ‌سازی منحنی پمپها را براساس قطر پروانه طراحی شده ارائه می‌کنند. این منحنی‌ها برای یک طبقه ترسیم شده‌اند و براساس اطلاعات مربوط به تغییرات آبدهی قابل استحصال در مقابل ارتفاع کل دینامیک، تغییرات راندمان پمپ و قدرت مورد نیاز در آبدهی موردنظر تهیه شده‌اند (شکل ۵-۱۲). بنابراین منحنی انتخاب شده در یک پمپ معین آبدهی موردنظر را برای ارتفاع کل دینامیک در بالاترین راندمان ممکن مشخص می‌کند.

همانگونه که قبلاً بیان شد ارتفاع کل دینامیک در اثر تغییرات فصلی، سالانه و بلندمدت سطح آب و اثر ناشی از بهره‌برداری چاههای مجاور، تغییر می‌کند. بنابراین در شرایطی که نوسانات سطح آب زیاد باشد، بایستی پمپی را که انتخاب می‌کنیم، منحنی تغییرات آبدهی - ارتفاع آن دارای شیب نسبتاً زیادی باشد تا در شرایط مختلف آبدهی و ارتفاع آبرسانی کارایی لازم را داشته باشد. در این صورت قدرت مورد نیاز نسبت به تغییرات ارتفاع آبرسانی ممکن است ثابت بماند و یا دارای تغییرات جزیی باشد.

توان یا قدرتی که برای به کار انداختن یک پمپ برای آبدهی (Q) و ارتفاع کل دینامیک (h_t) مورد نظر لازم است، توان روی محور (bhp)[1] نامیده می‌شود. این قدرتی است که باید به شافت داده شود تا بتواند پمپ را برای کار موردنظر به چرخش در آورد. قدرت یاتوان داده شده به شافت بیشتر از قدرت گرفته شده از پمپ یا توان مفید پمپ است. توان مفید را برحسب مقدار آبی که پمپ قادر است در واحد زمان به ارتفاع معین بالا ببرد، بیان می‌کنند (whp)[2] باتوجه به اینکه اسب بخار متریک برابر ۷۵ kgm/s است، بنابراین whp به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$whp = \frac{Q.ht}{۰/۰۷۵\times۸۶۴۰۰} \qquad (۹-۵)$$

که در آن Q بده پمپاژ برحسب متر مکعب بر روز (m^3/day) و ht ارتفاع کل دینامیک برحسب متر است. اگر Q برحسب لیتر بر ثانیه باشد، فرمول (۵-۹) به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$whp = \frac{Q.ht}{۷۵} \qquad (۱۰-۵)$$

چون هیچ ماشینی دارای بازده (راندمان) ۱۰۰ درصد نیست، بنابراین به علت اصطکاک و دیگر تلفات انرژی در داخل پمپ، whp همیشه کمتر از bhp است. نسبت whp به bhp را بازده یا راندمان پمپ (E_p) می‌گویند:

$$E_p = \frac{whp}{bhp} \qquad (۱۱-۵)$$

بازده پمپ را معمولاً به صورت درصد بیان می‌کنند. پمپهای توربینی در شرایط کارکرد خوب دارای بازده حدود ۸۰ درصد می‌باشند، ولی به علت فرسودگی، گرفتگی و کارکرد پمپ با مقادیر Q و h_t غیربهینه، معمولاً بازده آنها کمتر است.

به این ترتیب توان لازم برای به کارانداختن پمپ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$bhp = \frac{Q\ (lit/s)\times h_t(m)}{۷۵\times E_p} \qquad (۱۲-۵)$$

در پمپهای پروانه‌ای با دور معین مقدار راندمان ثابت نیست و با تغییر مقدار Q و h_t مقدار E_p تغییر می‌کند. حداکثر راندمان پمپ فقط با ترکیب خاصی از Q و h_t به دست می‌آید که خود تابعی از شکل و طرح پروانه و کاسه آن است. با استفاده از منحنی مشخصه پمپ‌ها (شکل‌های ۵-۱۱ و ۵-۱۲) می‌توان پمپهایی برای شرایط مورد نظر با حداکثر بازدهی انتخاب کرد.

1- brake horse power

2- water horse power

با توجه به کاهش راندمان پمپ بر اثر فرسودگی و عوامل دیگر، نوسانات فصلی و سالانه سطح آب، پوسته‌گذاری در لوله‌های جدار و اجزاء پمپ، کارکرد موتور در شرایط دما و فشار هوای نامناسب و عوامل دیگر، برای اطمینان بیشتر از کارکرد بلندمدت موتور معمولاً لازم است قدرت محاسبه شده به روش فوق حدود ۱۰ تا ۲۵ درصد بیشتر در نظر گرفته شود (برحسب آنکه الکتروموتورهای قائم یا افقی و یا موتورهای دیزلی همراه با میل گاردان و جعبه دنده و یا تسمه پروانه مورد استفاده قرار گیرد).

محاسبه قدرت موتورها به روش توضیح داده شده در فوق ممکن است کاملاً بر قدرت موتورهای موجود در بازار منطبق نباشد. در این صورت باید موتوری انتخاب شود که اولاً قدرت آن بیش از قدرت محاسبه شده باشد و در ثانی دارای نزدیکترین قدرت به قدرت موردنظر باشد.

پیوست ۱

جدولهای اندازه گیری آبدهی در چاهها

جدول ۱- میزان آبدهی با روزنه

ارتفاع به اینچ	اریفیس 3"		اریفیس 4"		اریفیس 5"		اریفیس 6"		اریفیس 7"	اریفیس 8"	اریفیس 9"	اریفیس 10"
	لوله 4"	لوله 6"	لوله 6"	لوله 8"	لوله 6"	لوله 8"	لوله 8"	لوله 10"	لوله 10"	لوله 10"	لوله 12"	لوله 12"
5	6.30	4.80	9.15	8.85	17.65	13.95	24.00	20.20			52	69
5.5	6.60	5.00	9.65	9.15	18.50	14.50	24.90	21.00			54	73
6	6.80	5.20	10.10	9.45	19.20	15.10	25.70	21.80			56	76
6.5	7.00	5.35	10.55	9.80	20.00	15.80	26.50	22.60			59	79
7	7.25	5.55	10.85	10.10	20.70	16.40	27.30	23.30			61	82
7.5	7.50	5.75	11.30	10.40	21.40	17.05	28.00	24.20			63	85
8	7.70	5.95	11.65	10.75	22.10	17.65	28.90	24.90	38	59	65	88
8.5	7.85	6.05	12.00	11.05	22.80	18.25	29.70	25.70	39	61	67	91
9	8.10	6.25	12.30	11.35	23.50	18.80	30.50	26.50	40	63	69	93
9.5	8.20	6.45	12.60	11.65	24.20	19.40	31.30	27.30	41	64	70	96
10	8.40	6.55	12.95	12.00	24.80	19.95	32.10	28.10	42	66	72	98
10.5	8,65	6.75	13.25	12.30	25.40	20.45	32.90	28.90	43	67	74	101
11	8.85	6.80	13.55	12.60	26.00	20.80	33.60	29.70	44	68	76	103
11.5	9.00	7.00	13.90	12.85	26.60	21.35	34.40	30.30	45	69	77	105
12	9.20	7.20	14.20	13.15	27.20	21.80	35.10	30.90	46	71	79	108

توضیح : میزان آبدهی در این جدول لیتر در ثانیه میباشد

ادامه جدول ۱- میزان آبدهی با روزنه

ارتفاع به اینچ	3" اریفیس		4" اریفیس		5" اریفیس		6" اریفیس		7" اریفیس	8" اریفیس	9" اریفیس	10" اریفیس
	لوله 4"	لوله 6"	لوله 6"	لوله 8"	لوله 6"	لوله 8"	لوله 8"	لوله 10"	لوله 10"	لوله 10"	لوله 12"	لوله 12"
12.5	9.40	7.30	14.50	13.40	27.70	22.30	35.80	31.50	47	72	81	110
13	9.55	7.45	14.75	13.65	28.20	22.80	36.50	32.20	48	73	82	112
13.5	9.70	7.65	15.10	13.80	28.80	23.30	37.20	32.80	49	74	84	114
14	9.90	7.75	15.35	14.15	29.30	23.70	37.80	33.40	49.50	75	85	116
14.5	10.05	7.95	15.60	14.30	29.80	24.20	38.40	34.10	50	76	87	118
15	10.20	8.10	15.80	14.60	30.30	24.60	39.00	34.70	51	78	88	120
15.5	10.35	8.20	16.05	14.75	30.80	25.00	39.60	35.30	52	79	90	122
16	10.55	8.35	16.20	15.00	31.20	25.40	40.20	35.80	53	80	91	124
16.5	10.75	8.45	16.45	15.20	31.70	25.70	40.70	36.40	54	81	92	126
17	10.85	8.60	16.65	15.45	32.20	26.10	41.30	37.00	54.50	82	93	128
17.5	11.05	8.70	16.90	15.70	32.60	26.50	41.80	37.50	55	83	95	130
18	11.25	8.85	17.10	15.90	33.10	26.80	42.40	38.10	56	84	96	132
18.5	11.35	8.95	17.35	16.15	33.40	27.30	43.00	38.60	57	85	97	134
19	11.55	9.10	17.55	16.35	33.80	27.60	43.50	39.10	57.5	86	98	135
19.5	11.70	9.20	17.80	16.60	34.20	28.00	44.10	39.60	58	88	100	137

توضیح : میزان آبدهی در این جدول لیتر در ثانیه میباشد

ارتفاع به اینچ	اریفیس 3"		اریفیس 4"		اریفیس 5"		اریفیس 6"		اریفیس 7"	اریفیس 8"	اریفیس 9"	اریفیس 10"
	لوله 4"	لوله 6"	لوله 6"	لوله 8"	لوله 6"	لوله 8"	لوله 8"	لوله 10"	لوله 10"	لوله 10"	لوله 12"	لوله 12"
20	11.80	9.35	18.00	16.80	34.60	28.35	44.65	40.15	59	89	101	139
20.5	12.00	9.45	18.25	17.05	34.95	28.70	45.25	40.60	60	90	102	141
21	12.10	9.60	18.45	17.25	35.35	29.05	45.80	41.00	60.50	91	103	143
21.5	12.30	9.70	18.60	17.35	35.70	29.35	46.40	41.45	61	92	105	144
22	12.45	9.85	18.85	17.60	36.10	29.65	46.95	41.70	62	93	106	146
22.5	12.55	9.95	19.05	17.80	36.45	30.00	47.45	42.35	62.50	94	107	148
23	12.70	10.10	19.25	18.00	36.85	30.20	47.95	42.80	63	95	108	149
23.5	12.80	10.20	19.40	18.20	37.25	30.55	48.45	43.20	64	96	109	150
24	12.95	10.39	19.55	18.35	37.60	30.80	48.95	43.65	64.50	96.50	110	152
24.5	13.10	10.40	19.80	18.55	38.00	31.05	49.45	44.10	65	97	111	154
25	13.25	10.55	20.00	18.75	38.35	31.30	49.90	44.45	66	98	112	155
25.5	13.40	10.65	20.20	18.95	38.75	31.55	50.35	45.00	66.50	99	113	157
26	13.50	10.80	20.40	19.10	39.10	31.80	50.80	45.45	67	100	114	159
26.5	13.65	10.90	20.55	19.25	39.50	32.05	51.25	45.85	68	101	115	160
27	13.80	11.00	20.75	19.45	39.90	32.30	51.60	46.05	68	102	116	161

توضیح : میزان آبدهی در این جدول لیتر در ثانیه میباشد

ادامه جدول ۱- میزان آبدهی با روزنه

ارتفاع به اینچ	3" اریفیس		4" اریفیس		5" اریفیس		6" اریفیس		7" اریفیس	8" اریفیس	9" اریفیس	10" اریفیس
	لوله 4"	لوله 6"	لوله 6"	لوله 8"	لوله 6"	لوله 8"	لوله 8"	لوله 10"	لوله 10"	لوله 10"	لوله 12"	لوله 12"
27.5	13.95	11,10	20.95	19.60	40.25	32.55	52.05	46.75	69	102.50	117	163
28	14.00	11.15	21.15	19.80	40.65	32.80	52.45	47.15	69.50	103.50	118	165
28.5	14.15	11.30	21.25	20.00	41.00	33.15	52.90	47.60	70	104.50	119	166
29	14.25	11.35	21.45	20.20	41.40	33.30	53.25	47.95	71	105.50	120	167
29.5	14.40	11.50	21.65	20.40	41.75	33.35	53.70	48.40	71.5	106	121	168
30	14.50	11.55	21.85	20.50	42.15	33.80	54.05	48.80	72	107	122	170
30.5	14.65	11.65	21.95	20.70	42.55	34.05	54.45	49.20	73	108	123	171
31	14.85	11.75	22.15	20.80	42.90	34.35	54.85	49.60	73.50	109	124	172
31.5	14.90	11.85	22.35	21.00	43.30	34.60	55.25	50.05	74	110	125	174
32	15.05	11.95	22.55	21.15	43.65	34.85	55.65	50.40	74.50	110.5	126	175
32.5	15.15	12.05	22.70	21.35	43.85	35.10	56.10	50.85	75	111.50	127	177
33	15.25	12.10	22.90	21.45	44.35	35.35	56.45	51.25	76	113	129	178
33.5	15.40	12.25	23.10	21.60	44.75	35.60	56.85	51.60	76.50	113.50	129.50	180
34	15.50	12.30	23.30	21.75	45.10	35.85	57.25	51.80	76.50	114	130	181
34.5	15.65	12.35	23.45	21.90	45.45	36.10	57.60	52.35	77.50	115	131	183

توضیح : میزان آبدهی در این جدول لیتر در ثانیه میباشد

ادامه جدول ۱ - میزان آبدهی با روزنه

ارتفاع به اینچ	3"	اریفیس	4"	اریفیس	5"	اریفیس	6"	اریفیس	7" اریفیس	8" اریفیس	9" اریفیس	10" اریفیس
	لوله 4"	لوله 6"	لوله 6"	لوله 8"	لوله 6"	لوله 8"	لوله 8"	لوله 10"	لوله 10"	لوله 10"	لوله 12"	لوله 12"
35	15.75	12.45	23.65	22.00	45.80	36.35	58.00	52.75	78	116	132	184
35.5	15.90	12.50	23.80	22.15	46.20	36.60	58.35	53.20	78.50	117	132.5	185
36	16.05	12.60	24.00	22.35	46.50	36.85	58.75	53.45	79	118	133	187
36.5	16.15	12.70	24.15	22.45	46.90	37.10	59.10	53.75	79.50	119	134	188
37	16.20	12.80	24.30	22.60	47.20	37.35	59.50	54.10	80	119.5	135	189
37.5	16.35	12.85	24.50	22.70	47.60	37.60	59.90	54.40	80.50		135.50	191
38	16.40	12.95	24.60	22.90	47.90	37.85	60.05	54.70	81		136	193
38.5	16.55	13.00	24.80	23.05	48.30	38.10	60.65	55.00	81.50		137	194
39	16.60	13.10	25.00	23.15	48.60	38.35	61.00	55.35	82		138	195
39.5	16.70	13.20	25.10	23.30	48.95	38.60	61.45	55.65	82.50		138.50	196
40	16.80	13.25	25.30	23.40	49.30	38.85	61.80	55.95	83		139	197
40.5	16.85	13.30	25.45	23.55	49.60	39.10	62.15	56.20	83.50		140	198
41	16.95	13.40	25.60	23.65	49.85	39.35	62.50	56.55	83.65		141	199
41.5	17.10	13.45	25.75	23.85	50.15	39.65	62.85	56.85	84.20		142	201
42	17.15	13.50	25.95	24.00	50.50	39.80	63.20	57.15	84.60		142.50	202

توضیح : میزان آبدهی در این جدول لیتر در ثانیه میباشد

ادامه جدول ۱- میزان آبدهی با روزنه

ارتفاع به اینچ	3" اریفیس		4" اریفیس		5" اریفیس		6" اریفیس		7" اریفیس	8" اریفیس	9" اریفیس	10" اریفیس
	لوله 4"	لوله 6"	لوله 6"	لوله 8"	لوله 6"	لوله 8"	لوله 8"	لوله 10"	لوله 10"	لوله 10"	لوله 12"	لوله 12"
42.5	17.30	13.65	26.05	24.10	50.80	40.05	63.55	57.40	85		143.50	203
43	17.35	13.70	26.20	24.25	51.10	40.30	63.55	57.75	85.50		144	204
43.5	17.50	13.75	26.40	24.35	51.45	40.50	64.25	58.05	86		145	205
44	17.55	13.80	26.50	24.50	51.75	40.70	64.55	58.35	86.50		146	206
44.5	17.65	13.90	26.65	24.60	52.00	40.95	64.95	58.60	87		147	207
45	17.75	14.00	26.80	24.75	52.25	41.15	65.25	58.95	87.50		147.50	208
45.5	17.85	14.05	26.95	24.85	52.50	41.40	65.60	59.25	88		148	209
46	17.90	14.15	27.05	25.00	52.80	41.60	65.95	59.55	88.50		149	210
46.5	18.00	14.20	27.25	25.20	53.15	41.85	66.30	59.80	89		150	211
47	18.10	14.30	27.40	25.30	53.45	42.00	66.65	60.15	89.50		150.50	212
47.5	18.25	14.40	27.60	25.45	53.70	42.20	67.00	60.45	90		151	214
48	18.30	14.45	27.75	25.55	53.95	42.40	67.35	60.75	90.50		152	215
48.5	18.40	14.50	27.90	25.70	54.20	42.65	67.70	61.00	91		153	216
49	18.50	14.60	28.00	25.80	54.45	42.85	68.00	61.35	91.50		153.50	217
[illegible]	18.55	14.65	28.15	25.95	54.80	43.10	68.40	61.65	92		154	218

توضیح : میزان آبدهی در این جدول لیتر در ثانیه میباشد.

