فصل یازدهم

استخراج آبهای زیرزمینی

کلیات	آزمایشهای پمپاژ
چاه و خصوصیات آن	آزمایش پمپاژ درلایه‌های محصور
جریان‌شعاعی آب درچاه‌دروضعیت‌ماندگار	آزمایش پمپاژ در لایه‌های آزاد
جریان‌شعاعی‌درلایه‌های‌آزاد	تغذیه مصنوعی آبهای زیرزمینی
جریان‌شعاعی‌درلایه‌های‌محصور	تداخل آب شور
زمان پیمایش آب در زیرزمین	مسائل
جریان‌شعاعی‌درچاه در حالت غیرماندگار	منابع برای مطالعه بیشتر

۱-۱۱ کلیات

بهره‌برداری از آبهای زیرزمینی توسط چاه و قنات پیشه قدیمی ایرانیان بوده است. قنات عبارت از یک گالری افقی یا تونل زیرزمینی می‌باشد که در دامنه‌های آبرفتی حفر می‌شود. قسمتی از این تونل در زیر سطح ایستابی واقع شده و بخشی دیگر از تونل که آب را به سطح زمین هدایت می‌کند در بالای سطح ایستابی قرار گرفته است. در واقع قنات مجموعه‌ای از چند میله (چاه) و یک کوره (تونل) زیرزمینی است که با شیبی کمتر از شیب سطح زمین آب موجود در لایه‌های آبدار مناطق مرتفع زمین را به کمک نیروی ثقل وبدون کاربرد نیروی کشش و هیچ نوع انرژی الکتریکی یا حرارتی با جریان طبیعی جمع‌آوری کرده و به نقاط پایین‌تر می‌رساند. به عبارت دیگر قنات را می‌توان نوعی زهکش دانست که آب جمع‌آوری شده توسط این زهکش به سطح زمین آورده می‌شود.

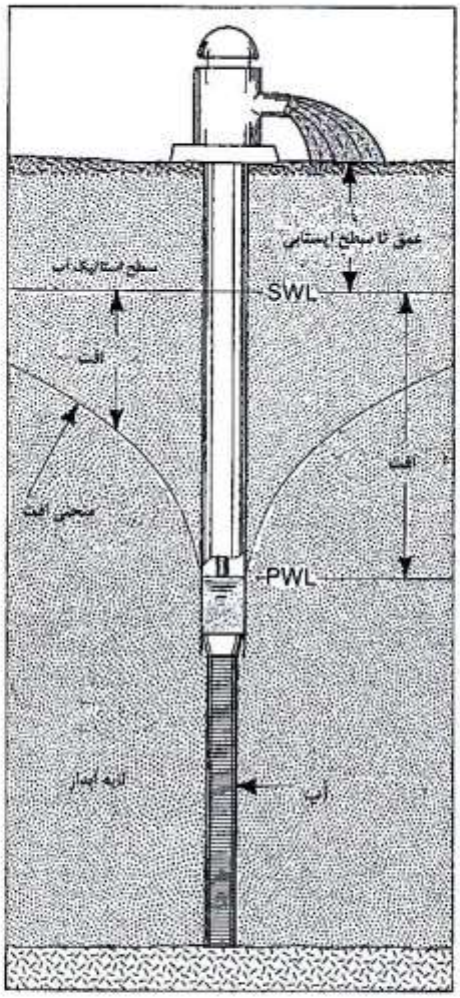
در مورد تعداد قنوات موجود در ایران ارقام متفاوتی ذکر شده است. بنظر می‌رسد در ایران ۳۱۰۰۰ رشته قنات وجود داشته باشد که سالانه ۱۰ میلیارد متر مکعب آب زیرزمینی را از لایه‌های آبدار خارج می‌سازند. استان خراسان با بیش از ۱۱۰۰۰ رشته قنات بالاترین تعداد را در سطح کشور دارا می‌باشد. برخی از قناتهای این استان مانند قنات سناباد مشهد از ۱۲۰۰ سال قبل دایر بوده است. عمق اولین چاه (مادر چاه) در قنات بیدخت گناباد ۳۵۰ متر و در قنات