ادامه جدول ۱ - میزان آبدهی با روزنه

ارتفاع به اینچ	3"	اریفیس	4"	اریفیس	5"	اریفیس	6"	اریفیس	7" اریفیس	8" اریفیس	9" اریفیس	10" اریفیس
	لوله 4"	لوله 6"	لوله 6"	لوله 8"	لوله 6"	لوله 8"	لوله 8"	لوله 10"	لوله 10"	لوله 10"	لوله 12"	لوله 12"
50	18.70	14.75	28.25	26.05	55.00	43.30	68.70	61.95	20.20		155	219
50.5	18.80	14.85	28.40	26.20	55.30	43.55	69.10	62.20	92.70		155.5	220
51	18.95	14.90	28.60	26.30	55.55	43.75	69.40	62.55	93.15		156	221
51.5	19.00	14.95	28.70	26.45	55.80	44.00	69.75	62.85	93.65		157	223
52	19.05	15.00	28.85	26.55	56.05	44.20	70.05	63.10	94.10		157.5	224
52.5	19.10	15.10	28.95	26.70	56.30	44.40	70.35	63.40	94.60		158	225
53	19.20	15.15	29.10	26.80	56.55	44.60	70.65	63.66	95.05		159	226
53.5	19.25	15.20	29.20	26.95	56.80	44.85	80.00	63.98	95.50		160	226.5
54	19.40	15.35	29.35	27.05	57.05	45.05	71.30	64.25	95.90		160.50	227
54.5	19.50	15.40	29.50	27.20	57.30	45.30	71.60	64.55	96.35		161	228.50
55	19.55	15.50	29.60	27.35	57.55	45.50	71.95	64.80	96.80		162	229.50
55.5	19.60	15.60	29.70	27.45	57.75	45.75	72.25	65.10	97.25		162.50	230.50
56	19.75	15.65	29.80	27.55	58.00	45.90	72.55	65.35	97.70		163	231.50
56.5	19.80	15.70	29.90	27.70	58.25	46.05	72.90	65.60	98.05		164	232.50
57	19.90	15.75	30.05	27.85	58.50	46.25	73.20	65.90	98.45		164.50	233.50

توضیح : میزان آبدهی در این جدول لیتر در ثانیه میباشد

ادامه جدول ۱- میزان آبدهی با روزنه

ارتفاع به اینچ	3" اریفیس		4" اریفیس		5" اریفیس		6" اریفیس		7" اریفیس	8" اریفیس	9" اریفیس	10" اریفیس
	لوله 4"	لوله 6"	لوله 6"	لوله 8"	لوله 6"	لوله 8"	لوله 8"	لوله 10"	لوله 10"	لوله 10"	لوله 12"	لوله 12"
57.5	19.95	15.85	30.15	27.95	58.70	46.45	73.50	66.00	98.90		165	234
58	20.00	15.90	30.30	28.05	58.95	46.65	73.85	66.40	99.30		166	236
58.5	20.15	15.95	30.40	28.20	59.20	46.80	74.15	66.65	99.70		166.50	237
59	20.20	16.05	30.60	28.35	59.45	47.00	74.45	66.90	100.10		167.50	238
59.5	20.25	16.15	30.75	28.45	59.65	47.20	74.80	67.15	100.50		168	239
60	20.40	16.20	30.85	28.60	59.80	47.40	75.10	67.40	100.80		168.50	240
60.5	20.45	16.30	31.00	28.70	60.00	47.60	75.40	67.65				
61	20.50	16.35	31.05	28.85	60.25	47.75	75.70	67.90				
61.5	20.55	16.45	31.15	28.95	60.45	47.95	76.05	68.15				
62	20.70	16.55	31.30	29.10	60.65	48.15	76.30	68.40				
62.5	20.75	16.60	31.45	29.20	60.85	48.35	76.60	68.65				
63	20.85	16.65	31.55	29.35	61.10	48.50	76.85	68.90				
63.5	20.90	16.70	31.70	29.45	61.25	48.70	77.20	69.15				
64	21.00	16.80	31.80	29.60	61.45	48.90	77.45	69.35				
64.5	21.10	16.85	32.00	29.70	61.65	49.10	77.75	69.60				

توضیح : میزان آبدهی در این جدول لیتر در ثانیه میباشد

ادامه جدول ۱- میزان آبدهی با روزنه

اینچ	3" اریفیس		4" اریفیس		5" اریفیس		6" اریفیس		7" اریفیس	8" اریفیس	9" اریفیس	10" اریفیس
	لوله 4"	لوله 6"	لوله 6"	لوله 8"	لوله 6"	لوله 8"	لوله 8"	لوله 10"	لوله 10"	لوله 10"	لوله 12"	لوله 12"
65	21.15	16.90	32.10	29.80	61.90	49.30	78.00	69.80				
65.5	21.20	16.95	32.25	29.90	62.10	49.50	78.30	70.05				
66	21.35	17.10	32.35	29.95	62.35	49.65	78.60	70.25				
66.5	21.40	17.15	32.50	30.10	62.55	49.85	78.90	70.50				
67	21.45	17.25	32.65	30.20	62.80	50.05	79.15	70.70				
67.5	21.50	17.30	32.70	30.35	62.95	50.25	79.45	70.90				
68	21.65	17.35	32.80	30.50	63.25	50.40	79.70	71.10				
68.5	21.70	17.40	32.90	30.60	63.40	50.60	80.00	71.35				
69	21.85	17.50	33.00	30.75	63.65	50.80	80.25	71.55				
69.5	21.90	17.55	33.05	30.85	63.85	51.00	80.70	71.75				
70	22.00	17.65	33.15	31.00	64.10	51.20	80.80	71.95				

[redacted] آبدهی در این جدول لیتر در ثانیه میباشد

جدول ۲ – اندازه‌گیری آبدهی به طریقه جت برحسب لیتر بر ثانیه

طول L «سانتیمتر»	قطر لوله آبده باینچ			
	6	8	10	12
20	14.1	25.2	39.4	56.8
21	14.9	26.5	41.4	59.6
22	15.6	27.7	43.3	62.5
23	16.3	29	45.3	65.3
24	17	30.3	47.3	68.1
25	17.7	31.5	49.3	71
26	18.4	32.8	51.3	73.8
27	19.1	34	53.2	76.7
28	19.8	35.3	55.2	79.5
29	20.5	36.6	57.2	82.3
30	21.3	37.8	59.1	85.2
31	22	39.1	61.1	88
32	22.7	40.3	63.1	91
33	23.4	41.6	65.1	93.7
34	24.1	42.9	67	96.6
35	24.8	44.1	69	99.4
36	25.5	45.4	71	102.2
37	26.2	46.7	73	105.1
38	26.9	47.6	74.9	107.9
39	27.6	49.2	76.9	110.8
40	28.6	50.5	78.9	113.6
41	29.1	51.7	80.8	116.5
42	29.8	53	82.8	119.3
43	30.5	54.3	84.8	122.1
44	31.2	55.5	86 8	125
45	31.9	56.8	88.7	127.8
46	32.6	58	90.7	130.6
47	33.3	59.3	92.7	133.5
48	34	60.6	94.7	136.3
49	34.8	61.8	96.6	139.2
50	35.5	63.1	98.6	142
51	36.2	64.3	100.6	144.9
52	36.9	65.6	102.6	147.7
53	37.6	66.9	104.5	150.0
54	38.3	68.1	106.5	153.4
55	39	69.4	108.5	156.2
56	39.7	70.7	110.5	159.1
57	40.4	71.9	112.4	161.9
58	41.1	73.2	114.4	164.8
59	41.8	74.5	116.4	167.6

ادامه جدول ۲ – اندازه‌گیری آبدهی به طریقه جت برحسب لیتر بر ثانیه

طول L «سانتیمتر»	قطر لوله آبده باینچ			
	6	8	10	12
60	42.6	75.7	118.3	170.5
61	43.3	77	120.3	173.3
62	44	78.2	122.3	176.1
63	44.7	79.5	124.3	178.9
64	45.4	80.8	126.2	181.8
65	46.1	82	128.2	184.6
66	46.8	83.3	130.2	187.5
67	47.5	84.6	132.1	190.3
68	48.3	85.8	134.1	193.2
69	49	87.1	136.1	196
70	49.7	88.3	138.1	198.9
71	50.4	89.6	140.1	201.7
72	51.1	90.9	142	204.5
73	51.8	92.1	144	207.4
74	52.5	93.4	146	210.2
75	53.2	94.7	148	213.1
76	53.9	95.5	149.9	215.9
77	54.7	97.2	151.9	218.8
78	55.3	98.5	53.9	221.6
79	56.1	99.7	155.6	224.4
80	56.8	101	157.8	227.3
81	57.5	101.6	159.8	230.1
82	58.2	103.5	161.8	233
83	58.9	104.8	163.7	235.8
84	59.6	106	165.7	238.6
85	60.3	107.3	167.7	241.5
86	61	108.8	169.6	244.3
87	61.8	109.8	171.8	247.2
88	62.5	111.1	173.6	250
89	63.2	112.3	175.6	252.8
90	63.9	113.6	177.5	255.7
91	64.6	114.9	179.5	258.5
92	65.3	116.1	181.5	261.4
93	66	117.3	183.5	264.2
94	66.7	118.3	185.5	267.1
95	67.4	119.9	187.4	269.9
96	68.1	121.2	189.4	272.7
97	68.8	122.7	191.4	275.6
98	69.5	123.7	193.3	278.4
99	70.3	125	195.3	281.3
100	71	126.2	197.3	284.1

جدول ۳- میزان آبدهی در لوله‌های آبده قائم برحسب لیتر بر ثانیه

H (سانتیمتر)	دبی در لوله آبده به اینچ			
	4	6	8	10
4	7.12	16.02	28.50	44.54
5	7.94	17.87	31.78	49.66
6	8.58	19.32	34.34	53.67
7	9.40	21.16	37.62	58.79
8	10.07	22.68	40.33	63.02
9	10.68	24.05	42.75	66.81
10	11.29	25.41	45.18	70.59
11	11.82	26.61	47.31	73.93
12	12.36	27.81	49.45	77.27
13	12.86	28.94	51.45	80.39
14	13.32	29.98	53.30	83.28
15	13.82	31.10	55.30	86.40
16	14.25	32.06	57.01	89.08
17	14.71	33.11	58.86	91.97
18	15.14	34.07	60.57	94.64
19	15.57	35.03	62.28	97.31
20	15.96	35.91	63.85	99.76
21	16.35	36.79	65.42	102.21
22	16.74	37.68	66.98	104.86
23	17.10	38.49	68.41	106.89
24	17.45	39.28	69.83	109.12
25	17.81	40.08	71.26	111.35
26	18.17	40.88	72.68	113.57
27	18.52	41.68	74.11	115.80
28	18.88	42.49	75.53	113.03
29	19.24	43.29	76.96	120.25
30	19.52	43.93	78.10	122.03
31	19.84	44.65	79.38	124.04
32	20.16	45.37	80.67	126.04
33	20.48	46.09	81.95	128.05
34	20.77	46.74	83.09	129.83
35	21.09	47.46	84.37	131.83
36	21.37	48.10	85.51	133.62
37	21.69	48.82	86.79	135.62
38	21.98	49.46	87.79	137.40
39	22.27	50.10	89.08	139.18
40	22.51	50.66	90.07	140.74
41	22.85	51.39	91.36	142.75
42	23.12	52.03	92.50	144.53
43	23.26	52.35	93.07	145.42
44	23.62	53.15	94.46	147.65
45	23.87	53.71	95.49	149.20
46	24.15	54.35	96.63	150.99
47	24.44	54.99	97.77	152.77
48	24.05	55.47	98.62	154.10
49	24.94	56.12	99.76	155.89
50	25.22	56.76	100.9	157.67
51	25.40	57.16	101.62	158.87
52	25.72	57.88	102.9	160.87
53	25.94	58.36	103.76	162.12
54	26.18	58.92	104.75	163.68
55	26.43	59.48	105.75	165.24
56	26.65	59.96	106.61	166.57
57	26.93	60.61	107.75	168.36
58	27.15	61.09	108.60	169.69
59	27.40	61.65	109.60	171.25
60	27.61	62.13	110.45	172.59

پیوست ۲

تحلیل چند آزمایش انجام شده در ایران

مثال ۱: تحلیل یک آزمایش پمپاژ در آبخوان تحت فشار به چند روش

چاهی به‌عمق ۲۰۰ متر در اراضی روستای حاجی‌کلاته واقع در دشت گرگان حفاری و لوله ″۱۲ اینچ در آن نصب شده است. در فاصله ۴۹/۳۰ متری این چاه، پیزومتری تا همان عمق حفاری و در آن لوله ″۶ نصب شده است. آزمایش پمپاژ در این چاه با آبدهی ثابت ۷۳/۱۰ لیتر در ثانیه به مدت ۴۸ ساعت انجام و اندازه‌گیری سطح آب در پیزومتر در تمام مدت پمپاژ ثبت و نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. ضرایب هیدرودینامیک آبخوان در این محل به روشهای مختلف تحلیل شده است که در ذیل شرح داده خواهد شد :

۱-۱ روش تحلیل تیس

براساس ارقام اندازه‌گیری شده که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود ابتدا نمودار s به $\frac{t}{r^2}$ بر روی کاغذ لگاریتمی رسم شده است (شکل ۱). این نمودار با منحنی نمونه تیس که قبلاً در کاغذ لگاریتمی دیگری با همان مقیاس تهیه شده تطبیق داده و سپس یک نقطه انطباق انتخاب می‌شود. ابتدا مقادیر افت (s) و $(\frac{t}{r^2})$ این نقطه از روی شکل ۱ به شرح ذیل مشخص می‌شود :

$s = ۶$ متر

$\frac{t}{r^2} = ۳/۴ \times ۱۰^{-۵}$ مترمربع بر روز

سپس مقادیر $W(u)$ و u از روی منحنی نمونه به شرح زیر مشخص شده است.

$W(u) = ۷$

$u = ۱/۱ \times ۱۰^{-۴}$

حال با استفاده از معادله

$$T = \frac{Q}{4\pi s} W(u)$$

و قرار دادن مقادیر Q (برحسب مترمکعب بر روز)، s (بر حسب متر) و $W(u)$ ، مقدار ضریب قابلیت انتقال محاسبه شده است:

$$T = \frac{۷۳/۱ \times ۱۰^{-۳} \times ۸۶۴۰۰}{۴ \times ۳/۱۴ \times ۶} \times ۷ \cong ۵۸۰$$ متر مربع بر روز

ضریب ذخیره نیز با استفاده از معادله زیر بدست آمده است :

$$S = \frac{u}{4T(t/r^2)} = \frac{۱/۱ \times ۱۰^{-۴}}{۴ \times ۵۸۰ \times ۳/۴ \times ۱۰^{-۵}} = ۱/۴ \times ۱۰^{-۳}$$

۱-۲ روش تحلیل کوپر - ژاکوب

با استفاده از جدول ۱ مقادیر افت (s) و زمان (t) بر روی کاغذ نیمه‌لگاریتمی ثبت و نمودار شکل ۲ تهیه شده است. سپس بر نقاط بدست آمده خط مستقیمی برازش داده شده و شیب این خط یعنی اختلاف افت در یک سیکل لگاریتمی از زمان برابر $\Delta s = ۲/۱$ متر محاسبه می‌شود.

حال با استفاده از معادله :

$$T = \frac{2.3\ Q}{4\pi \Delta s}$$

و با جایگذاری مقادیر Q و Δs در آن مقدار ضریب قابلیت انتقال آبخوان به شرح ذیل محاسبه شده است :

$$T = \frac{۲/۳ \times ۷۳/۱ \times ۱۰^{-۳} \times ۸۶۴۰۰}{۴ \times ۳/۱۴ \times ۲/۱} = ۵۵۰$$ متر مربع بر روز

برای محاسبه ضریب ذخیره خط مستقیم برازش داده شده بر نقاط ادامه داده می‌شود تا محور زمان را در نقطه‌ای که افت (s) برابر صفر است قطع کند. بنابراین $t_{\circ} = ۱/۱ \times ۱۰^{-۱}$ دقیقه یا $۷/۶ \times ۱۰^{-۵}$ روز به دست می‌آید.

حال با استفاده از معادله :

$$S = \frac{2.25\ Tt_{\circ}}{r^2}$$

و جایگذاری مقادیر T ، $t_{\circ}$ و r^2 در آن ضریب ذخیره به شرح ذیل محاسبه می‌شود :

$$S = \frac{۲/۲۵ \times ۵۵۰ \times ۷/۶ \times ۱۰^{-۵}}{(۴۹/۳)^{۲}} = ۳/۸۷ \times ۱۰^{-۵}$$

۱-۳ روش آبدهی مخصوص

باتوجه به مقادیر جدول ۲ (افت در چاه) ملاحظه می‌شود که مقدار افت در پایان آزمایش یعنی $t = ۲۸۸۰$ دقیقه برابر

با $s = ۲۰/۹۷$ متر است. بنابراین چنانچه فرض شود در این آزمایش اندازه‌گیری‌های افت نسبت به زمان بطور مستمر انجام نشده باشد و قبل از شروع آزمایش فقط سطح ایستابی در چاه اصلی اندازه‌گیری و پس از خاتمه آزمایش فقط یک بار اندازه‌گیری افت انجام شده باشد، می‌توان مقدار ضریب قابلیت انتقال آبخوان را برآورد کرد. البته از این روش منحصراً در مواردی که در چاههای بهره‌برداری امکان اندازه‌گیری افت وجود نداشته باشد استفاده خواهد شد. اکنون به منظور مشخص کردن حدود دقت این روش با استفاده از داده‌های یک بار اندازه‌گیری افت به حل مسئله پرداخته می‌شود :

معلومات مسئله عبارتست از :

آبدهی	$Q = ۷۳/۱۰$ لیتر بر ثانیه
افت در انتهای آزمایش	$s = ۲۰/۹۷$ متر
ظرفیت ویژه	$\frac{Q}{s} = \frac{۷۳/۱۰}{۲۰/۹۷} = ۳/۴۸$ لیتر بر ثانیه بر متر
زمان	$t = ۲۸۸۰$ دقیقه و یا روز $t = ۲$
شعاع چاه	$r = ۶$ اینچ $\Rightarrow ۰/۱۵۲۴$ متر

با استفاده از جدول ۴-۸ این دستورالعمل و یا معادله :

$$K = 16.62 - 15.8112 \log r^2 \times 10^{-6}$$

مقدار K به‌دست خواهد آمد :

$$K = ۱۶/۶۲ - ۱۵/۸۱۱۲ \log(۰/۱۵۲۴\times۱۰^{-۶})^۲ = ۱۳۷/۳۲$$

سپس با استفاده از معادله :

$$T' = \frac{Q}{s}[K + 15.8112 \log(\frac{t}{5S})]$$

چنانچه $S = ۵\times۱۰^{-۴}$ فرض شود، بنابراین :

$$T' = ۳/۴۸ [۱۳۷/۳۲ + ۱۵/۸۱۱۲ \log(\frac{۲}{۵\times۵\times۱۰^{-۴}})] \cong ۶۴۰$$ متر مربع بر روز

اکنون با مراجعه به نمودار ۴-۱۵ مقادیر T' و $\frac{Q}{s}$ یکدیگر را در یک نقطه قطع می‌کنند که ضریب قابلیت انتقال در این نقطه $T = ۵۰۰$ مترمربع بر روز است.

به‌طوری که ملاحظه می‌شود مقدار محاسبه شده از این روش به مقادیر به‌دست آمده از روشهای تحلیل تیس و کوپر ژاکوب خیلی نزدیک است.

۱-۴ روش تجربی رازک و هانتلی :

افت در پایان آزمایش $s = ۲۰/۹۷$ متر

آبدهی چاه $Q = ۷۳/۱۰$ لیتر بر ثانیه

با توجه به مفاد این دستورالعمل ملاحظه می‌شود برای استفاده از این روش، آبدهی باید به مترمکعب بر روز تبدیل شود.

$Q = ۷۳/۱۰ \times ۸۶/۴ = ۶۳۱۵/۸۴$ مترمکعب بر روز

با استفاده از معادله :

$$T = 15.3 \left(\frac{Q}{s}\right)^{0.67}$$

و مقدار T برابر می‌شود با :

$$T = ۱۵/۳ \left(\frac{۶۳۱۵/۸۴}{۲۰/۹۷}\right)^{۰/۶۷} = ۷۰۰$$ متر مربع بر روز

به‌طوری که ملاحظه می‌شود مقدار ضریب قابلیت انتقال آبخوان به راحتی و با تقریب قابل قبولی به دست می‌آید.

۱-۵ روش برگشت تیس

بطوری که در ارقام جدول ۱ ملاحظه می‌شود آزمایش برگشت با خاموش کردن پمپ و اندازه‌گیری سطح آب به مدت ۱۴ دقیقه در پیزومتر، انجام شده است. بنابراین با استفاده از ارقام این جدول که در آن افت باقیمانده (s') و $\frac{t}{t'}$ محاسبه شده، بر روی یک کاغذ نیمه‌لگاریتمی افت باقیمانده در مقابل $\frac{t}{t'}$ ترسیم می‌شود و بر نقاط به‌دست آمده یک خط مستقیم برازش داده می‌شود (شکل ۳): شیب این خط عبارتست از تغییرات افت باقیمانده (s') در یک سیکل لگاریتمی از زمان $(\frac{t}{t'})$، که برابر $\Delta s' = ۳/۷$ متر است. حال با استفاده از معادله

$$T = \frac{۲/۳\, Q}{۴\pi \Delta s'} = \frac{۰/۱۸۳Q}{\Delta s}$$

مقدار T برابر می‌شود با :

$$T = \frac{۰/۱۸۳ \times ۷۳/۱۰ \times ۱۰^{-۳} \times ۸۶۴۰۰}{۳/۷} = ۳۱۵ \text{ متر مربع بر روز}$$

۱-۶ نتیجه :

از بررسیهای انجام شده ملاحظه می‌شود که مقدار T به‌دست آمده از روشهای تحلیل تیس و کوپر - ژاکوب به یکدیگر خیلی نزدیک هستند. اگرچه در روشهای برآورد بویژه روش آبدهی مخصوص نیز نتیجه کاملاً مطلوبی به‌دست آمده است، اما وجود اختلاف درنتیجه به‌دست آمده از روش برگشت با روشهای مذکور در فوق به‌نظر می‌رسد ناشی از کم بودن زمان اندازه‌گیریهای برگشت سطح آب باشد. چنانچه مدت زمان بیشتری آزمایش برگشت ادامه می‌یافت و مقدار افت باقیمانده به صفر نزدیک‌تر می‌شد با احتمال زیاد نتیجه محاسبات در این روش نیز تا حدود زیادی به نتایج به‌دست آمده از روشهای فوق نزدیک می‌شد.

اصولاً اگر آبخوان در سرتاسر عمق یکنواخت نباشد، همانگونه که غالب آبخوانها در طبیعت اختصاصات هیدروژئولوژیکی یکنواختی از نظر دانه‌بندی یا جور بودن دانه‌ها در تمامی عمق دارا نیستند، نتایج به‌دست آمده از دو روش تحلیل تیس و کوپر - ژاکوب با یکدیگر اختلاف خواهند داشت.

روش تحلیل تیس عمدتاً تحت تأثیر اختصاصات هیدرولیکی آبخوان در نزدیک چاه پمپاژی قرار می‌گیرد درحالی‌که روش خط مستقیم کوپر - ژاکوب بیشتر تحت تأثیر اختصاصات هیدرولیکی آبخوان در کناره و لبه مخروط افت یعنی در فواصل دورتر از چاه پمپاژی است. بنابراین اگر اختلافی در نتایج به‌دست آمده از این دو روش در آزمایشی دیده شود، معلول هر دو علت درجه غیریکنواختی و فاصله پیزومتر اندازه‌گیری از چاه مورد آزمایش است.

بنابر این باتوجه به مراتب یاد شده به‌نظر می‌رسد که مقادیر ضرایب هیدرودینامیک محاسبه شده از روش تیس در این آزمایش بیشتر اعتبار دارد.

جدول شماره ۱

برگ آزمایش پمپاژ

پروژه : مطالعات دشت گرگان
تعداد پیزومتر : یک
عمق چاه : ۲۰۰ متر

نام محل : جنوب روستای حاجی‌کلاته
موقعیت پیزومتر : جنوب چاه اصلی
ارتفاع محل : .....

نام مالک : وزارت نیرو
فاصله پیزومتر از چاه : ۴۹/۳۰ متر
نقطه نشانه اندازه‌گیری : .....

شماره چاه (U.T.M) : ۴۰۹۰-۳۱۰۰۰۰
نوع آزمایش : آبدهی ثابت (رفت و برگشت)
عمق سطح ایستابی : ۱/۵۴+

زمان			عمق سطح آب (m)	افت s (m)	روش اندازه‌گیری : اریفیس		آبدهی Q (lit/s)	افت تصحیح شده s_c (m)	$\frac{t}{r^2}$ روز بر (day/m^2)	افت باقیمانده s' (m)	$\frac{t}{t'}$	ملاحظات نسبت تبدیل روزنه دور پمپ و ...
تاریخ	ساعت (hr)	دقیقه (min)			ارتفاع (in)	طول پرش (cm)						
۷۱/۹/۶	۸	۰	+۱/۵۴	۰			۷۳/۱۰					
		۲	+۱/۴۳	۰/۱۱			"		$5/7\times10^{-7}$			
		۴	-۱/۲۷	۲/۸۱			"		$1/1\times10^{-6}$			
		۶	-۲/۰۳	۳/۵۷			"		$1/7\times10^{-6}$			
		۸	-۲/۳۳	۳/۸۲			"		$2/3\times10^{-6}$			
		۱۰	-۲/۵۹	۴/۱۳			۷۳/۱۰		$2/9\times10^{-6}$			
		۱۲	-۲/۷۷	۴/۳۱			"		$3/4\times10^{-6}$			
		۱۴	-۳/۰۷	۴/۶۱			"		4×10^{-6}			
		۱۶	-۳/۱۷	۴/۷۱			"		$4/6\times10^{-6}$			
		۱۸	-۳/۲	۴/۷۴			"		$5/1\times10^{-6}$			
		۲۰	-۳/۲۵	۴/۷۹			"		$5/7\times10^{-6}$			
		۲۵	-۳/۴۲	۴/۹۶			"		$7/1\times10^{-6}$			
		۳۰	-۳/۵۳	۵/۰۷			"		$8/6\times10^{-6}$			
		۳۵	-۳/۶۶	۵/۲			"		1×10^{-5}			
		۴۰	-۳/۸۰	۵/۳۴			"		$1/1\times10^{-5}$			
		۴۵	-۳/۹۹	۵/۵۳			"		$1/3\times10^{-5}$			
		۵۰	-۴/۰۸	۵/۶۲			"		$1/4\times10^{-5}$			
	۹	۶۰	-۴/۲	۵/۷۴			۷/۳۰		$1/7\times10^{-5}$			
		۷۰	-۴/۲۶	۵/۸			"		2×10^{-5}			
		۸۰	-۴/۳۱	۵/۸۵			"		$2/3\times10^{-5}$			
		۹۰	-۴/۳۴	۵/۸۸			"		$2/6\times10^{-5}$			

نام آزمایش کننده : .....

جدول شماره ۱ (ادامه)

برگ آزمایش پمپاژ

پروژه : مطالعات دشت گرگان
تعداد پیزومتر : یک
عمق چاه : ۲۰۰ متر

نام محل : جنوب روستای حاجی‌کلاته
موقعیت پیزومتر : جنوب چاه اصلی
ارتفاع محل : .....

نام مالک : وزارت نیرو
فاصله پیزومتر از چاه : ۴۹/۳۰ متر
نقطه نشانه اندازه‌گیری : .....

شماره چاه (U.T.M) : ۴۰۹۰-۳۱۰۰۰۰
نوع آزمایش : آبدهی ثابت (رفت و برگشت)
عمق سطح ایستابی : +۱/۵۴

زمان			عمق سطح آب (m)	افت s (m)	روش اندازه‌گیری : اریفیس		آبدهی Q (lit/s)	افت تصحیح شده s_c (m)	$\frac{t}{r^2}$ (day/m^2)	افت باقیمانده s' (m)	$\frac{t}{t'}$	ملاحظات نسبت تبدیل اریفیس دور پمپ و ...
تاریخ	ساعت (hr)	دقیقه (min)			ارتفاع (in)	طول پرش (cm)						
۷۱/۹/۶		۱۰۰	-۴/۴۰	۵/۹۴					۲/۹×۱۰$^{-۵}$			
	۱۰	۱۴۰	-۴/۴۷	۶/۰۱			۷۳/۱۰		۳/۴×۱۰$^{-۵}$			
		۱۴۰	-۴/۵۰	۶/۰۴			"		۴×۱۰$^{-۵}$			
		۱۶۰	-۴/۵۳	۶/۰۷			"		۴/۶×۱۰$^{-۵}$			
	۱۱	۱۸۰	-۴/۵۷	۶/۱۱			"		۵/۱×۱۰$^{-۵}$			
		۲۰۰	-۴/۶۲	۶/۱۶			"		۵/۷×۱۰$^{-۵}$			
	۱۲	۲۴۰	-۴/۶۷	۶/۲۱			۷۳/۱۰		۶/۹×۱۰$^{-۵}$			
		۲۸۰	-۴/۶۹	۶/۲۳			"		۸×۱۰$^{-۵}$			
		۳۲۰	-۴/۷۲	۶/۲۶			"		۹/۱×۱۰$^{-۵}$			
	۱۴	۳۶۰	-۴/۷۶	۶/۳			"		۱×۱۰$^{-۴}$			
	۱۵	۴۴۰	-۴/۸۱	۶/۳۵			۷۳/۱۰		۱/۲×۱۰$^{-۴}$			
		۴۸۰	-۴/۸۵	۶/۳۹			"		۱/۴×۱۰$^{-۴}$			
	۱۷	۵۴۰	-۴/۹۱	۶/۴۵			"		۱/۵×۱۰$^{-۴}$			
		۶۰۰	-۵/۰۱	۶/۵۵			۷۳/۱۰		۱/۷×۱۰$^{-۴}$			
	۲۰	۷۲۰	-۵/۰۷	۶/۶۱			"		۲/۱×۱۰$^{-۴}$			
	۲۳/۲۰	۹۲۰	-۵/۰۸	۶/۶۲			"		۲/۶×۱۰$^{-۴}$			
۷۱/۹/۷	۲/۲۰	۱۱۰۰	-۵/۱۲	۶/۶۶			۷۳/۱۰		۳/۱×۱۰$^{-۴}$			
		۱۲۸۰	-۵/۱۳	۶/۶۷			"		۳/۷×۱۰$^{-۴}$			
		۱۴۶۰	-۵/۱۳	۶/۶۷			"		۴/۲×۱۰$^{-۴}$			
		۱۶۲۰	-۵/۱۴	۶/۶۸			"		۴/۶×۱۰$^{-۴}$			
	۱۴	۱۸۰۰	-۵/۱۵	۶/۶۹			"		۵/۱×۱۰$^{-۴}$			

نام آزمایش کننده : .....

جدول شماره ۱ (ادامه)

برگ آزمایش پمپاژ

پروژه : مطالعات دشت گرگان
تعداد پیزومتر : یک
عمق چاه : ۲۰۰ متر

نام محل : جنوب روستای حاجی‌کلاته
موقعیت پیزومتر : جنوب چاه اصلی
ارتفاع محل : .....

نام مالک : وزارت نیرو
فاصله پیزومتر از چاه : ۴۹/۳۰ متر
نقطه نشانه اندازه‌گیری : .....

شماره چاه (U.T.M) : ۴۰۹۰-۳۱۰۰۰۰
نوع آزمایش : آبدهی ثابت (رفت و برگشت)
عمق سطح ایستابی : ۱/۵۴+

زمان			عمق سطح آب (m)	افت s (m)	روش اندازه‌گیری : اریفیس		آبدهی Q (lit/s)	افت تصحیح شده s_c (m)	$\frac{t}{r^2}$ (day/m^2)	افت باقیمانده s' (m)	$\frac{t}{t'}$	ملاحظات نسبت تبدیل اریفیس دور پمپ و ...
تاریخ	ساعت (hr)	دقیقه (min)			ارتفاع (in)	طول پرش (cm)						
۷۱/۹/۷	۱۷	۱۹۸۰	-۵/۱۶	۶/۷			۷۳/۱۰		$۵/۷\times۱۰^{-۴}$			
	۲۰	۲۱۶۰	-۵/۱۹	۶/۷۳			۰		$۶/۲\times۱۰^{-۴}$			
	۲۲	۲۳۰۰	-۵/۲۲	۶/۷۸			۰		$۶/۹\times۱۰^{-۴}$			
۷۱/۹/۸	۴	۲۶۴۰	-۵/۲۶	۶/۸			۷۳/۱۰		$۷/۵\times۱۰^{-۴}$			
	۸	۲۸۸۰	-۵/۲۷	۶/۸۱			۰		$۸/۲\times۱۰^{-۴}$			
												آزمایش برگشت
۷۱/۹/۸	۸	۰	-۵/۲۷				۰			۶/۸۱	۲۸۸۰	
		۲	-۳/۰۹				۰			۴/۶۳	۱۴۴۱	
		۴	-۲/۰۲				۰			۳/۵۶	۷۲۱	
		۶	-۱/۳۲				۰			۲/۸۶	۴۸۱	
		۸	-۰/۸۷				۰			۲/۴۱	۳۶۱	
		۱۰	-۰/۴۷				۰			۲/۰۱	۲۸۹	
		۱۱	-۰/۲۶				۰			۱/۸	۲۶۳	
		۱۲	-۰/۱۴				۰			۱/۶۸	۲۴۱	
		۱۳	-۰/۱					۰		۱/۶۴	۲۰۷	

نام آزمایش کننده : .....

جدول شماره ۲

برگ آزمایش پمپاژ

پروژه : مطالعات دشت گرگان
تعداد پیزومتر : یک
عمق چاه : ۲۰۰ متر

نام محل : جنوب روستای حاجی‌کلاته
موقعیت پیزومتر : جنوب چاه اصلی
ارتفاع محل : .....

نام مالک : وزارت نیرو
فاصله پیزومتر از چاه : ۴۹/۳۰ متر
نقطه نشانه اندازه‌گیری : .....

شماره چاه (U.T.M) : ۴۰۹۰-۳۱۰۰۰۰
نوع آزمایش : آبدهی ثابت (رفت و برگشت)
عمق سطح ایستابی : ۱/۵۴+

زمان			عمق سطح آب (m)	افت s (m)	روش اندازه‌گیری : اریفیس		آبدهی Q (lit/s)	افت تصحیح شده s_c (m)	$\frac{t}{r^2}$ (day/m^2)	افت باقیمانده s' (m)	$\frac{t}{t'}$	ملاحظات نسبت تبدیل اریفیس دور پمپ و ...
تاریخ	ساعت (hr)	دقیقه (min)			ارتفاع (in)	طول پرش (cm)						
۷۱/۹/۶	۸	۰	۰	۰								
		۲	۱۵/۲۱	۱۵/۲۱			۷۳/۱۰					
		۴	۱۶/۷۸	۱۶/۷۸			۰					
		۶	۱۷/۶۴	۱۷/۶۴			۰					
		۸	۱۷/۸۸	۱۷/۸۸			۰					
		۱۰	۱۸/۰۱	۱۸/۰۱			۰					
		۱۲	۱۸/۲۰	۱۸/۲۰			۰					
		۱۴	۱۸/۳۲	۱۸/۳۲			۰					
		۱۶	۱۸/۵۱	۱۸/۵۱			۷۳/۱۰					
		۱۸	۱۸/۶	۱۸/۶			۰					
		۲۰	۱۸/۶۶	۱۸/۶۶			۰					
		۲۵	۱۸/۸۴	۱۸/۸۴			۰					
		۳۰	۱۹/۰۱	۱۹/۰۱			۷۳/۱۰					
		۳۵	۱۹/۱۰	۱۹/۱۰			۰					
		۴۰	۱۹/۱۸	۱۹/۱۸			۰					
		۴۵	۱۹/۳۰	۱۹/۳۰			۰					
		۵۰	۱۹/۳۳	۱۹/۳۳			۰					
	۹	۶۰	۱۹/۳۹	۱۹/۳۹			۷۳/۱۰					
		۷۰	۱۹/۵۳	۱۹/۵۳			۰					
		۸۰	۱۹/۶۵	۱۹/۶۵			۰					
		۹۰	۱۹/۷۰	۱۹/۷۰			۰					

نام آزمایش کننده : .....

جدول شماره ۲ (ادامه)

برگ آزمایش پمپاژ

پروژه : مطالعات دشت گرگان
تعداد پیزومتر : یک
عمق چاه : ۲۰۰ متر

نام محل : جنوب روستای حاجی‌کلاته
موقعیت پیزومتر : جنوب چاه اصلی
ارتفاع محل : .....

نام مالک : وزارت نیرو
فاصله پیزومتر از چاه : ۴۹/۳۰ متر
نقطه نشانه اندازه‌گیری : .....

شماره چاه (U.T.M) : ۴۰۹۰-۳۱۰۰۰۰
نوع آزمایش : آبدهی ثابت (رفت و برگشت)
عمق سطح ایستابی : ۱/۵۴+

زمان			عمق سطح آب (m)	افت s (m)	روش اندازه‌گیری : اریفیس		آبدهی Q (lit/s)	افت تصحیح شده s_c (m)	$\frac{t}{r^2}$ (day/m^2)	افت باقیمانده s' (m)	$\frac{t}{t'}$	ملاحظات نسبت تبدیل اریفیس دور پمپ و ...
تاریخ	ساعت (hr)	دقیقه (min)			ارتفاع (in)	طول پرش (cm)						
۷۱/۹/۶		۱۰۰	۱۹/۷۵	۱۹/۷۵								
	۱۰	۱۲۰	۱۹/۸۸	۱۹/۸۸			۷۳/۱۰					
		۱۴۰	۱۹/۹۶	۱۹/۹۶			۰					
		۱۶۰	۲۰	۲۰			۰					
	۱۱	۱۸۰	۲۰/۰۳	۲۰/۰۳			۰					
		۲۰۰	۲۰/۰۶	۲۰/۰۶			۰					
	۱۲	۲۲۰	۲۰/۱۰	۲۰/۱۰			۷۳/۱۰					
		۲۸۰	۲۰/۱۸	۲۰/۱۸			۷۳/۱۰					
		۳۲۰	۲۰/۲۲	۲۰/۲۲			۰					
	۱۴	۳۶۰	۲۰/۲۷	۲۰/۲۷			۷۳/۱۰					
		۴۲۰	۲۰/۲۹	۲۰/۲۹			۰					
	۱۶	۴۸۰	۲۰/۳۲	۲۰/۳۲			۷۳/۱۰					
		۵۴۰	۲۰/۳۷	۲۰/۳۷			۰					
	۱۸	۶۰۰	۲۰/۴۹	۲۰/۴۹			۷۳/۱۰					
		۷۲۰	۲۰/۶۰	۲۰/۶۰			۰					
	۲۳/۲۰	۹۲۰	۲۰/۷۶	۲۰/۷۶			۰					
۷۱/۹/۷	۲/۲۰	۱۱۰۰	۲۰/۸۶	۲۰/۸۶			۷۳/۱۰					
		۱۲۸۰	۲۰/۸۸	۲۰/۸۸			۰					
	۸/۲۰	۱۴۶۰	۲۰/۸۹	۲۰/۸۹			۷۳/۱۰					
		۱۶۲۰	۲۰/۷۴	۲۰/۷۴			۰					
	۱۴	۱۸۰۰	۲۰/۶۷	۲۰/۶۷			۷۳/۱۰					

نام آزمایش کننده : .....

جدول شماره ۲ (ادامه)

برگ آزمایش پمپاژ

پروژه : مطالعات دشت گرگان
تعداد پیزومتر : یک
عمق چاه : ۲۰۰ متر

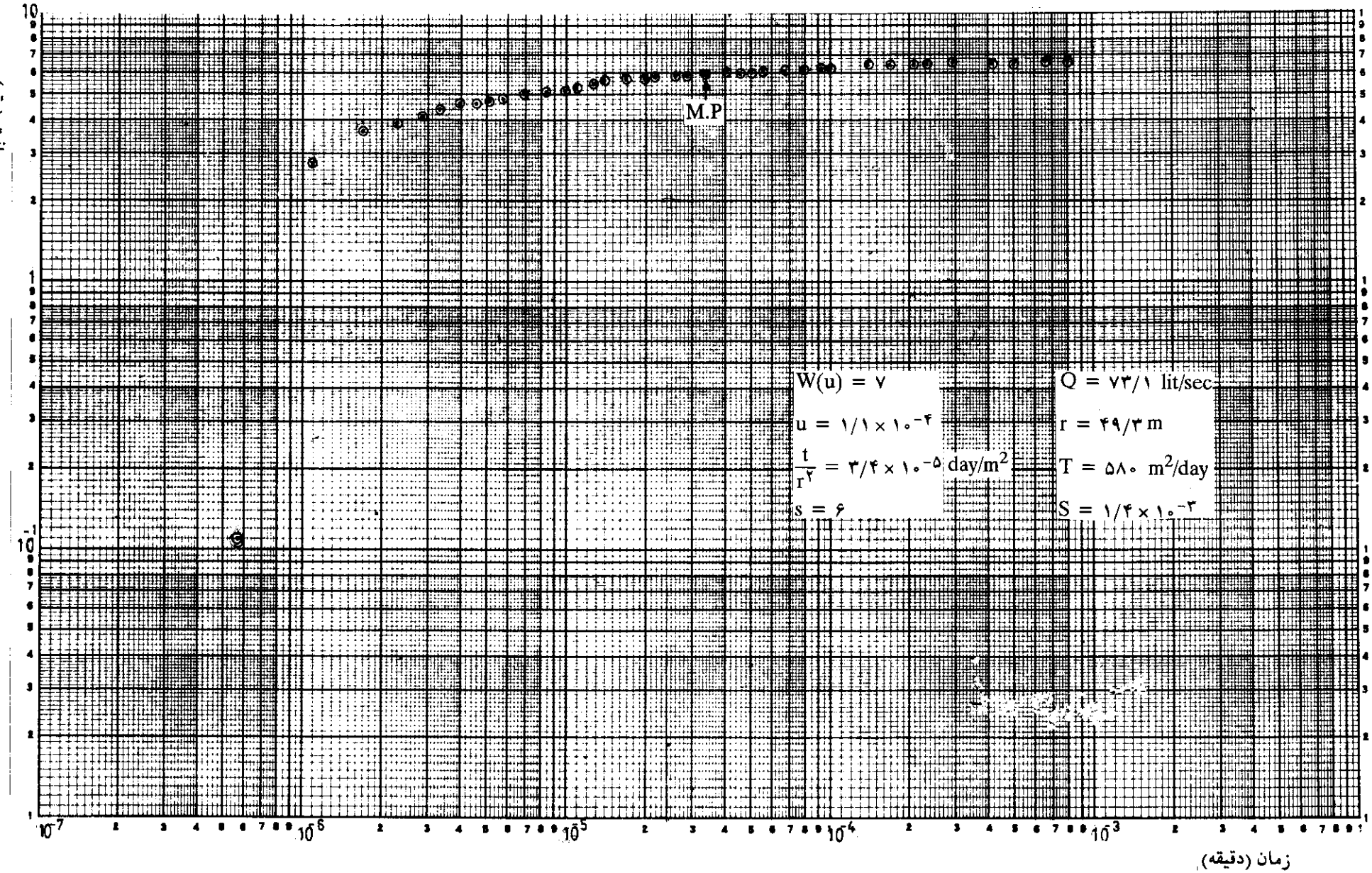
نام محل : جنوب روستای حاجی‌کلاته
موقعیت پیزومتر : جنوب چاه اصلی
ارتفاع محل : .....