کیخسرو بجستان بیش از ۴۰۰ متر می‌باشد. آبدهی برخی قنات‌ها در ایران کم و حدود یکی دو لیتر در ثانیه است. در حالی که برخی دیگر مانند قنات قصبه گناباد بیش از ۳۵۰ لیتر در ثانیه آبدهی دارند. طول گالری قنات در بعضی موارد مانند قنات گناباد متجاوز از ۷۰ کیلومتر است. اگر توجه کنیم که طول گالری قنات‌های موجود در ایران بین ۱۶۰ تا ۳۵۰ هزار کیلومتر تخمین زده شده است متوجه خواهیم شد که طی ۳۰۰۰ الی ۴۰۰۰ سال گذشته چه هزینه و انرژی هنگفتی در این زمینه بکار گرفته شده است.

قناتها تا ۵۰ سال قبل در ایران بخوبی کارآیی داشته و مورد استفاده قرار می‌گرفتند. زیرا در اکثر لایه‌های آبدار میزان تغذیه طبیعی بمراتب بیشتر و یا حداقل در حدّ استخراج آب توسط قنات بود. اما با ورود فناوری چاه و پمپ که در مدت بسیار کوتاه این امکان را بوجود می‌آورد که در هر نقطه مورد نظر چاهی را حفر و آب استخراج کرد بتدریج سطح ایستابی در اکثر دشت‌ها افت پیدا کرد و گالری قناتها بعنوان تونل‌های خشک در بالای سطح ایستابی قرار گرفتند. بدین ترتیب اکثر قناتها خشک و از چرخه استفاده خارج شدند. تلاش برای بالا آوردن سطح ایستابی و احیاء قناتهای خشک شده نیز تقریباً بدون نتیجه بوده است. بطوریکه امروزه چاه بعنوان اساسی‌ترین ابزار استفاده از آبهای زیرزمینی در آمده است. اما استخراج بیش از حد آبهای زیرزمینی توسط چاهها نیز باعث گردیده است که آبدهی آنها کاهش پیدا کرده و تعداد زیادی از آنها نیز خشک و یا شور شوند. خشک شدن و یا عدم کارآیی چاهها بعضاً به دلایل فنی ناشی از مراعات نکردن ضوابط هیدرولیکی آبهای زیرزمینی و چاه است. برنامه‌ریزی مناسب برای استفاده از آبهای زیرزمینی توسط چاه و یا تلفیق آبهای سطحی و زیرزمینی از وظایف هیدرولوژیست‌هاست. بنابراین یک نفر متخصص هیدرولوژی باید با هیدرولیک چاه آشنایی نسبی داشته باشد. بهمین دلیل در این فصل به برخی جنبه‌های این موضوع پرداخته شده است.

۱۱-۲ چاه و خصوصیات آن

بر خلاف قنات که یک گالری افقی می‌باشد چاه یک لوله عمودی است که در زمین حفر شده و در تمام یا قسمتی از لایه آبدار نفوذ می‌کند. با قرار دادن پمپ در داخل چاه و چرخیدن پره‌های آن انرژی مکانیکی به آب منتقل شده و در نتیجه آب در امتداد لوله چاه بالا آمده و در سطح زمین تخلیه می‌گردد(شکل ۱۱-۱). بدین ترتیب انرژی مکانیکی داده شده به آب به انرژی ثقلی تبدیل می‌گردد. با تخلیه آب و پایین افتادن سطح آب در داخل لوله چاه بین آب در خارج و در داخل چاه اختلاف پتانسیل هیدرولیکی ایجاد شده و آب از اطراف چاه شروع به حرکت به داخل چاه می‌نماید. مقدار آبی که وارد چاه می‌شود برابر مقدار آبی است که با پمپاژ از چاه خارج می‌شود. بنابراین اگر دبی چاه ثابت باشد بین آب ورودی و خروجی از چاه تعادل برقرار شده و سطح آب در چاه ثابت می‌گردد.