نام مالک : وزارت نیرو
فاصله پیزومتر از چاه : ۴۹/۳۰ متر
نقطه نشانه اندازه‌گیری : .....

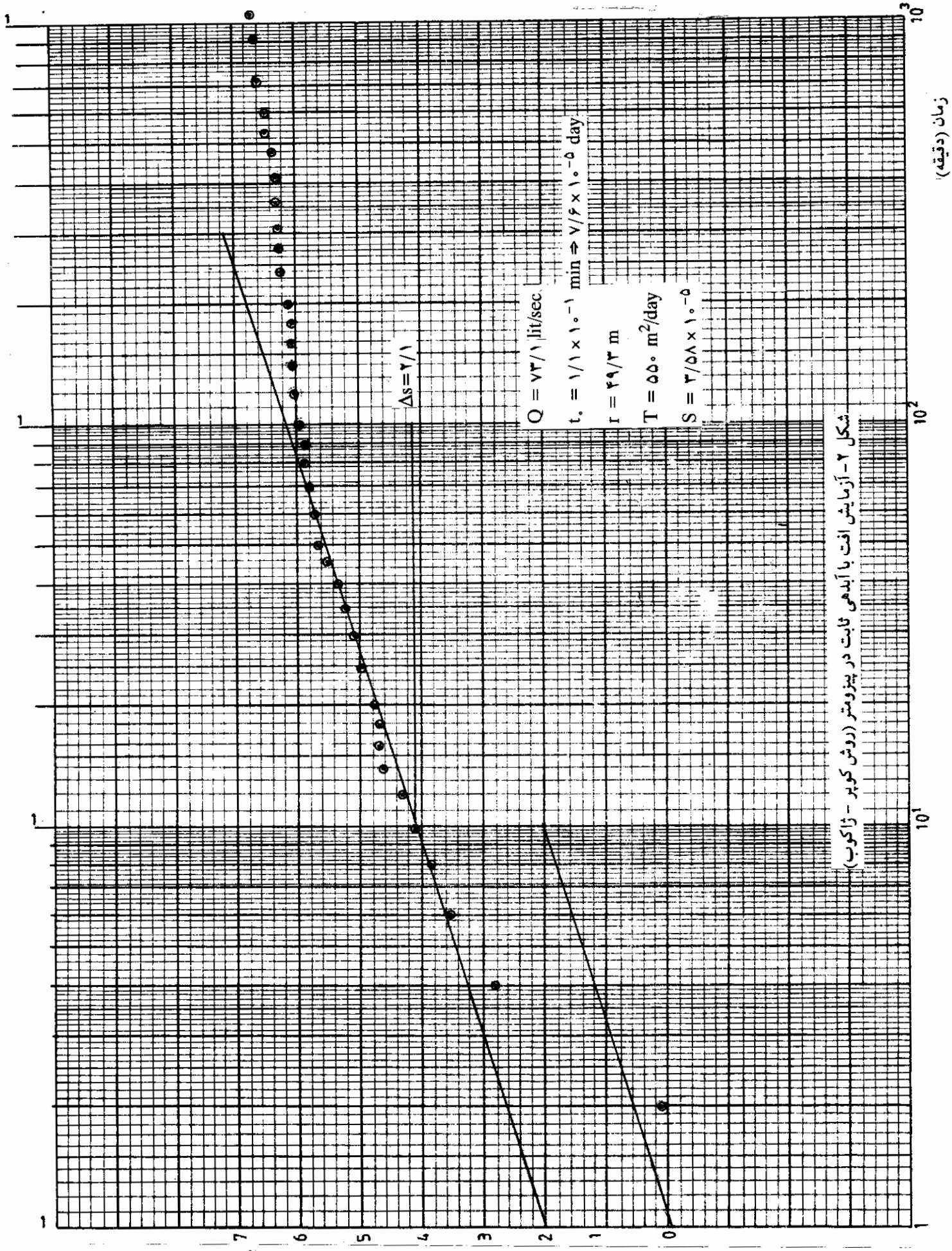
شماره چاه (U.T.M) : ۴۰۹۰-۳۱۰۰۰۰
نوع آزمایش : آبدهی ثابت (رفت و برگشت)
عمق سطح ایستابی : ۱/۵۴+

زمان			عمق سطح آب (m)	افت s (m)	روش اندازه‌گیری : اریفیس		آبدهی Q (lit/s)	افت تصحیح شده s_c (m)	$\frac{t}{r^2}$ (day/m^2)	افت باقیمانده s' (m)	$\frac{t}{t'}$	ملاحظات نسبت تبدیل اریفیس دور پمپ و ...
تاریخ	ساعت (hr)	دقیقه (min)			ارتفاع (in)	طول پرش (cm)						
۷۱/۹/۷	۱۷	۱۹۸۰	۲۰/۷۹	۲۰/۷۹			۷۳/۱۰					
		۲۱۶۰	۲۰/۷۴	۲۰/۷۴			۰					
	۲۴	۲۴۰۰	۲۰/۷۰	۲۰/۷۰			۷۳/۱۰					
۷۱/۹/۸	۴	۲۶۴۰	۲۰/۸۷	۲۰/۸۷			۷۳/۱۰					
	۸	۲۸۸۰	۲۰/۹۷	۲۰/۹۷			۷۳/۱۰					

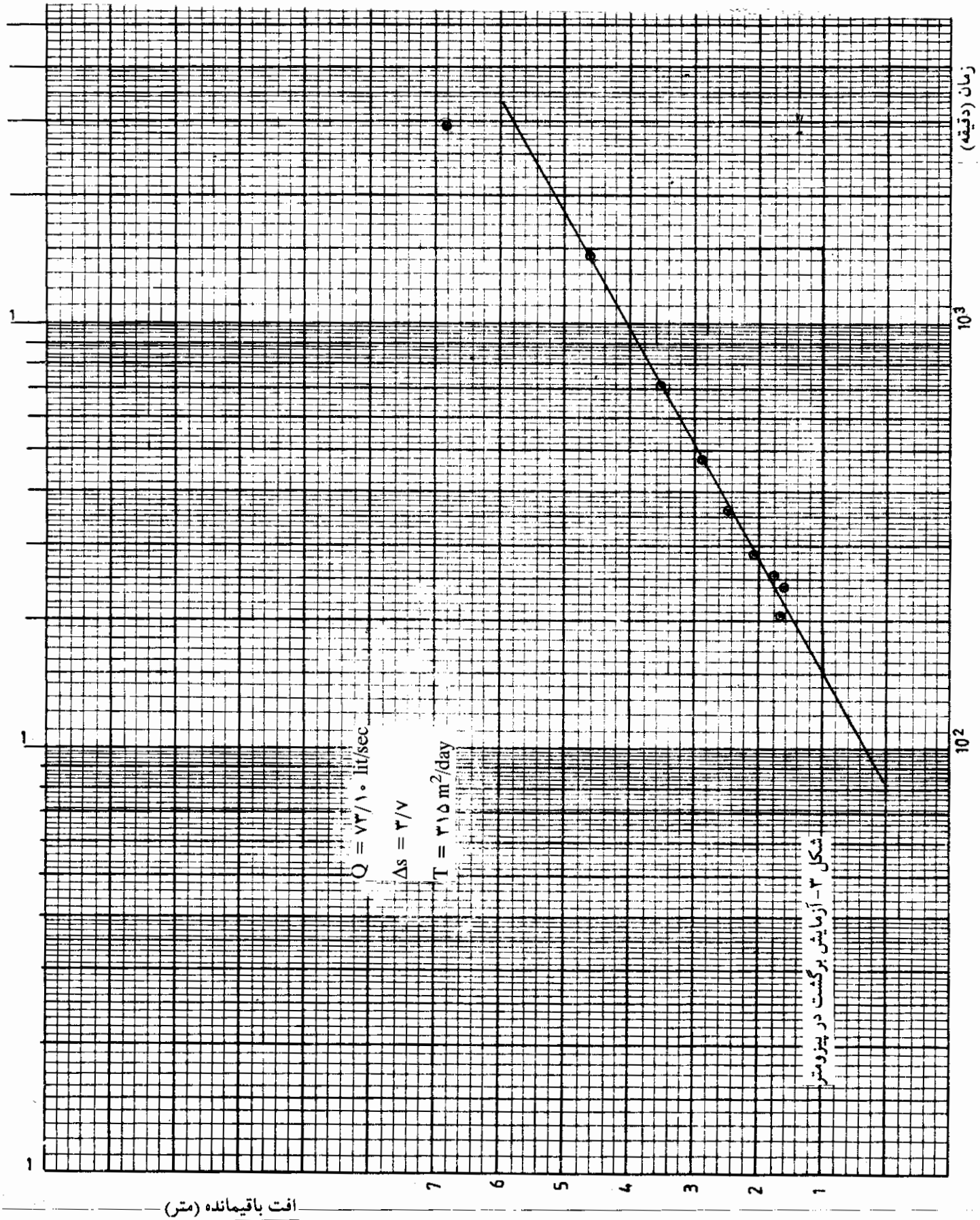
نام آزمایش کننده : .....



شکل ۱ آزمایش افت با آبدهی ثابت در پیزومتر (روش تیس)



شکل ۲ - آزمایش افت با آبدهی ثابت در پیزومتر (روش کوپر - ژاکوب)



شکل ۳- آزمایش برگشت در پیزومتر

مثال ۲ : تحلیل یک آزمایش پمپاژ برای آبخوانی با آبدهی تأخیری و چاه ناقص

در مطالعات دشت گرگان چاهی به عمق ۹۰ متر در اراضی روستای فوجرد با آبدهی ثابت Q = ۲۰/۵ لیتر بر ثانیه آزمایش پمپاژ شده و اندازه‌گیریهای افت - زمان در پیزومتری که در فاصله ۳۰ متری از چاه با همان عمق حفر شده، انجام گرفته است. ارقام اندازه‌گیری در این پیزومتر در جدول ۳ ارائه شده است. با استفاده از نتایج مطالعات ژئوفیزیک (نقشه منحنی‌های هم ضخامت آبخوان) ضخامت آبخوان در این محل برابر ۱۶۰ متر برآورد شده است. ضرایب هیدرودینامیک آبخوان در این محل به شرح زیر تحلیل و برآورد می‌شود:

حل :

ارقام افت - زمان اندازه‌گیری شده جدول ۳ در شکل ۴ در روی یک کاغذ لگاریتمی ترسیم شده است. به طوری که در این نمودار ملاحظه می‌شود، روند تغییرات افت نسبت به زمانهای اندازه‌گیری ابتدا افزایش و سپس در ادامه زمانهای اندازه‌گیری روند افت کاهش یافته است و مجدداً با افزایش زمان، افت‌ها تا رسیدن به سطح دینامیک روندی افزایشی را نشان می‌دهد و به همین لحاظ آبخوان موردنظر از نوع آبخوان با آبدهی تأخیری است. لذا روش تحلیل بولتون برای تعیین ضرایب هیدرودینامیک انتخاب می‌شود.

بنابراین نمودار ترسیم شده (شکل ۴) با منحنی‌های نمونه بولتون که بر اساس ارقام جداول ۴-۳ و ۴-۴ دستورالعمل و در کاغذی لگاریتمی هم مقیاس با کاغذ لگاریتمی شکل ۴ که قبلاً تهیه شده است، منطبق می‌شود. شکل ۴ بین منحنی‌های نمونه $\frac{r}{B} = ۰/۶$ و $\frac{r}{B} = ۰/۸$ قرار می‌گیرد. بدین معنی که این نمودار با منحنی $\frac{r}{B} = ۰/۷$ بیشترین انطباق را داراست. بنابراین ابتدا نمودار مزبور را بر بخش سمت چپ منحنی تیپ با $\frac{r}{B} = ۰/۷$ کاملاً منطبق کرده و یک نقطه انطباق $(M.P)_A$ انتخاب می‌شود و مختصات این نقطه از روی شکل ۴ و منحنی استاندارد $\frac{r}{B} = ۰/۷$ بولتون یادداشت می‌شود. مقادیر $W(u_A$ و $r/B)$ و $\frac{1}{u_A}$ از روی منحنی استاندارد و مقادیر s_A و t از نمودار ۴ استخراج شده و به شرح زیر است:

$W(u_A$ و $r/B) = ۱$ $s_A = ۲/۴$ متر

$\frac{1}{u_A} = ۹ \Rightarrow u_A = ۰/۱۱$ $t = ۶/۵$ دقیقه

سپس نمودار را بر بخش سوم منحنی استاندارد، $\frac{r}{B} = ۰/۷$ در حالی‌که محورهای مختصات کاملاً با یکدیگر موازی‌اند طوری منطبق می‌شود که دارای بیشترین پوشش باشند و سپس مقادیر $W(u_Y$ و $r/B)$ ، $\frac{1}{u_Y}$ ، s_Y و t را به شرحی که در فوق توضیح داده شد با انتخاب یک نقطه انطباق در این بخش $(M.P.)_Y$ یادداشت می‌شود. نتایج عبارتست‌از:

$W(u_Y , r/B) = ۱/۵$ $s_Y = ۳/۶$ متر

$\frac{1}{u_Y} = ۹۰ \Rightarrow u_Y = ۰/۰۱۱$ $t = ۷۰۰$ دقیقه

حال با استفاده از معادلات :

$$T = \frac{Q}{4\pi s_A} W(u_A \text{ و } r/B)$$

$$u_A = \frac{r^2 S_A}{4Tt}$$

و جایگذاری مقادیر به‌دست آمده از بخش اول منحنی در آنها T و S در این بخش به‌دست می‌آید :

$T = ۵۸/۷ \cong ۶۰$ مترمربع بر روز

$$S_A = \frac{4Ttu_A}{r^2} = ۱/۳۲ \times ۱۰^{-۴}$$

اکنون با استفاده از معادلات S و T در بخش سوم منحنی به‌دست می‌آید :

$$T = \frac{Q}{4\pi s_Y} W(u_Y , r/B) = ۵۸/۷ \cong ۶۰$$ مترمربع بر روز

$$S_Y = \frac{4Ttu_Y}{r^2} = ۱/۴۳ \times ۱۰^{-۳}$$

ملاحظه می‌شود مقادیر T به‌دست آمده در بخشهای اول و سوم منحنی یکسان هستند.

برای آنکه از به‌کارگیری روش بولتون مطمئن شویم مقدار η را آزمایش می‌کنیم :

$$\eta = \frac{S_A + S_Y}{S_A} = \frac{۱/۳۲ \times ۱۰^{-۴} + ۱/۴۳ \times ۱۰^{-۳}}{۱/۳۲ \times ۱۰^{-۴}} = ۱۱/۸$$

ضریب زهکشی آبخوان (B) عبارتست از :

$$r/B = ۰/۷ \text{ و } ۰/۷ = \frac{۳۰}{B} \Rightarrow B = ۴۲/۶ \cong ۴۳$$

حال با استفاده از معادله $B = \sqrt{\frac{T}{\alpha S_Y}}$ و جایگذاری مقادیر در آن مقدار شاخص تأخیر $(\frac{1}{\alpha})$ به دست می‌آید :

$$۴۳ = \sqrt{\frac{۶۰}{\alpha \times ۱/۴۳ \times ۱۰^{-۳}}}$$.

$\frac{1}{\alpha} = ۰/۰۴۴$ روز $\cong$ ۶۳ دقیقه

با استفاده از نمودار شکل ۴-۷ دستورالعمل و باتوجه به این‌که $\frac{r}{B} = ۰/۷$ است مقدار $\alpha twt = ۴$ به‌دست آید.
چون $\alpha = ۰/۰۱۵$ است، بنابراین :

$۰/۰۱۵\ t_w t = ۴$

$t_w t = \frac{۴}{۰/۰۱۵} = ۲۵۲$ دقیقه

بر این اساس پس از ۲۵۲ دقیقه دیگر آبدهی تأخیری نیست.

بنابراین : ضرایب هیدرولیک آبخوان عبارتست از :

ضریب قابلیت انتقال	مترمربع بر روز $T = ۶۰$
ضریب ذخیره	$S = ۱/۴۳ \times ۱۰^{-۳}$
شاخص تأخیر	$\frac{1}{\alpha} = ۶۳$ دقیقه
زمانی که آبدهی تأخیری نیست	$twt = ۲۵۲$ دقیقه

باتوجه به شاخص تأخیر، موادی که در آن زهکشی منفذی روی داده است، ماسه متوسط است.
چون چاه تمامی ضخامت آبخوان را حفر نکرده بنابراین یک چاه ناقص است. پس برای به‌دست آوردن ضریب قابلیت انتقال آبخوان در این محل با استفاده از معادلات ۴-۴۱ و ۴-۴۲ نتایج زیر حاصل می‌شود :

سطح استاتیک	متر $W.T = ۲۰/۳۲$
ضریب قابلیت انتقال با توجه به عمق ۹۰ متر	مترمربع بر روز $T' = ۶۰$
ضخامت آبخوان	متر $b = ۱۶۰$
ضخامت بخش اشباع	$b' = ۱۶۰ - ۲۰/۳۲ = ۱۳۹/۶۸$
آبدهی	مترمکعب بر ساعت $Q = ۷۳/۸$
افت در پیزومتر	$s = ۳/۶۵$
ضخامت بخش اشباع حفاری شده	$l = ۹۰ - ۲۰/۳۲ = ۶۹/۶۸$

$$\frac{Q}{s} = \frac{(Q/s)_p}{l/b\ [1+7(r_w/2l)^{1/2} \cos(\pi l/2b)]}$$

$\frac{Q}{s} = ۳۴/۸۳$ مترمکعب بر روز بر متر

$T = ۱۵/۳\ (Q/s)^{۰/۶۷} = ۱۵/۳ \times (۳۴/۸۳)^{۰/۶۷} = ۱۶۵$ مترمربع بر روز

برای اطمینان از انتخاب روش مجدداً ضریب قابلیت انتقال به‌دست آمده را در معادله ذیل آزمایش شود :

$$S_A = \frac{۴Ttu_A}{r^۲} = ۳/۶ \times ۱۰^{-۴}$$

$$S_Y = \frac{۴Ttu_Y}{r^۲} = ۳/۹ \times ۱۰^{-۳}$$

$$\eta = \frac{S_A + S_Y}{S_A} = ۱۱/۸۹$$

نتیجه‌گیری : ضریب قابلیت انتقال حقیقی آبخوان مترمربع بر روز $T = ۱۶۵$ و ضریب ذخیره $۱/۴۳ \times ۱۰^{-۳}$ صحیح است.

جدول شماره ۳

برگ آزمایش پمپاژ

پروژه : مطالعات دشت گرگان

تعداد پیزومتر : ۱

عمق چاه : ۹۰ متر

نام محل : فوجرد

موقعیت پیزومتر : .....

ارتفاع محل : .....

نام مالک : آب منطقه‌ای مازندران

فاصله پیزومتر از چاه : ۳۰ متر از چاه اصلی

نقطه نشانه اندازه‌گیری : بالای لوله جدار

شماره چاه (U.T.M) : ۲۷۳۹۰۰-۴۰۸۵۷۵۰

نوع آزمایش : آبدهی ثابت

عمق سطح ایستابی : ۲۰/۳۲ متر

زمان			عمق سطح آب (m)	افت s (m)	روش اندازه‌گیری : روزنه		آبدهی Q (lit/s)	افت تصحیح شده Sc (m)	$\frac{r^2}{t}$ (m^2/d)	افت باقیمانده s' (m)	$\frac{t}{t'}$	ملاحظات نسبت تبدیل اریفیس دور پمپ و ...
تاریخ	ساعت (hr)	دقیقه (min)			ارتفاع (in)	طول پرش (cm)						
۷۲/۸/۱۴	۸	۰	۲۰/۳۲	۰	۶		۲۰/۵					
		۰/۵	۲۰/۳۷	۰/۰۵			"					
		۱	۲۰/۹۲	۰/۶			"					
		۱/۵	۲۱/۱۹	۰/۸۷			"					
		۲	۲۱/۵۲	۱/۲۰	۶		۲۰/۵					
		۲/۵	۲۱/۶۹	۱/۳۷			"					
		۳	۲۱/۹۱	۱/۵۹			"					
		۳/۵	۲۲/۰۶	۱/۷۴			"					
		۴	۲۲/۱۷	۱/۸۵			"					
		۴/۵	۲۲/۲۷	۱/۹۵			"					
		۵	۲۲/۳۷	۲/۰۵	۶		۲۰/۵					
		۶	۲۲/۵۱	۲/۱۹			"					
		۷	۲۲/۶۶	۲/۳۴			"					
		۸	۲۲/۸۴	۲/۵۲			"					
		۱۰	۲۲/۷۶	۲/۴۴	۶		۲۰/۵					
		۱۲	۲۲/۶	۲/۲۸			"					
		۱۴	۲۲/۵۹	۲/۲۷			"					
		۱۶	۲۲/۵۹	۲/۲۷	۶		۲۰/۵					
		۱۸	۲۲/۶۵	۲/۳۳			"					
		۲۰	۲۲/۶۸	۲/۳۶	۶		۲۰/۵					
		۲۵	۲۲/۷۷	۲/۴۵			"					

نام آزمایش کننده : .....

جدول شماره ۳ (ادامه)

برگ آزمایش پمپاژ

پروژه : مطالعات دشت گرگان

نام محل : فوجرد

نام مالک : آب منطقه‌ای مازندران

شماره چاه (U.T.M) : ۲۷۳۹۰۰-۴۰۸۵۷۵۰

تعداد پیزومتر : ۱

موقعیت پیزومتر : .....

فاصله پیزومتر از چاه : ۳۰ متر از چاه اصلی

نوع آزمایش : آبدهی ثابت

عمق چاه : ۹۰ متر

ارتفاع محل : .....

نقطه نشانه اندازه‌گیری : بالای لوله جدار

عمق سطح ایستابی : ۲۰/۳۲ متر

زمان			عمق سطح آب (m)	افت s (m)	روش اندازه‌گیری : اریفیس		آبدهی Q (lit/s)	افت تصحیح شده s_c (m)	$\frac{r^2}{t}$ (m^2/d)	افت باقیمانده s' (m)	$\frac{t}{t'}$	ملاحظات نسبت تبدیل اریفیس دور پمپ و ...
تاریخ	ساعت (hr)	دقیقه (min)			ارتفاع (in)	طول پرش (cm)						
۷۲/۸/۱۴	۸	۳۰	۲۲/۹۳	۲/۶۱	۶		۲۰/۵					
		۳۵	۲۳/۰۳	۲/۷۱	۶							
		۲۰	۲۳/۱۱	۲/۷۹	۶		۲۰/۵					
		۲۵	۲۳/۲۱	۲/۸۹	۶							
		۵۰	۲۳/۲۸	۲/۹۶	۶							
	۹	۶۰	۲۳/۳۵	۳/۰۳	۶		۲۰/۵					
		۸۰	۲۳/۳۶	۳/۰۲	۶		۲۰/۵					
		۱۰۰	۲۳/۲۸	۳/۱۶	۶		۲۰/۵					
	۱۰	۱۲۰	۲۳/۲۲	۳/۱	۶		۲۰/۵					
	۱۱	۱۸۰	۲۳/۳۵	۳/۰۳	۶		۲۰/۵					
	۱۲	۲۲۰	۲۳/۲۲	۳/۱	۶		۲۰/۵					
	۱۳	۳۰۰	۲۳/۶۲	۳/۳								
	۱۴	۳۶۰	۲۳/۶۲	۳/۳۲	۶		۲۰/۵					
	۱۵	۴۲۰	۲۳/۶۵	۳/۳۳								
	۱۶	۴۸۰	۲۳/۷۱	۳/۳۹	۶		۲۰/۵					
	۱۷	۵۴۰	۲۳/۷۹	۳/۴۷								
	۱۸	۶۰۰	۲۳/۸۹	۳/۵۷	۶		۲۰/۵					
	۱۹	۶۶۰	۲۳/۷۸	۳/۴۶								
	۲۰	۷۲۰	۲۳/۸۳	۳/۵۱	۶		۲۰/۵					
	۲۱	۷۸۰	۲۳/۸۶	۳/۵۴								
	۲۲	۸۴۰	۲۳/۸۸	۳/۵۶	۶		۲۰/۵					

نام آزمایش کننده : .....

جدول شماره ۳ (ادامه)

برگ آزمایش پمپاژ

پروژه : مطالعات دشت گرگان

نام محل : فوجرد

نام مالک : آب منطقه‌ای مازندران

شماره چاه (U.T.M) : ۲۷۳۹۰۰-۴۰۸۵۷۵۰

تعداد پیزومتر : ۱

موقعیت پیزومتر : .....

فاصله پیزومتر از چاه : ۳۰ متر از چاه اصلی

نوع آزمایش : آبدهی ثابت

عمق چاه : ۹۰ متر

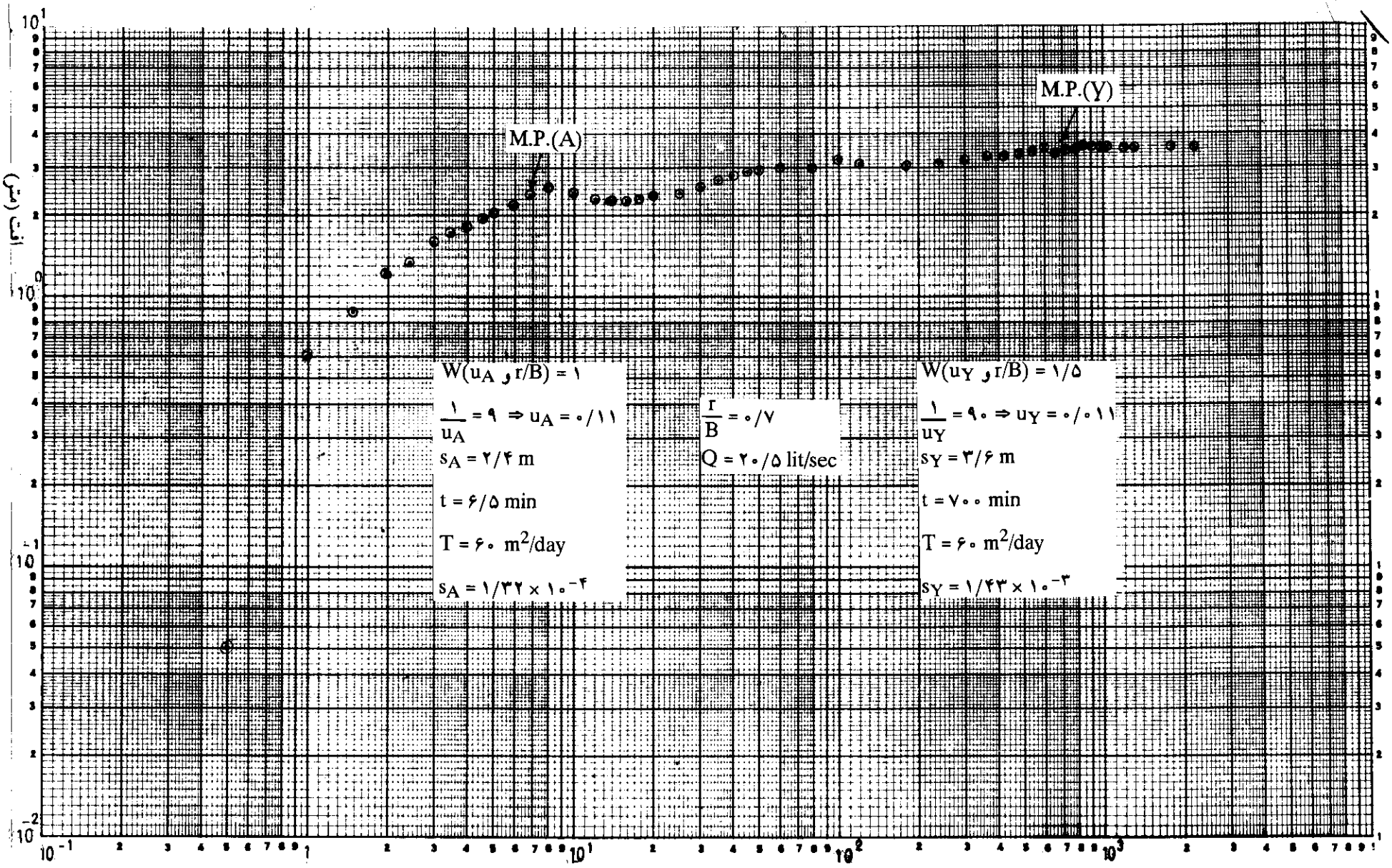
ارتفاع محل : .....

نقطه نشانه اندازه‌گیری : بالای لوله جدار

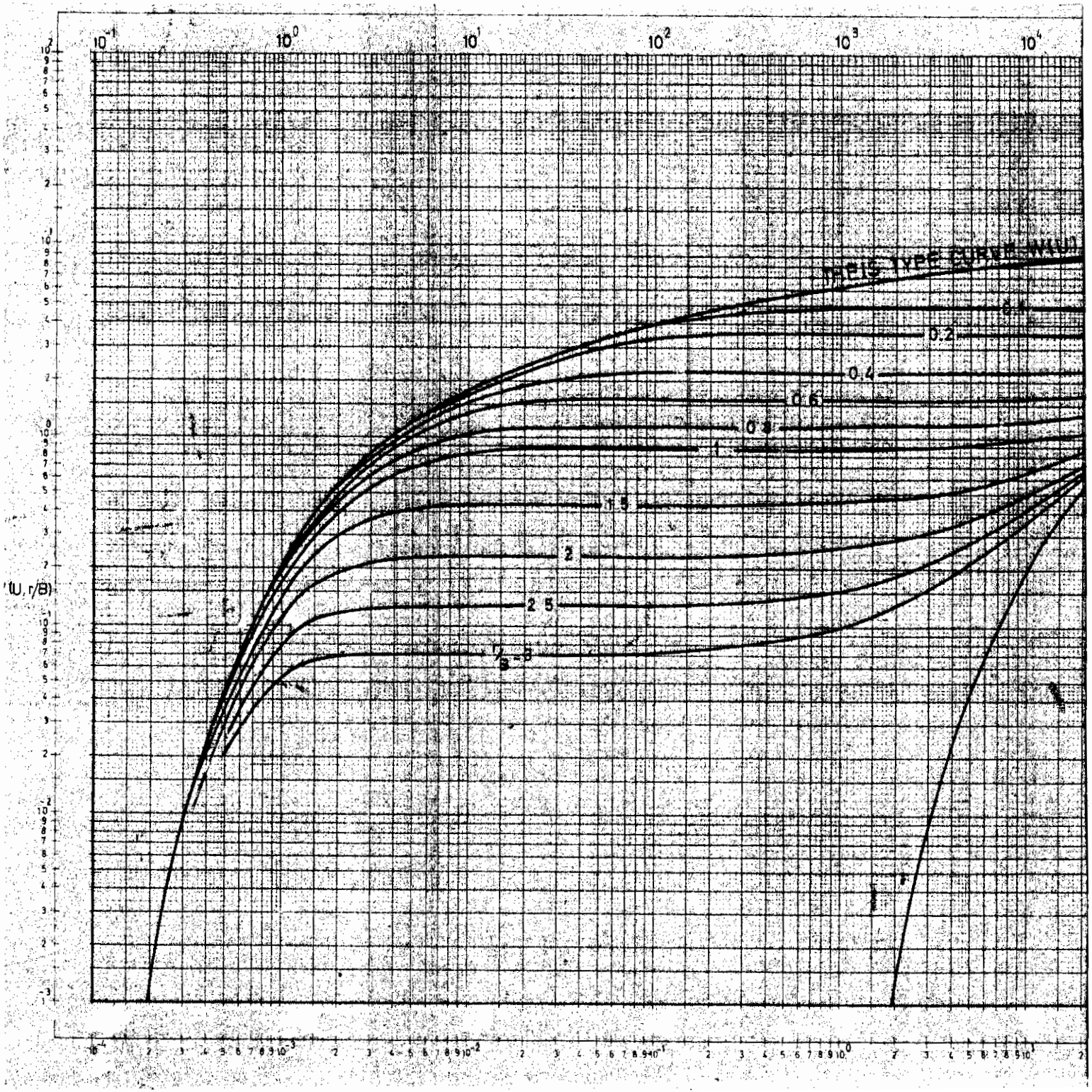
عمق سطح ایستابی : ۲۰/۳۲ متر

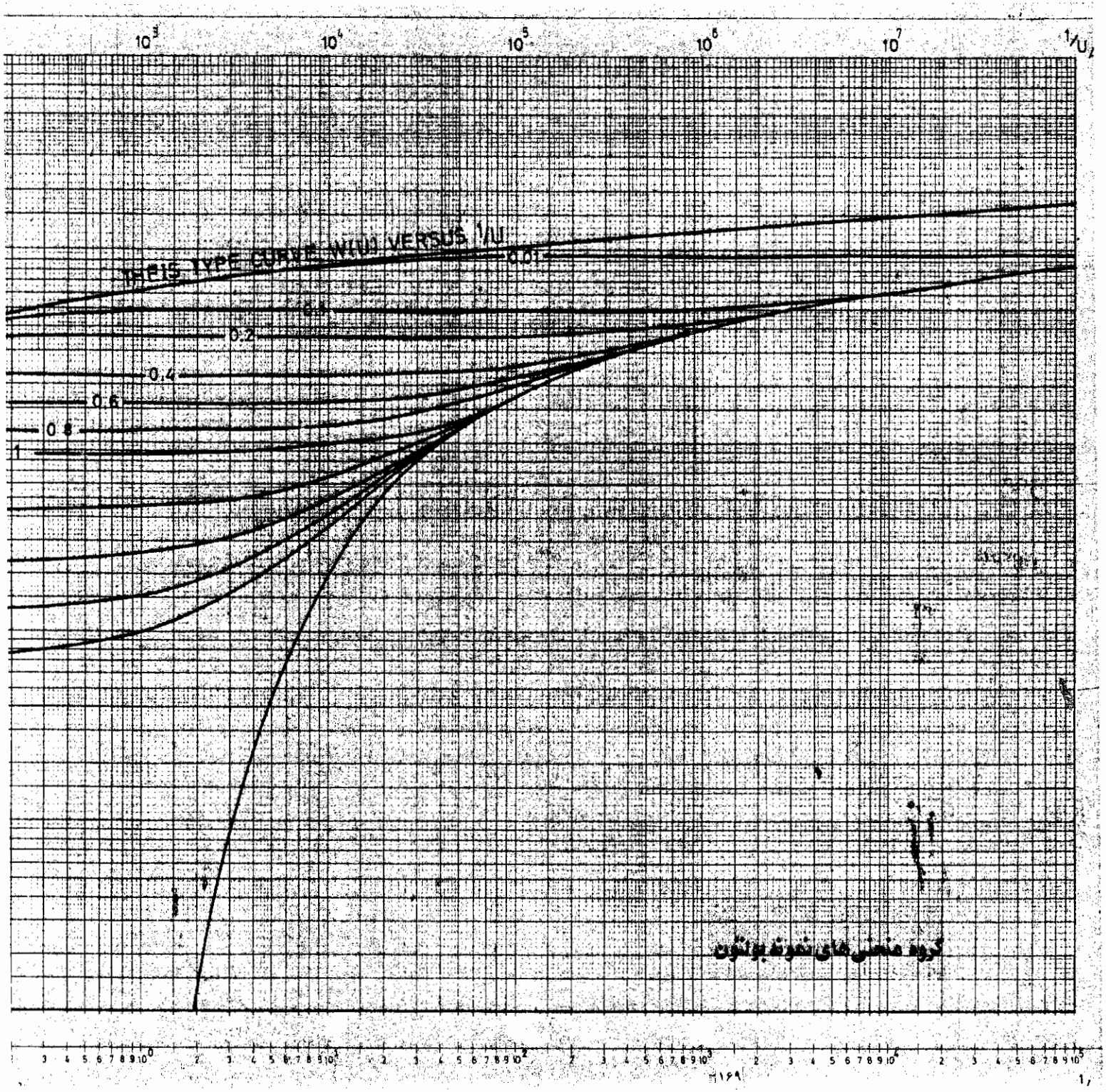
زمان			عمق سطح آب (m)	افت s (m)	روش اندازه‌گیری : ارپیس		آبدهی Q (lit/s)	افت تصحیح شده s_c (m)	$\frac{r^2}{t}$ (m^2/d)	افت باقیمانده s' (m)	$\frac{t}{t'}$	ملاحظات نسبت تبدیل ارپیس دور پمپ و ...
تاریخ	ساعت (hr)	دقیقه (min)			ارتفاع (in)	طول پرش (cm)						
۷۲/۸/۱۴	۲۳	۹۰۰	۲۳/۹	۳/۵۸	۶		۲۰/۵					
	۲۴	۹۶۰	۲۳/۹۱	۳/۵۹	۶		۰					
۷۲/۸/۱۵	۱	۱۰۲۰	۲۳/۸۹	۳/۵۷			۰					
	۲	۱۰۸۰	۲۳/۸۹	۳/۵۷	۶		۰					
	۳	۱۱۴۰	۲۳/۹۲	۳/۶			۰					
	۴	۱۲۰۰	۲۳/۹۲	۳/۶			۰					
	۶	۱۳۲۰	۲۳/۹۲	۳/۶	۶		۰					
	۷	۱۳۸۰	۲۳/۹۵	۳/۶۳			۰					
	۸	۱۴۴۰	۲۳/۹۷	۳/۶۵	۶		۰					

نام آزمایش کننده : .....



شکل ۴- آزمایش افت با آبدهی ثابت در پیزومتر (روش بولتون)


10⁻¹
10⁰
10¹
10²
10³
10⁴
THEIS TYPE CURVE W(u)
0.1
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.5
2
2.5
3
W(u, r/B)


10^3
10^4
10^5
10^6
10^7
$1/U_i$
THEIS TYPE CURVE W(u) VERSUS 1/u
0.01
0.1
0.2
0.4
0.6
0.8
1
گروه منحنی‌های نمونه بوانتون

مثال ۳: تحلیل یک آزمایش پمپاژ در چاه دهانه گشاد

چاه دهانه گشادی با قطر دهانه ۱/۲۰ متر و به عمق ۳۰ متر در دشت افزر در سال ۷۳ با آبدهی ثابت Q = ۱۴/۴ لیتر در ثانیه آزمایش پمپاژ شده است. سطح ایستابی در این چاه قبل از شروع آزمایش ۱۳/۱۰ متر بوده است. مدت زمان آزمایش پمپاژ تا ثابت شدن تقریبی سطح آب در چاه ۲۲۰ دقیقه و حداکثر افت اندازه‌گیری شده در این مدت ۷/۰۳ متر است. بر اساس نتایج به‌دست آمده از مطالعات ژئوفیزیک ضخامت آبرفت در محل چاه ۷۵ متر است. ضرایب هیدرودینامیک آبخوان را محاسبه کنید.

حل :

باتوجه به اینکه حداکثر افت در چاه ۷/۰۳ متر و ضخامت آبرفت در این محل ۷۵ متر است، افت‌های اندازه‌گیری شده حدود ده درصد ضخامت آبرفت است و بنابراین نیازی به تصحیح افت در چاه نبوده و با استفاده از ارقام اندازه‌گیری شده در چاه می‌توان ضرایب هیدرودینامیک را محاسبه کرد. چون قطر چاه زیاد (۱/۲ متر) است بنابراین روش تحلیلی پاپادوپولوس -کوپر انتخاب شده است.