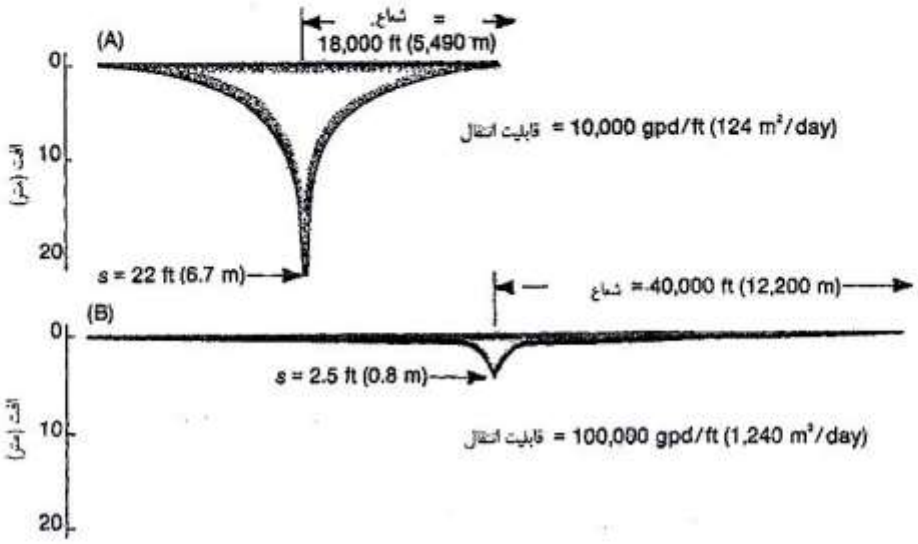


شکل ۱۱-۱ استخراج آب توسط چاه

در لایه‌های آزاد افقی افت سطح آب در اطراف چاه (drawdown) و یا افت سطح فشار (piezometric head) در لایه‌های محصور بصورت سطوح منحنی متقارن است. بطوریکه در اطراف چاه یک مخروط معکوس با سطح جانبی مقعر از آب تخلیه می‌شود. سطح قاعده مخروط را **سطح تأثیر چاه** (area of influence) و شعاع آن را شعاع تأثیر چاه نامند. شعاع تأثیر همان حریم چاه می‌باشد. توجه داشته باشید که در لایه‌های آبدار محصور چون همیشه لایه پر از آب باقی می‌ماند مخروط افت وجود نداشته بلکه در اینجا فقط مخروط افت فشار وجود خواهد داشت.

سطح قاعده مخروط افت در اطراف چاه بستگی به قابلیت انتقال مواد تشکیل دهنده لایه

آبدار دارد. بطوری که در شکل ۱۱-۲ نشان داده شده است اگر قابلیت انتقال مواد کم باشد شعاع تأثیر چاه کوچک و بر عکس سطح آب در داخل چاه زیاد افت می‌کند. حال آنکه اگر قابلیت انتقال مواد زیاد باشد شعاع تأثیر زیاد و بر عکس افت آب در داخل چاه کم خواهد بود.



شکل ۱۱-۲ تأثیر قابلیت انتقال مواد تشکیل دهنده لایه آبدار بر شکل، عمق و گسترش مخروط افت در یک چاه A- قابلیت انتقال کم و B- قابلیت انتقال زیاد

۱۱-۳ جریان شعاعی آب در چاه در وضعیت ماندگار

در جریان شعاعی به طرف چاهها می‌توان قانون دارسی را مستقیماً به کاربرد که آن را در حالت ماندگار برای لایه‌های آبدار آزاد و محصور مورد بررسی قرار می‌دهیم. اما قبل از بحث پیرامون این موضوع لازم است به تشریح برخی واژه‌های مصطلح در این مورد بپردازیم زیرا واژه‌هایی که در این‌جا ذکر می‌شود ممکن است در برخی نوشته‌های دیگر با همین معنا بصورت متفاوت ذکر شده باشد.