ابتدا ارقام اندازه‌گیری شده افت - زمان (ارقام جدول ۴) روی کاغذ لگاریتمی به نحوی که ارقام افت بر روی محور عرضها قرار گیرد، ترسیم می‌شود (شکل ۵). بر روی کاغذ لگاریتمی دیگری با همان مقیاس و با بهره‌گیری از ارقام جدول ۴-۷ دستورالعمل، منحنی‌های پاپادوپولوس -کوپر بر حسب $F(u_w و \beta)$ و $\frac{1}{u_w}$ قبلاً تهیه شده است. حال با انطباق نمودار بر منحنی‌های نمونه ملاحظه می‌شود که نقاط ترسیم شده در شکل ۵ با منحنی $\beta = ۱۰^{-۳}$ بیشترین پوشش را دارد. در این صورت یک نقطه انطباق (M.P) انتخاب کرده و مقادیر $F(u_w و \beta)$ و $\frac{1}{u_w}$ از روی منحنی استاندارد و مقادیر s و t از روی نمودار شماره ۵ در نقطه انطباق به شرح زیر یادداشت می‌شود :

$F(u_w و \beta) = ۳/۴$ $\qquad s_w = ۲/۶$ متر

$\frac{1}{u_w} = ۶\times۱۰^{۲} \Rightarrow u_w = ۱/۶۷ \times ۱۰^{-۳}$ $\qquad t = ۷$ یا دقیقه $t = ۴/۸۶\times۱۰^{-۳}$ روز

اکنون با استفاده از معادلات ۴-۳۷ و ۴-۳۸ و جایگذاری مقادیر در آنها ضرایب هیدرودینامیک آبخوان محاسبه می‌شود :

$$T = \frac{Q}{4\pi s_w} F(U_w و \beta) = \frac{۱۴/۴\times۱۰^{-۳}\times۸۶۴۰۰}{۴\times۳/۱۴\times۲/۶} \times ۳/۴ = ۱۳۰$$ مترمربع بر روز

با توجه به اینکه چاه در تمامی ضخامت آبرفت حفر نشده T حقیقی آبخوان با استفاده از معادلات ۴-۴۱ و ۴-۴۲ به شرح ذیل به‌دست می‌آید :

$l = ۳۰ - ۱۳/۱ = ۱۶/۹$ متر ضخامت بخش اشباع حفاری شده

$b = ۷۵ - ۱۳/۱ = ۶۹/۱$ متر ضخامت بخش اشباع آبخوان

مترمکعب بر روز بر متر

$\frac{Q}{s} = ۳۷/۷۹$

مترمربع بر روز

$T = ۱۵/۳ (۳۷/۷۹)^{۰/۶۷} \cong ۱۷۵$

ضریب ذخیره آبخوان :

$S = \frac{4TtU_w}{r^2} = ۱/۶ \times ۱۰^{-۲}$

جدول شماره ۴

برگ آزمایش پمپاژ

پروژه : مطالعات دشت افزر

نام محل : دشت افزر یا شرف خلیل

نام مالک : حمزه حمزه‌پور

شماره چاه (U.T.M) : ۱۴۵-۶۹۰-۳۱۴۰

تعداد پیزومتر : .....

موقعیت پیزومتر : .....

فاصله پیزومتر از چاه : .....

نوع آزمایش : افت با آبدهی ثابت

عمق چاه : ۳۰ متر

ارتفاع محل : .....

نقطه نشانه اندازه‌گیری : بالای لوله جدار

عمق سطح ایستابی : ۱۳/۱۰ متر

زمان			عمق سطح آب (m)	افت s (m)	روش اندازه‌گیری : جت		آبدهی Q (lit/s)	افت تصحیح شده s_c (m)	$\frac{r^2}{t}$ (m^2/d)	افت باقیمانده s' (m)	$\frac{t}{t'}$	ملاحظات نسبت تبدیل اریفیس دور پمپ و ...
تاریخ	ساعت (hr)	دقیقه (min)			ارتفاع (in)	طول پرش (m)						
۷۲/۱۲/۱۲	۹	۰	۱۳/۱۰	۰								
		۰/۵	۱۳/۵۰	۰/۴		۰/۴						
		۱	۱۳/۷۱	۰/۶۱		۰/۲۱						
		۱/۵	۱۳/۸۹	۰/۷۹		۰/۱۸						
		۲	۱۴/۱۳	۱/۰۳		۰/۲۴						
		۲/۵	۱۴/۴۰	۱/۳۰		۰/۲۷						
		۳	۱۴/۵۲	۱/۴۲		۰/۱۲						
		۳/۵	۱۴/۷۰	۱/۶۰		۰/۱۸						
		۴	۱۴/۹۰	۱/۸۰		۰/۲						
		۵	۱۵/۲۰	۲/۲		۰/۱۵						
		۶	۱۵/۵۰	۲/۴		۰/۱۵						
		۷	۱۵/۷۴	۲/۶۴		۰/۲۰						
		۸	۱۶/۰۰	۲/۹		۰/۲۴						
		۹	۱۶/۱۳	۳/۰۳		۰/۲۶						
		۱۰	۱۶/۲۷	۳/۱۷		۰/۱۳						
		۱۲	۱۶/۴۶	۳/۳۶		۰/۱۴						
		۱۴	۱۶/۶۵	۳/۵۵		۰/۱۹						
		۱۶	۱۶/۷۲	۳/۶۲		۰/۱۹						
		۱۸	۱۶/۸۵	۳/۷۵		۰/۰۷						
		۲۰	۱۷/۰۰	۳/۹۰		۰/۱۳						
		۲۵	۱۷/۳۱	۴/۲۱		۰/۱۵						

نام آزمایش کننده : .....

جدول شماره ۴ (ادامه)

برگ آزمایش پمپاژ

پروژه : مطالعات دشت افزر

نام محل : دشت افزر یا شرف خلیل

نام مالک : حمزه حمزه‌پور

شماره چاه (U.T.M) : ۱۴۵-۶۹۰-۳۱۴۰

تعداد پیزومتر : .....

موقعیت پیزومتر : .....

فاصله پیزومتر از چاه : .....

نوع آزمایش : افت با آبدهی ثابت

عمق چاه : ۳۰ متر

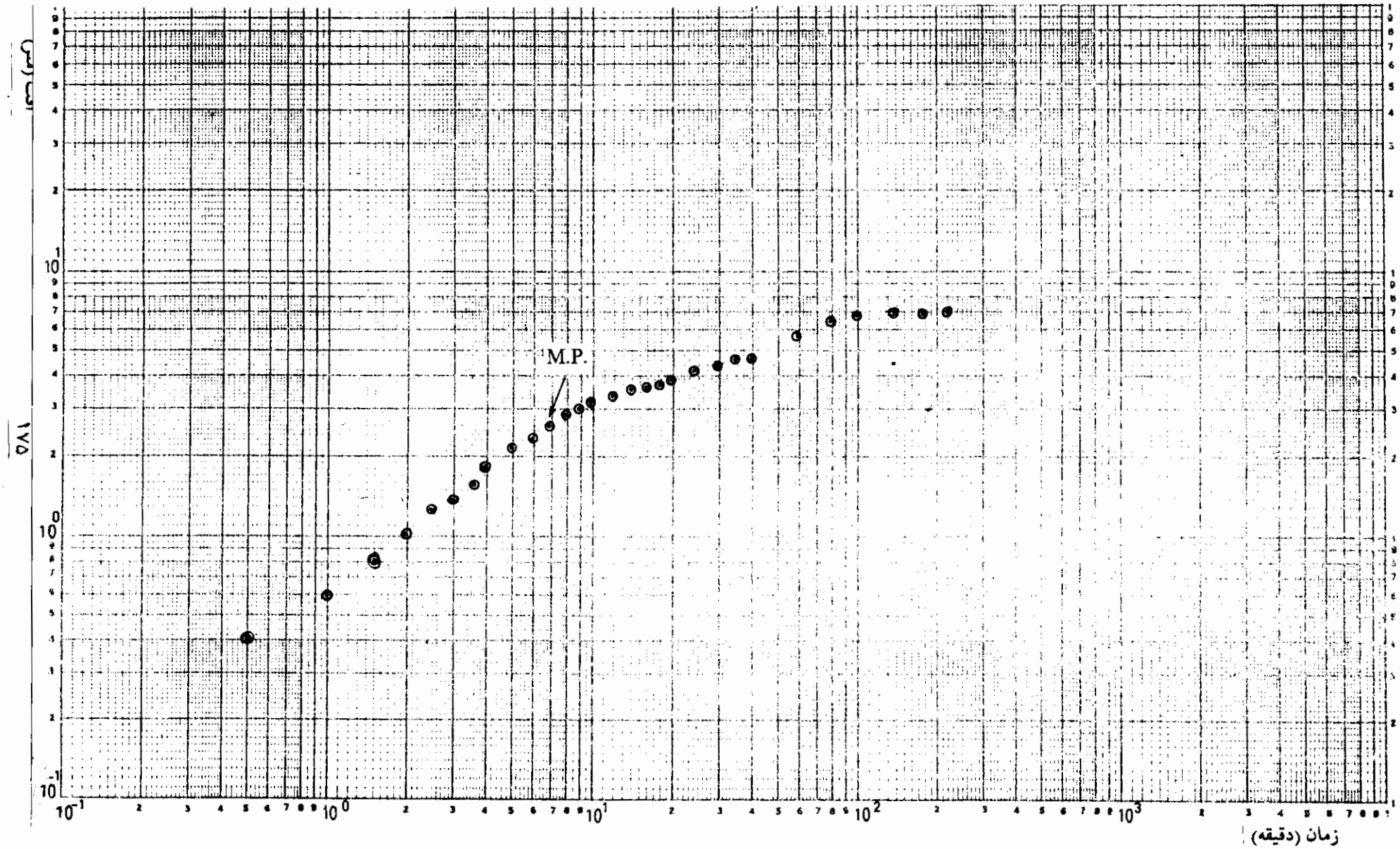
ارتفاع محل : .....

نقطه نشانه اندازه‌گیری : بالای لوله جدار

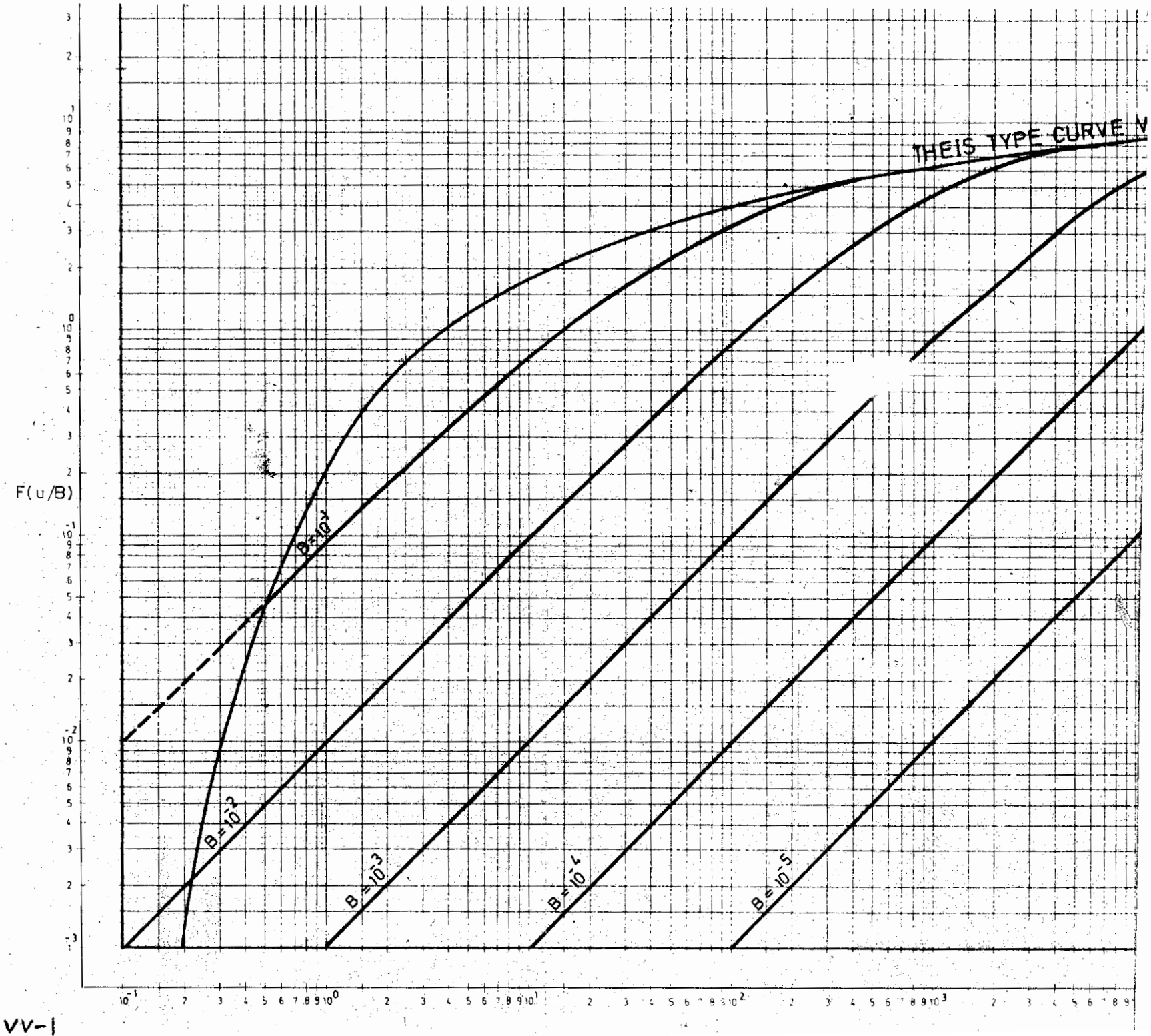
عمق سطح ایستابی : ۱۳/۱۰ متر

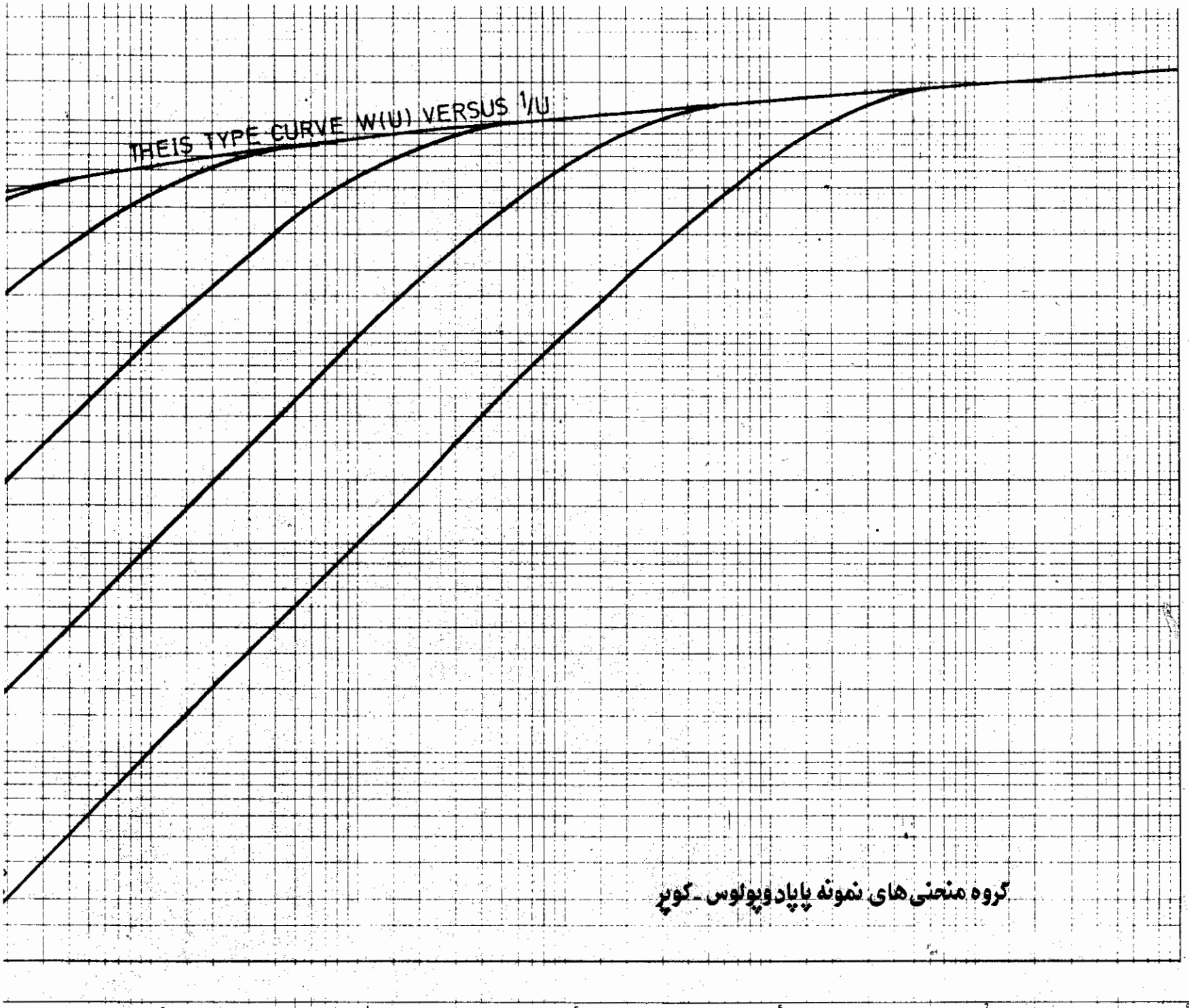
زمان			عمق سطح آب (m)	افت s (m)	روش اندازه‌گیری : جت		آبدهی Q (lit/s)	افت تصحیح شده s_c (m)	$\frac{r^2}{t}$ (m^2/d)	افت باقیمانده s' (m)	$\frac{t}{t'}$	ملاحظات نسبت تبدیل اریفیس دور پمپ و ...
تاریخ	ساعت (hr)	دقیقه (min)			ارتفاع (in)	طول پرش (m)						
۷۲/۱۲/۱۲		۳۰	۱۷/۵۲	۴/۴۲		۰/۳۱						
		۳۵	۱۷/۷۰	۴/۶۰		۰/۱۱						
		۴۰	۱۷/۸۰	۴/۷۰		۰/۱۸						
	۱۰	۶۰	۱۸/۸۸	۵/۷۸		۰/۱						
		۸۰	۱۹/۷۰	۶/۶		۰/۰۸						
		۱۰۰	۲۰/۰۰	۶/۹		۰/۸۲						
		۱۴۰	۲۰/۱۰	۷		۰/۳۰						
	۱۱	۱۸۰	۲۰/۰۷	۶/۹۷		۰/۱						
		۲۲۰	۲۰/۱۳	۷/۰۳								
							۰					

نام آزمایش کننده : .....



شکل ۵- آزمایش افت با آبدهی ثابت در چاه دهانه گشاد ناقص (روش پاپادوپولوس - کوپر)


THEIS TYPE CURVE
F(u/B)
B=10⁻¹
B=10⁻²
B=10⁻³
B=10⁻⁴
B=10⁻⁵



گروه منحنی‌های نمونه پاپادوپولوس ـ کوپر

مثال ۴ : تحلیل یک آزمایش پمپاژ برای آبخوان نشتی :

در اراضی روستای قلعه صدری در ده کیلومتری غرب شهر قم چاهی به عمق ۱۰۲ متر حفاری و در فاصله ۲۹ متری از آن پیزومتری تا همان عمق حفار شده است. پس از توسعه و شستشو و آزمایش افت پله‌ای و برگشت سطح آب به سطح اولیه آزمایش آبدهی ثابت در چاه انجام و اندازه‌گیریهای افت - زمان در چاه و پیزومتر به مدت ۲۴ ساعت انجام و نتایج در جدول ۵ ثبت شده است. آبدهی ثابت چاه در طول مدت آزمایش ۱۲۰ مترمکعب در ساعت و سطح استاتیک در پیزومتر ۲۱/۳۸ متر بوده است. برای به‌دست آوردن ضرایب هیدرودینامیک آبخوان ابتدا با استفاده از ارقام موجود در جدول ۵، مقادیر افت - زمان بر روی کاغذ نیمه‌لگاریتمی ثبت شده است. با ملاحظه روند نقاط به‌دست آمده که به‌صورت S در آمده است (شکل ۶) روش تحلیلی نقطه عطف هانتوش و والتون برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیک انتخاب شده که در ذیل به شرح آن می‌پردازد :

۴-۱ روش نقطه عطف هانتوش :

داده‌های مسئله عبارتند از :

$Q = ۱۲۰$ آبدهی مترمکعب در ساعت

$s_{max} = ۰/۶۶$ حداکثر افت متر

$s_i = \frac{s_{max}}{2} = \frac{۰/۶۶}{۲} = ۰/۳۳$ افت نقطه عطف متر

$t_i = ۴۶$ زمان نقطه عطف دقیقه

باتوجه به مختصات نقطه‌عطف (s_i) این نقطه بر روی شکل ۶ مشخص و خط مستقیمی مماس بر منحنی افت - زمان عبور داده می‌شود. حال مقدار شیب خط مزبور (Δs_i) در یک سیکل لگاریتمی از زمان برابر ۰/۲۵=۰/۳۲-۰/۵۷ Δs_i متر به‌دست می‌آید.

اکنون با استفاده از معادله ۴-۳۶ ، $\frac{s_i}{\Delta s_i} = e^x K_o(x)$ ۲/۳ ، و جایگذاری مقادیر s_i و Δs_i در آن :

$$۲/۳ \frac{۰/۳۳}{۰/۲۵} = ۳/۰۳۶ \cong ۳/۰۴$$

مقدار $e^x K_o(x) = ۳/۰۴$ به‌دست می‌آید.