- **سطح استاتیک آب** : عبارت است از سطح آب در داخل چاه قبل از شروع پمپاژ.
- **سطح پمپاژ یا سطح دینامیک آب** : عبارت است از سطح آب در چاه در زمانی که پمپاژ صورت می‌گیرد. این سطح ثابت نبوده و مرتب در حال نوسان است.
- **افت** : عبارت است از مقدار پایین رفتن سطح آب در چاه که بوسیلهٔ پمپاژ و خارج ساختن آب از چاه صورت می‌گیرد. اختلاف سطح‌استاتیک و دینامیک را در هر نقطه افت سطح آب در آن نقطه گویند.

- **آبدهی چاه** : حجم آبی است که در واحد زمان از چاه خارج می‌شود.
- **ظرفیت مخصوص** : آبدهی چاه به ازای هر واحد افت سطح آب را ظرفیت مخصوص گویند و معمولاً برحسب لیتر در ثانیه در هر متر افت، توصیف می‌شود.
- **مخروط افت** : حجمی از لایهٔ آبدار که در هنگام پمپاژ از آب ثقلی تخلیه می‌شود مخروط افت نام دارد. این مخروط به نحوی قرار می‌گیرد که قاعدهٔ آن در سطح استاتیکی آب و رأس آن در سطح آب داخل چاه باشد.
- **چاه پمپاژ**: به چاهی گفته می‌شود که آب توسط پمپ از آن خارج می‌شود ولی اندازه‌گیری سطح ایستابی در آن انجام نمی‌شود.
- **چاه مشاهده‌ای**: چاهی است که در اطراف چاه پمپاژ حفر شده و فقط افت سطح آب در آن اندازه‌گیری و ثبت می‌شود و هیچگونه آبی از آن استخراج نمی‌شود.

۱-۳-۱۱ جریان شعاعی در لایه‌های آزاد

مطابق شکل ۱۱-۳ فرض می‌شود چاهی از سطح زمین تا لایهٔ غیرقابل نفوذ کف در یک آکیفر آزاد حفر شده باشد. موقعیت سطح ایستابی قبل از پمپاژ با خط‌چین مشخص گردیده و منحنی افت نیز با خط پر نشان داده شده است. شعاع تأثیر چاه r_o، ارتفاع آب در لایه آبدار h_o است، و ارتفاع آب در چاه طّی پمپاژ h_w می‌باشد. به عبارت دیگر افت سطح آب در چاه $h_o - h_w$ است. با فرض این‌که جریان شعاعی آب به طرف چاه در امتداد خطوط افقی صورت گیرد و شیب خطوط جریان مساوی شیب منحنی افت باشد، می‌توان قانون دارسی را برای این وضعیت به کار برد. ابتدا یک دستگاه محور مختصات را که محور عمودی آن منطبق بر محور چاه و محور افقی آن منطبق بر لایهٔ غیر قابل نفوذ افقی کف لایه آبدار باشد در نظر بگیرید، برای شرایط ماندگار که در آن فرض می‌شود سطح افت نسبت به زمان در موقعیت ثابتی قرار گرفته است، یعنی دبی ورودی به چاه و دبی خروجی از آن با یکدیگر مساوی است می‌توان نوشت:

$$Q = AV = K A i \qquad (۱-۱۱)$$

در یک نقطه انتخابی مانند M روی سطح منحنی افت که ارتفاع آب در آن h می‌باشد، شیب هیدرولیکی $i=\frac{dh}{dr}$ و مساحتی که جریان آب آن را قطع و از آن بطرف چاه حرکت می‌کند (A) برابر سطح جانبی استوانه‌ای است به شعاع r و ارتفاع h می‌باشد. یعنی:

$$A = 2\pi rh \qquad (۲-۱۱)$$

بنابراین:

$$Q = 2\pi r h \left(K\frac{dh}{dr}\right) \qquad (۳-۱۱)$$

حال اگر در معادله فوق بین دو حدِّ $[r = r_w ، h = h_w]$ و $[r = r_o ، h = h_o]$ انتگرال گرفته شود خواهیم داشت :

$$Q\frac{dr}{r} = 2K\pi h dh \qquad (۴-۱۱)$$

$$\int_{r_w}^{r_o} Q\frac{dr}{r} = \int_{h_w}^{h_o} 2K.\pi.h.dh \qquad (۵-۱۱)$$

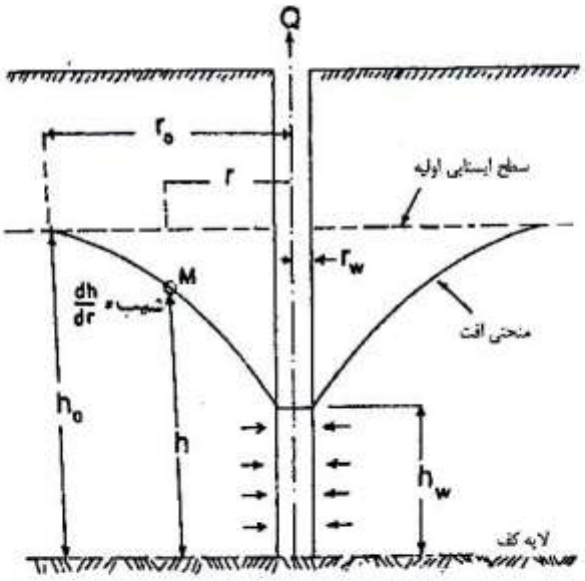
که نتیجه آن عبارت است از:

$$Q = K\pi\frac{h_o^2 - h_w^2}{\ln r_o/r_w} \qquad (۶-۱۱)$$

و در لگاریتم بر مبنای ۱۰ مقدار آن عبارت است از:

$$Q = K\pi\frac{h_o^2 - h_w^2}{2.3\log r_o/r_w} \qquad (۷-۱۱)$$

مقدار r_o به سادگی قابل اندازه‌گیری نیست ولی در عمل برای محاسبهٔ آبدهی در چاههایی که در لایه‌های غیرمحصور حفر می‌شود برای r_o مقداری بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ متر در نظر گرفته می‌شود. معادلهٔ ۱۱-۷ تغییرات دبی را نسبت به شعاع تأثیر و افت سطح آب در چاه نشان می‌دهند که از روی آنها می‌توان مقدار K را نیز بدست آورد.



شکل ۱۱-۳ جریان شعاعی آب به طرف چاه در آکیفر غیرمحصور

در معادله ۱۱-۷ اگر بجای $h_o^2 - hw^2$ مقدار متناظر آن را به شرح زیر قرار دهیم خواهیم داشت:

$$h_o^2 - hw^2 = (h_o - h_w)(h_o + h_w) \qquad (۷-۱۱ \text{ الف})$$

مقدار $h_o - h_w$ برابر افت در چاه می‌باشد که می‌توانیم آن را با s نشان دهیم و $h_o + h_w$ تقریباً دو برابر ضخامت قسمت آبدار آکیفر (2b) می‌باشد، زیرا عملاً افت آب در چاه نسبت به عمق آب در چاه اندک و $h_w \approx h_o$ است. لذا:

$$h_0^2 - h_w^2 \approx 2b\,s \qquad (۱۱-۷ب)$$

در این صورت معادله ۱۱-۷ برابر خواهد بود با:

$$Q = k\pi \frac{h_0^2 - h_w^2}{2.3 \log r_o/r_w} = k\pi \frac{2bs}{2.3 \log r_o/r_w} \qquad (۱۱-۷ج)$$