با مراجعه به جدول ۴-۵ مقادیر $K_o(x)$ و $x = \frac{r}{B}$ بدین شرح به‌دست خواهد آمد :

مقدار ۳/۰۴ مستقیماً در جدول وجود ندارد. بنابراین با درون‌یابی بین ارقام جدول به شرح ذیل :

$e^x K_o(x)$	$K_o(x)$	$x = \frac{r}{B}$
۳/۰۳	۲/۸۴	۰/۰۶۶
۳/۰۶	۲/۸۷	۰/۰۶۴

مقادیر $K_o(x) = ۲/۸۵$ و $x = \frac{r}{B} = ۰/۰۶۵۳$ به‌دست می‌آید.

حال با استفاده از معادله ۴-۳۲ :

$$T = \frac{Q}{4\pi s_i} K_o(x)$$

و با جایگذاری مقادیر به‌دست آمده در معادله فوق :

$$T = \frac{۱۲۰\times۲۴}{۴\times۳/۱۴\times۰/۳۳} \times ۲/۸۵ \cong ۱۹۸۰$$ متر مربع بر روز

ضریب ذخیره با استفاده از معادله :

$$u_i = \frac{r}{2B} = \frac{r^2 S}{4Tt_i} \Rightarrow S = \frac{4Tt_i}{2rB}$$

و جایگذاری مقادیر به‌دست آمده در آن، محاسبه می‌شود :

$$u_i = \frac{r}{2B} = \frac{۰/۰۶۵۳}{۲} = ۰/۰۳۲۶$$

$$S = ۹/۸\times۱۰^{-۳}$$

۴-۲ روش والتون :

در این روش نیز با استفاده از ارقام جدول ۵ که در پیزومتر اندازه‌گیری شده، مقادیر افت و زمان بر روی کاغذ لگاریتمی ثبت می‌شود (شکل ۷). اکنون پس از انطباق این نمودار با دسته منحنی‌های تیپ که قبلاً با استفاده از جدول ۴-۶ دستورالعمل و در همان مقیاس تهیه شده و انتخاب یک نقطه انطباق در آن، مقادیر افت و زمان از روی نمودار ۷ و مقادیر r/B، $W(u)$ و u از منحنی نمونه به شرح ذیل مشخص شده است :

$s = ۰/۶۶$ متر

$t = ۱۲۶۰$ روز ۰/۸۷۵ یا دقیقه

$W\left(u, \frac{r}{B}\right) = ۵$

$u = ۱/۶۷\times۱۰^{-۳}$

$\frac{r}{B} = ۰/۰۷$

(نقاط پیاده شده بر روی نمودار بین منحنی $\frac{r}{B} = ۰/۱$ و $\frac{r}{B} = ۰$ و نزدیک به منحنی $\frac{r}{B} = ۰/۱$ قرار می‌گیرد و بنابراین با درون‌یابی مقدار آن به‌دست آمده است)

بنابراین با استفاده از معادله ۴-۳۰ T برابر است با :

$$T = \frac{Q}{4\pi s} W\left(u, \frac{r}{B}\right)$$

و جایگذاری مقادیر Q، s و $W\left(u, \frac{r}{B}\right)$ در آن مقدار $T = \frac{۱۲۰ \times ۲۴ \times ۵}{۴ \times ۳/۱۴ \times ۰/۶۶} \cong ۱۷۳۷$ مترمربع بر روز محاسبه شده است.

ضریب ذخیره با استفاده از معادله ۴-۳۱ :

$$S = \frac{r^2}{4Ttu} = ۱/۲ \times ۱۰^{-۲}$$

ملاحظه می‌شود که مقادیر S و T به‌دست آمده از هر دو روش بسیار به یکدیگر نزدیک هستند بنابراین مقادیر نهایی ضرایب هیدرودینامیک در این آزمایش عبارتند از :

$T =$ متر مربع بر روز ۱۸۵۰

$S = ۱۰^{-۲}$

جدول شماره ۵

برگ آزمایش پمپاژ

پروژه : مطالعات آبهای زیرزمینی دشت قم
تعداد پیزومتر : یک
عمق چاه : ۱۰۲ متر

نام محل : قلعه صدری
موقعیت پیزومتر : شرق چاه اکتشافی
ارتفاع محل : .....

نام مالک : وزارت نیرو
فاصله پیزومتر از چاه : ۲۹ متر
نقطه نشانه اندازه‌گیری : .....

شماره چاه (U.T.M) : ۴۰۹۰-۳۱۰۰۰۰
نوع آزمایش : آبدهی ثابت (افت در پیزومتر)
عمق سطح ایستابی : ۲۱/۳۸ متر

زمان			عمق سطح آب (m)	افت s (m)	روش اندازه‌گیری : جت		آبدهی Q (lit/s)	افت تصحیح شده s_c (m)	$\frac{t}{r^2}$ (day/m^2)	افت باقیمانده s' (m)	$\frac{t}{t'}$	ملاحظات نسبت تبدیل اریفیس دور پمپ و ...
تاریخ	ساعت (hr)	دقیقه (min)			ارتفاع (in)	طول پرش (cm)						
۶۷/۸/۳	۹	۰	۲۱/۳۸۰	۰		۴۶	۳۳/۳۳					
		۱	۲۱/۳۹۵	۰/۰۱۵		"	"					
		۱/۵	۲۱/۴۰۰	۰/۰۲		"	"					
		۲	۲۱/۴۰۵	۰/۰۲۵		"	"					
		۳	۲۱/۴۱۵	۰/۰۳۵		"	"					
		۴	۲۱/۴۲۰	۰/۰۶		"	"					
		۵	۲۱/۴۲۵	۰/۰۶۵		"	"					
		۶	۲۱/۴۶۰	۰/۰۸۰		"	"					
		۷	۲۱/۴۷۵	۰/۰۹۵		"	"					
		۸	۲۱/۴۹۰	۰/۱۱		"	"					
		۹	۲۱/۵۰۵	۰/۱۲۵		"	"					
		۱۰	۲۱/۵۱۰	۰/۱۳		"	"					
		۱۲	۲۱/۵۳۵	۰/۱۵۵		"	"					
		۱۴	۲۱/۵۷۰	۰/۱۹۰		"	"					
		۱۶	۲۱/۵۸۵	۰/۲۰۵		"	"					
		۱۸	۲۱/۵۹۵	۰/۲۱۵		"	"					
		۲۰	۲۱/۶۰۵	۰/۲۲۵		"	"					
		۲۵	۲۱/۶۳۰	۰/۲۵۰		"	"					
		۳۰	۲۱/۶۵۰	۰/۲۷۰		"	"					
		۴۰	۲۱/۷۰۰	۰/۳۲۰		"	"					
		۵۰	۲۱/۷۳۰	۰/۳۵۰		"	"					

نام آزمایش کننده : .....

جدول شماره ۵ (ادامه)

برگ آزمایش پمپاژ

پروژه : مطالعات آبهای زیرزمینی دشت قم
تعداد پیزومتر : یک
عمق چاه : ۱۰۲ متر

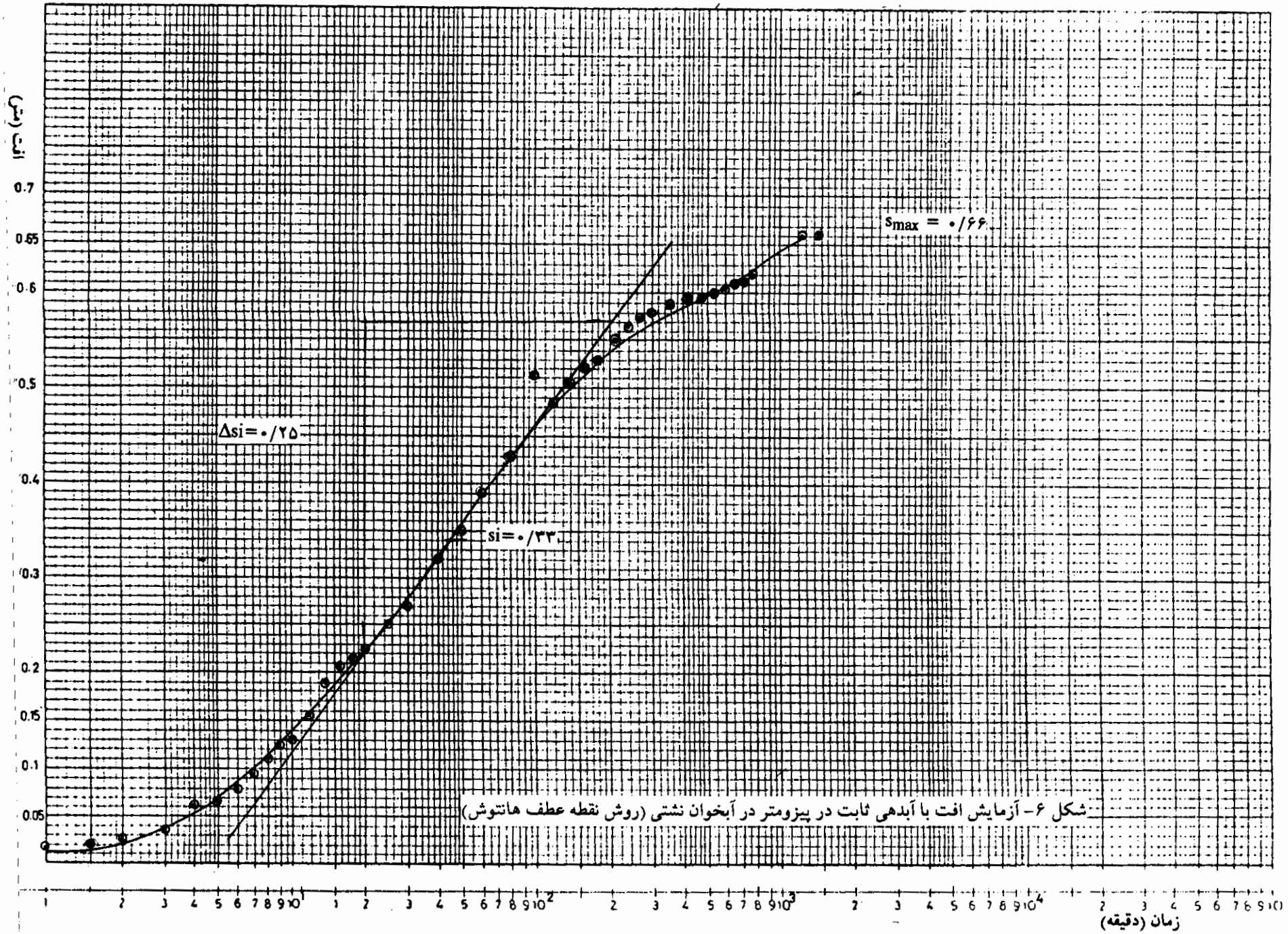
نام محل : قلعه صدری
موقعیت پیزومتر : شرق چاه اکتشافی
ارتفاع محل : .....

نام مالک : وزارت نیرو
فاصله پیزومتر از چاه : ۲۹ متر
نقطه نشانه اندازه‌گیری : .....

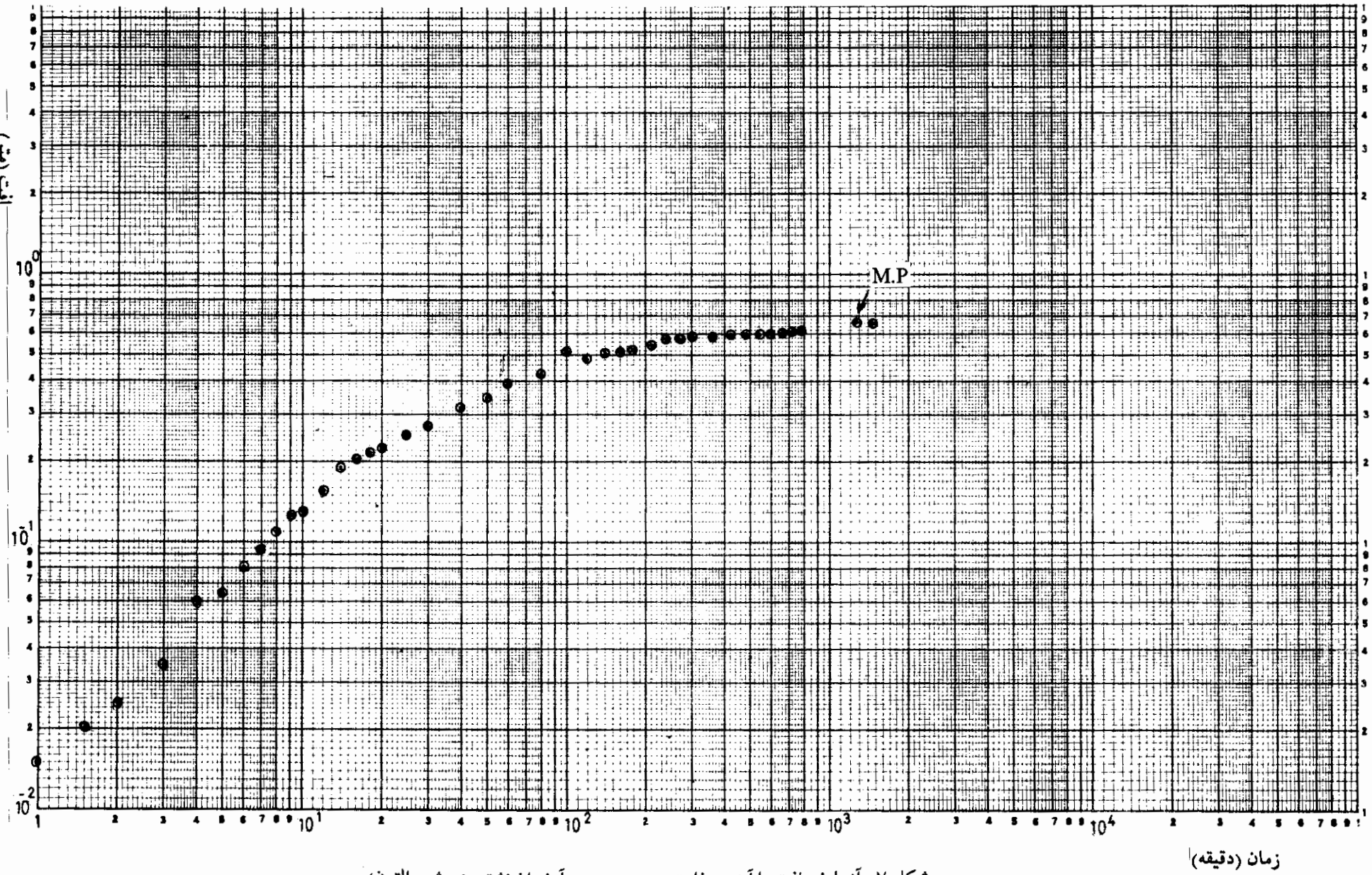
شماره چاه (U.T.M) : ۴۰۹۰-۳۱۰۰۰۰
نوع آزمایش : آبدهی ثابت (افت در پیزومتر)
عمق سطح ایستابی : ۲۱/۳۸ متر

زمان			عمق سطح آب (m)	افت s (m)	روش اندازه‌گیری : جت		آبدهی Q (lit/s)	افت تصحیح شده s_c (m)	$\frac{t}{r^2}$ (day/m^2)	افت باقیمانده s' (m)	$\frac{t}{t'}$	ملاحظات نسبت تبدیل اریفیس دور پمپ و ...
تاریخ	ساعت (hr)	دقیقه (min)			ارتفاع (in)	طول پرش (cm)						
	۱۰	۶۰	۲۱/۷۷۰	۰/۳۹۰		۴۶	۳۳/۳۳					
		۸۰	۲۱/۸۱۰	۰/۴۳		"	"					
		۱۰۰	۲۱/۸۹۰	۰/۵۱		"	"					
	۱۱	۱۲۰	۲۱/۸۶۵	۰/۴۸۵		"	"					
		۱۴۰	۲۱/۸۸۵	۰/۵۰۵		"	"					
		۱۶۰	۲۱/۹۰۰	۰/۵۲۰		"	"					
	۱۲	۱۸۰	۲۱/۹۱۰	۰/۵۳۰		"	"					
		۲۱۰	۲۱/۹۳۰	۰/۵۵۰		"	"					
	۱۳	۲۴۰	۲۱/۹۴۵	۰/۵۶۵		"	"					
		۲۷۰	۲۱/۹۵۵	۰/۵۷۵		"	"					
	۱۴	۳۰۰	۲۱/۹۶۰	۰/۵۸۰		"	"					
	۱۵	۳۶۰	۲۱/۹۷۰	۰/۵۹۰		"	"					
	۱۶	۴۲۰	۲۱/۹۷۵	۰/۵۹۵		"	"					
	۱۷	۴۸۰	۲۱/۹۷۵	۰/۵۹۵		"	"					
	۱۸	۵۴۰	۲۱/۹۸۰	۰/۶۰۰		"	"					
	۱۹	۶۰۰	۲۱/۹۸۵	۰/۶۰۵		"	"					
	۲۰	۶۶۰	۲۱/۹۹۰	۰/۶۱۰		"	"					
	۲۱	۷۲۰	۲۱/۹۹۰	۰/۶۱۰		"	"					
	۲۲	۷۸۰	۲۲/۰۰	۰/۶۲۰		"	"					
۶۷/۸/۳	۶	۱۲۶۰	۲۲/۰۴۰	۰/۶۶۰		"	"					
	۹	۱۴۴۰	۲۲/۰۴۰	۰/۶۶۰		"	"					

نام آزمایش کننده : .....



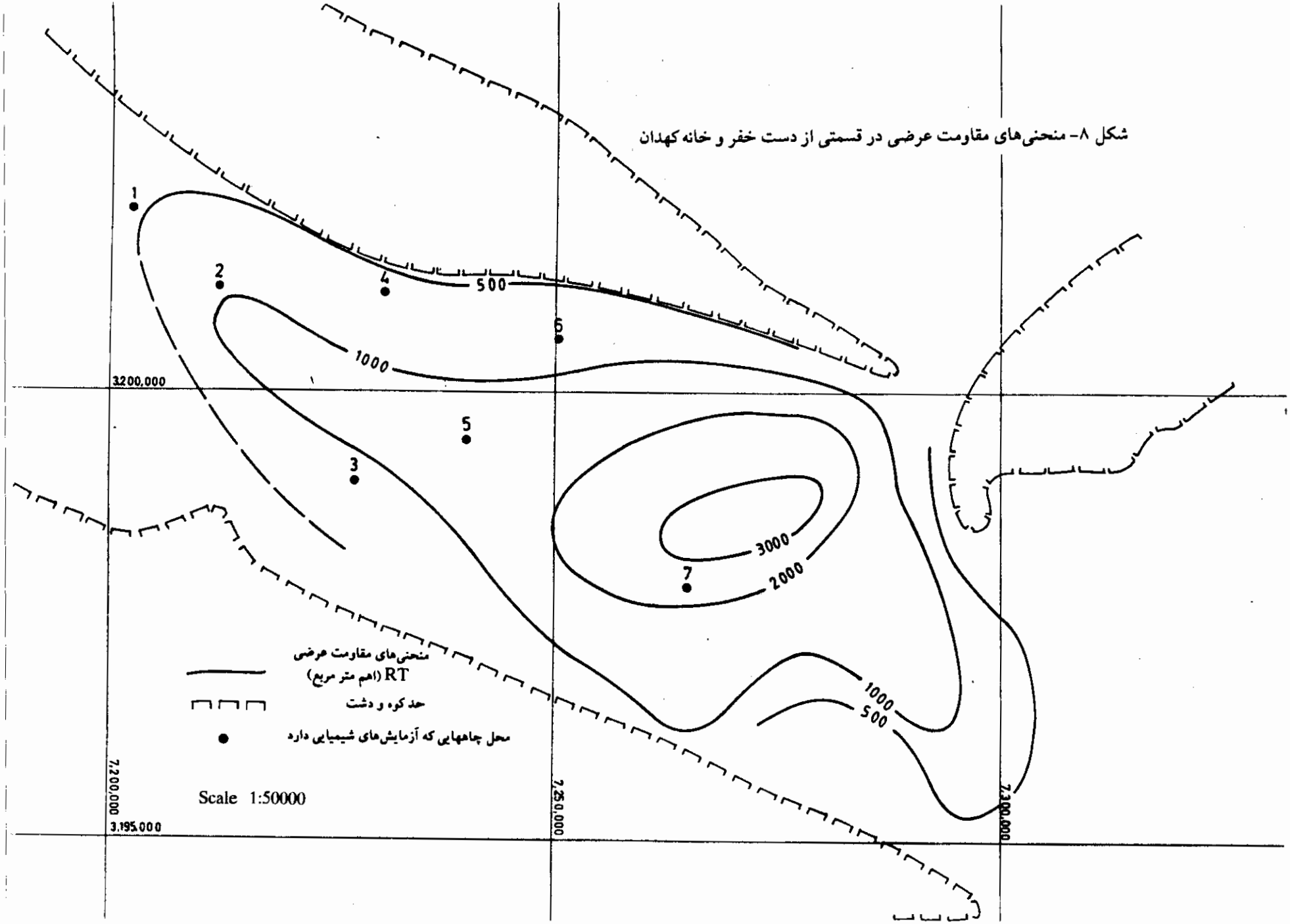
شکل ۶- آزمایش افت با آبدهی ثابت در پیزومتر در آبخوان نشتی (روش نقطه عطف هانتوش)