اگر بجای kb مقدار T را قرار دهیم:

$$Q = \frac{2\pi st}{2.3 \log r_o/r_w} \qquad (۱۱-۷د)$$

و مقدار افت سطح آب در چاه برابر خواهد بود با:

$$s = \frac{2.3Q}{2\pi T} \log \frac{r_o}{r_w} \qquad (۱۱-۷ه)$$

باید توجه داشت که افت کلی سطح آب در چاه عملاً بیشتر از مقدار فوق می‌باشد. بعبارت دیگر مطابق شکل ۱۱-۳الف افت واقعی یا کلی سطح آب در چاه (S_t) شامل دو جزء است یک جزء آن همان S_a یا افت حاصله از معادله ۱۱-۷ ه می‌باشد که در اثر پمپاژ حاصل می‌شود و جزء دیگر افت ناشی از عبور آب از جدار لوله (اسکرین) به داخل چاه و سپس وارد شدن آن به پمپ است (S_w) که بنام تلفات چاه (Well loss) نامیده می‌شود. تلفات چاه (S_w) تابعی از دبی بوده و از معادله زیر بدست می‌آید.

$$S_w = C\,Q^2 \qquad (۱۱-۷و)$$

C = ضریبی است که اگر چاه بخوبی طراحی شود مقدار آن کمتر از $0.5\ min^2/m^5$ خواهد بود و عملاً برابر ۰/۲۵ در نظر گرفته می‌شود.

در این صورت بجای s در معادله ۱۱-۷ ه باید s_t را در نظر گرفت که نتیجه عبارت خواهد بود از:

$$s_t = s_a + s_w \qquad (۱۱-۷ز)$$

$$s_t = s + s_w \qquad (۱۱-۷ح)$$

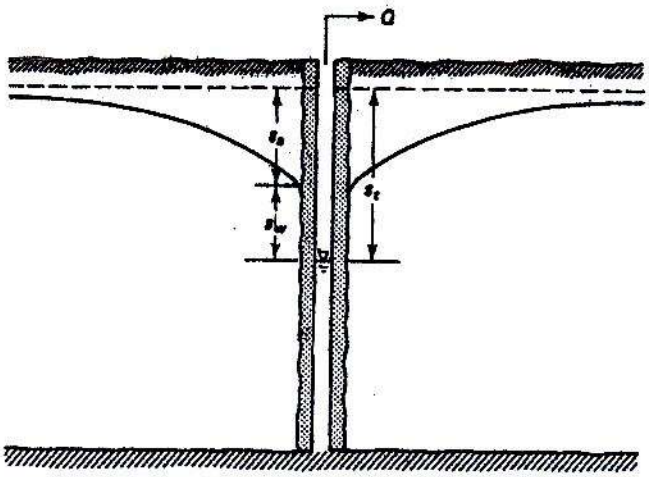
$$s_t = \frac{2.3\,Q}{2\pi\,T} \log \frac{r_o}{r_w} + 0.25\,Q^2 \qquad (۱۱-۷ط)$$

بر اساس تلفات چاه (s_w) و تلفات کلی (s_t) راندمان چاه تعریف شده است که عبارت است از نسبت افت حاصله از معادله ۱۱-۷ ه به افت کلی: یعنی

$$E = \frac{s_a}{s_t} \times 100 = (\frac{s_t - s_w}{s_t})100 \qquad (۱۱-۷ی)$$

$$E = (1 - \frac{s_w}{s_t}) \times 100 \qquad (۱۱-۷ک)$$

در صورتی که چاه بخوبی طراحی شود $s_w = 0$ و لذا $E = 100$ خواهد بود. مثلاً چنانچه چاهی به قطر ۱۲ اینچ (۳۰ سانتی‌متر) در یک آکیفر حفر شده و با دبی ۴۰۰ گالن در دقیقه (۱۵۰۰ لیتر در دقیقه) از آن پمپاژ شود و افت سطح آب در چاه ۲۰ فوت (۶ متر) باشد با توجه به اینکه ضریب انتقال آکیفر ۵۰۰۰ فوت مربع بر روز (۱۵۲۵ متر مربع بر روز) و شعاع تاثیر مخروط افت ۶۰۰۰ فوت (۰/۸۳۰ متر) باشد. تلفات چاه، راندمان چاه و ظرفیت ویژه آن به ترتیب ۱۱/۲ فوت (۳۴ متر)، ۵۶ درصد و ۲/۶۷ فوت مربع بر دقیقه (۰/۸۱ متر مربع بر دقیقه)



شکل ۱۱-۳ الف تلفات (افت) سطح ایستابی در چاه

خواهد بود. زیرا:

$r_0 = 6000$ ft

$r_w = 0.5$ pt

$$S_a = \frac{2.3\ Q}{4\pi T} \log \frac{r_0}{r_w}$$

$$S_a = \frac{2.3}{4\pi} (400\ \frac{gal}{min}) (\frac{1}{5000}\ \frac{day}{ft^2}) (\frac{1\ ft^3}{7.48\ gal}) (\frac{60 \times 24m}{1\ day}) \times \log (\frac{6000}{0.5})$$

$S_a = 11.2$ ft

تلفات چاه = $S_w = S_t - S_a = 20 - 11.2 = 8.8$ ft

راندمان چاه = $E = (\frac{S_a}{S_t} \times 100) = \frac{11.2}{20} \times 100 = 56\%$

ظرفیت مخصوص = $\frac{Q}{S_t} = (400\ \frac{gal}{min}) (\frac{1\ ft^3}{7.48\ gal}) (\frac{1}{20\ ft}) = 2.67\ \frac{ft^2}{min}$

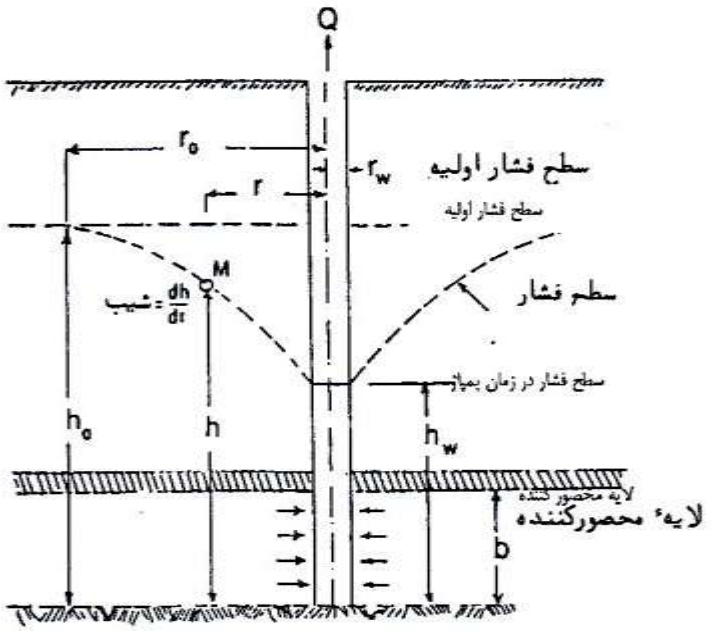
۱۱-۳-۲ جریان شعاعی در لایه های محصور

در لایه‌های آبدار محصور نیز وضعیت مشابه با لایه‌های غیرمحصور است. اگر فرض شود چاه طوری حفر شده باشد که از لایهٔ غیرقابل نفوذ اولی گذشته و تا لایهٔ غیرقابل نفوذ پایینی ادامه داشته باشد وجود فشار در داخل لایه آب تا سطحی معادل سطح فشار در داخل چاه بالا می‌آید (شکل ۱۱-۴) . با پمپاژ آب به میزان Q بدون آنکه لایه از آب تخلیه شود سطح فشار در اطراف چاه افت پیدا می‌کند و یک مخروط مجازی مشابه با مخروط افت در حالت اول بوجود

می‌آید. این مخروط مجازی نشان‌دهندهٔ تغییرات افت فشار در اطراف چاه است. در این حالت اگر r_0 شعاع تأثیر چاه، b ضخامت لایهٔ آبدار و h_w ارتفاع آب در داخل چاه در زمان پمپاژ باشد می‌توان معادلهٔ دارسی را در مورد آن به کار گرفت.