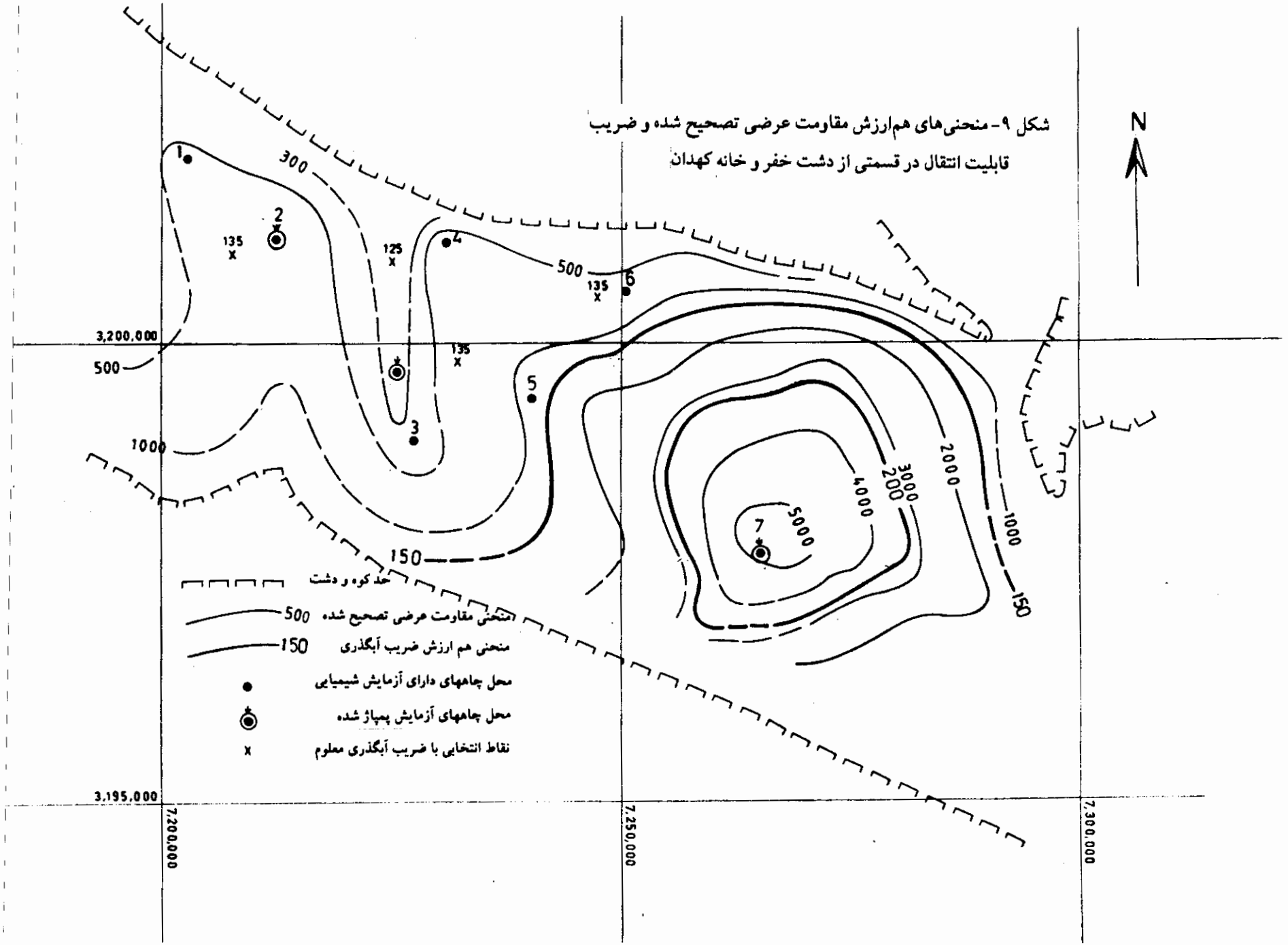
شکل ۷- آزمایش افت با آبدهی ثابت در پیزومتر در آبخوان نشتی (روش والتون)

W(u, r/B)
r/B = 0.6
r/B = 0.8
r/B = 1.0
r/B = 1.2
r/B = 1.4
r/B = 1.6
r/B = 1.8
r/B = 2.0
r/B = 2.5
r/B = 3.0
r/B = 3.5
r/B = 4.0
r/B = 4.5
r/B = 5.0
r/B = 6.0
r/B = 7.0
r/B = 8.0
r/B = 9.0
r/B = 10.0
1/u

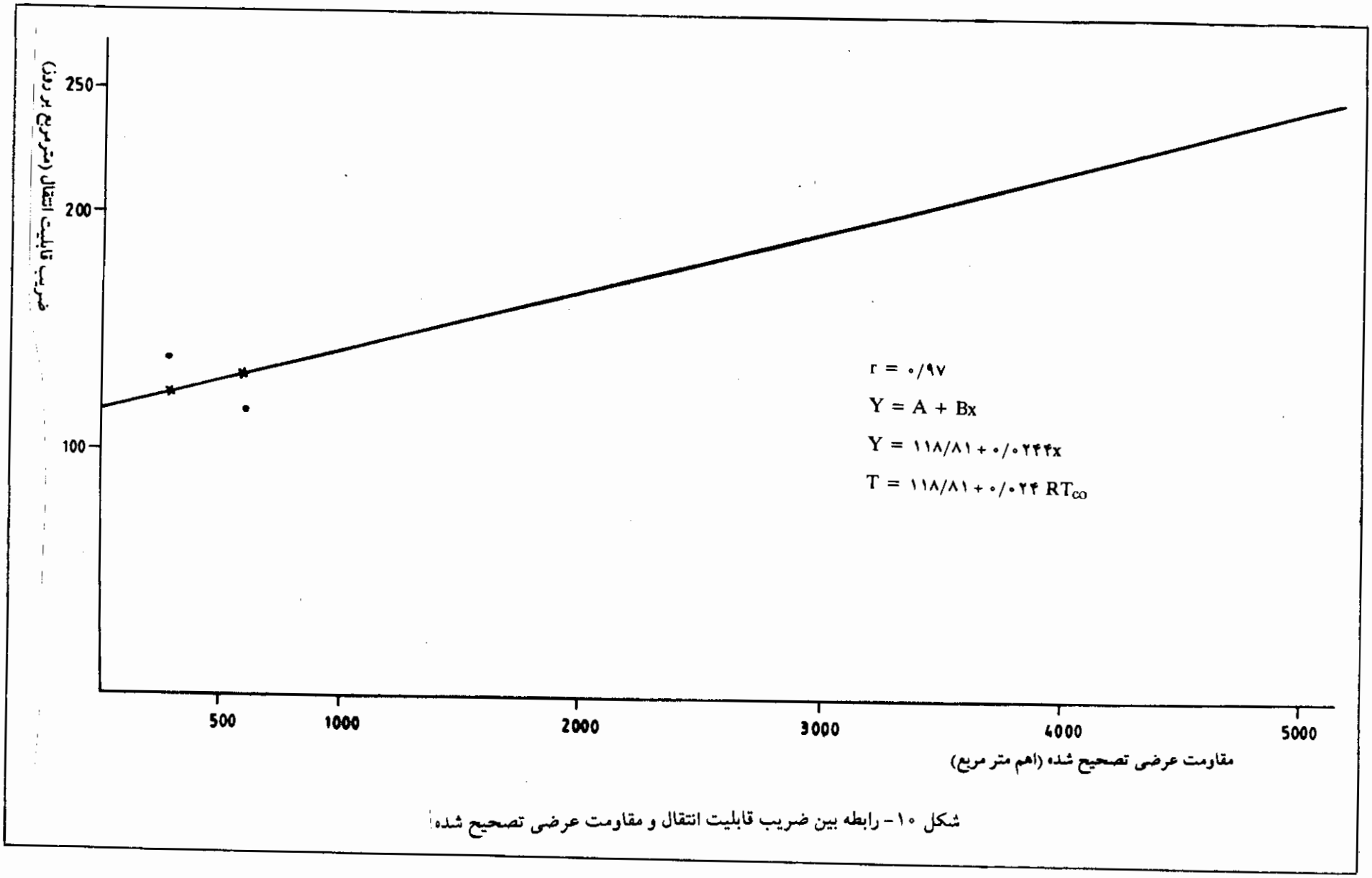
W(u, r/B)
r/B = 0.2
r/B = 0.4
r/B = 0.6
r/B = 0.8
r/B = 1.0



شکل ۸- منحنی‌های مقاومت عرضی در قسمتی از دست خفر و خانه کهدان



شکل ۹- منحنی‌های هم‌ارزش مقاومت عرضی تصحیح شده و ضریب قابلیت انتقال در قسمتی از دشت خفر و خانه کهدان



شکل ۱۰ - رابطه بین ضریب قابلیت انتقال و مقاومت عرضی تصحیح شده

مثال ۶: برآورد ضریب قابلیت انتقال با استفاده از خطوط هم‌پتانسیل در لوله‌های جریان

نقشه خطوط هم‌تراز آب زیرزمینی بخشی از آبخوان دشت ورامین در شکل ۱۱ نشان داده شده است. ضریب قابلیت انتقال آبخوان در قطعه شماره ۱ لوله جریان برابر ۱۵۰۰۰ مترمربع در روز از طریق آزمایش پمپاژ به‌دست آمده است. حال مقادیر ضریب قابلیت انتقال را در قطعات موجود در یک لوله جریان محاسبه کنید :

حل : باتوجه به این‌که جهت جریان آب زیرزمینی از قطعه شماره ۱ به طرف قطعه شماره ۸ است، برای محاسبه T در قطعات مختلف با استفاده از معادله

$$T = \frac{q_B\, L_B\, W_A\, \Delta H_A}{q_A\, L_A\, W_B\, \Delta H_B} \times T_A$$

مقدار ضریب قابلیت انتقال هر قطعه واقع در پایین‌دست جریان مورد محاسبه قرار می‌گیرد.

که در آن :

T_B = ضریب قابلیت انتقال در قطعه پایین‌دست

T_A = ضریب قابلیت انتقال در قطعه بالادست

L_B = میانگین طول قطعه پایین‌دست (میانگین فاصله دو خط هم‌پتانسیل در قطعه B)

L_A = میانگین طول قطعه بالادست (میانگین فاصله دو خط هم‌پتانسیل در قطعه A)

W_B = عرض میانگین قطعه پایین‌دست (میانگین فاصله بین دو خط جریان در قطعه B)

W_A = عرض میانگین قطعه بالادست (میانگین فاصله بین دو خط جریان در قطعه A)

q_B = گذر حجمی جریان در قطعه پایین‌دست

q_A = گذر حجمی جریان در قطعه بالادست

ΔH = اختلاف رقوم منحنی‌های تراز واقع در حد بالایی و پایینی هر قطعه

$\frac{q_B}{q_A}$ بیانگر تغییرات نسبی بده در لوله جریان بین قطعه B و A و تحت تأثیر تخلیه و تغذیه است که در هر قطعه وجود دارد. تخلیه یا برداشت از هر قطعه معمولاً مشتمل بر برداشت توسط انواع چاهها (کشاورزی، شرب و صنعت)، تخلیه بوسیله قنوات و چشمه‌ها، تبخیر از آبخوان و زهکشی از آن است. تغذیه هر قطعه شامل نفوذ از کانالها و آبهای سطحی موجود در هر قطعه، آب برگشتی حاصل از برداشت چاهها، قنوات و چشمه‌ها، نفوذ مستقیم حاصل از ریزش‌های جوی بر روی هر قطعه به آبخوان است.

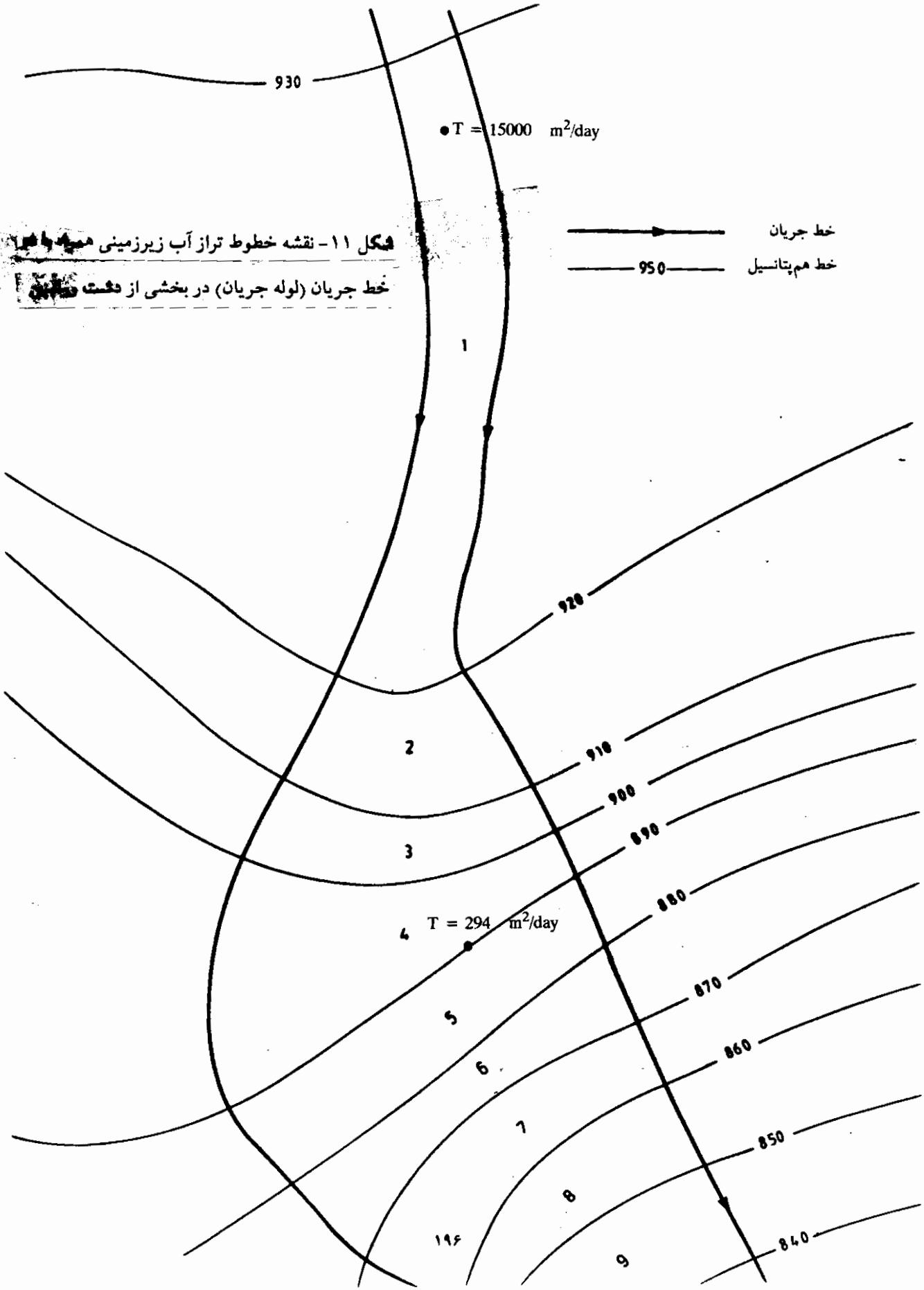
در این بخش از دشت ورامین مجموع مقادیر برداشت و میزان تغذیه به هر قطعه ناشی از کلیه عوامل فوق قبلاً محاسبه شده و نتیجه به همراه سایر مشخصات قطعات در جدول شماره ۷ ارائه شده است.

لازم به توضیح است که میزان آبدهی عبوری از قطعه ۱ باتوجه به ضریب قابلیت انتقال محاسبه شده از طریق پمپاژ و باتوجه به مجموع میزان برداشت و تغذیه این قطعه که در جدول فوق به ترتیب برابر ۱۸۶۵۷/۵ و ۱۱۰۱۳/۷ مترمکعب در روز است، محاسبه شده. بنابراین برای محاسبه بده عبوری از قطعات بعدی مقادیر برداشت و تغذیه این قطعات مدنظر قرار داده شده و با بهره‌گیری از معادله فوق مقادیر ضریب قابلیت انتقال در هر یک از قطعات به‌دست آمده است.

همانگونه در جدول ۷ آشکار است مقدار ضریب قابلیت انتقال محاسبه شده در قطعات ۴ و ۵که به ترتیب برابر ۳۸۹ و ۲۰۹ متر مربع بر روز از طریق محاسبه به‌دست آمده و میانگین آن برابر ۲۹۹ است با مقدار ضریب قابلیت انتقال یک حلقه چاه واقع در حد فاصل این قطعات که از طریق آزمایش پمپاژ برابر ۲۹۴ مترمربع در روز به‌دست آمده هماهنگی دارند و این امر بیانگر صحت محاسبات انجام شده برای برآورد مقادیر ضریب قابلیت انتقال در قطعات مختلف به روش لوله‌های جریان است.

جدول ۷- مجموع میزان تخلیه، تغذیه و ضریب قابلیت انتقال در قطعات مختلف یک لوله جریان در بخشی از دشت ورامین

شماره قطعه	عرض میانگین قطعه (W) (متر)	طول میانگین قطعه (L) (متر)	افت ایستابی یا پیزومتریک (ΔH) (متر)	میزان تغذیه به قطعه (مترمکعب‌بر‌روز)	میزان برداشت از قطعه (مترمکعب‌بر‌روز)	گذر حجمی جریان در قطعه (مترمکعب‌بر‌روز)	ضریب‌قابلیت انتقال قطعه (مترمربع‌بر‌روز)
۱	۹۵۰	۷۴۰۰	۱۰	۱۱۰۱۳/۷	۱۸۶۵۷/۵	۱۹۲۵۶/۸	۱۵۰۰۰
۲	۲۲۰۰	۱۴۰۰	۱۰	۳۴۲۴/۷	۷۰۱۳/۷	۱۱۶۱۳	۷۳۹
۳	۳۳۰۰	۸۵۰	۱۰	۱۹۷۲/۶	۲۵۴۷/۹	۱۱۰۳۷/۷	۲۸۴
۴	۴۳۰۰	۱۵۵۰	۱۰	۵۳۹۷/۲	۵۶۴۳/۸	۱۰۷۹۱/۱	۳۸۹
۵	۴۷۰۰	۹۳۰	۱۰	۶۴۹۳/۱	۶۷۳۹/۷	۱۰۵۴۴/۵	۲۰۹
۶	۴۳۵۰	۸۰۰	۱۰	۱۴۲۴/۷	۱۰۹/۶	۱۰۲۹۷/۹	۱۹۰
۷	۳۹۰۰	۹۵۰	۱۰	۳۲۰۵/۵	۵۲۸۷/۷	۱۱۶۱۳	۲۸۴
۸	۳۳۰۰	۹۰۰	۱۰	۲۵۲۰/۵	۲۵۴۷/۹	۹۵۳۰/۸	۲۶۰



شکل ۱۱ - نقشه خطوط تراز آب زیرزمینی [illegible]

خط جریان (لوله جریان) در بخشی از دشت [illegible]

٦- منابع و مآخذ

6-1 Bouwer Herman, Groundwater Hydrology, International Students Edition, Mc Graw-Hill Inc, 1978.

6-2 Driscoll Fletcher G., Groundwater and Wells, second Edition, Johnson Filtration Inc, 1989.

6-3 Fetter, C.W., Applied Hydrogeology, Third Edition, prentice hall, Englewood cliffs, NJ 07632, 1994.

6-4 Groundwater Manual, U.S Department of the Interior,1981

6-5 Kruseman G.P. and N.A.De Ridder, Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, third Edition, International nstitute of Land Reclamation and Improvement / ILRI, Wageningen the Netherlands, 1976.

6-6 Raghunath H.M., 1983 Ground Water

6-7 Todd, David keith, Groundwater Hydrology, Second Edition, John Wiley & sons, 1980.

6-8 Walton, William C., Groundwater Resource Evaluation, International Student Edition, MC Graw-Hill Kogakusha LTD., 1970.

6-9 Mc Whorter David B. and Daniel K. Sunada, 1984 Ground - Water Hydrology and Hydraulics.