نقطهٔ M را روی منحنی افت فشار درنظر می‌گیریم. مختصات این نقطه در دستگاه مختصاتی که محور عمودی آن منطبق بر محور چاه و محور افقی آن منطبق بر لایهٔ غیرقابل نفوذ پایینی باشد r و h می‌باشد. باتوجه به این که جریان تماماً از ضخامت b و بطور افقی به طرف چاه صورت می‌گیرد و شیب هیدرولیکی در هر نقطه برابر با شیب سطح منحنی فشار در بالای همان نقطه در نظر گرفته می‌شود، خواهیم داشت:

$$Q = AV = K A i = K A \frac{dh}{dr} \qquad (۸-۱۱)$$



شکل ۱۱-۴ جریان شعاعی آب به طرف چاه در لایه محصور

مساحت A در این وضعیت برای نقطهٔ M برابر سطح جانبی استوانه‌ای است به شعاع r و ارتفاع b یعنی:

$$A = 2\pi\, rb \qquad (۹-۱۱)$$

$$Q = K(2\pi\, r\, b)\frac{dh}{dr} \qquad (۱۰-۱۱)$$

$$Q\,\frac{dr}{r} = 2\,K\pi b\,(dh) \qquad (۱۱-۱۱)$$

چنانچه از معادلهٔ فوق بین دو حدّ ($h = h_w$ و $r = r_w$) و ($h = h_0$ و $r = r_0$) انتگرال گرفته شود:

$$\int_{r_w}^{r_o} Q \frac{dr}{r} = \int_{h_w}^{h_o} 2\,K.\pi.\,b.\,dh \qquad (۱۲-۱۱)$$

نتیجهٔ آن عبارت خواهد بود از:

$$Q = 2\pi\ K\ b \frac{h_o - h_w}{\ln(r_o/r_w)} \qquad (۱۳-۱۱)$$

و در لگاریتم بر مبنای ۱۰ خواهیم داشت:

$$Q = 2\pi\ K\ b \frac{h_o - h_w}{2.3\ \log(r_o/r_w)} \qquad (۱۴-۱۱)$$

بدین ترتیب مقدار آبدهی از آکیفرهای محصور باتوجه به شعاع تأثیر و افت آب در داخل چاه قابل محاسبه خواهد بود. بطوریکه اشاره شد فرمول‌های ۱۱-۷ و ۱۱-۱۴ دارای محدودیتهایی می‌باشند که این محدودیتها ناشی از فرضیات زیر است.

- فرض می‌شود جریان به صورت ماندگار بوده و سطح افت نسبت به زمان تغییر ننماید،
- فرض می‌شود خطوط جریان موازی باشند،
- فرض می‌شود شیب‌هرنقطه از جریان مساوی شیب سطح افت در بالای همان نقطه باشد،
- فرض می‌شود آکیفر همگن، یکنواخت و همروند می‌باشد.

فرضیات فوق که به نام *فرضیات دوپوئی ـ فورش هایمر* (Dupuit-Forchheimer) معروف است برای تمامی موارد صدق نمی‌کند. همین امر باعث می‌شود که از دقت فرمول‌های مذکور برای استفاده در تخمین ضریب نفوذپذیری لایه آبدار کاسته شود. برای این منظور روشهای دیگری نیز به کار گرفته می‌شود تا حتی‌المقدور ارقام محاسبه شده بیشتر به واقعیت نزدیک باشد. علاوه بر موارد مذکور تخمین شعاع تأثیر چاه (r_o) هم خود بر مشکل می‌افزاید. فرمول‌های تجربی زیادی برای محاسبه r_o ارائه شده است که از دقت چندانی برخوردار نمی‌باشند. از آن جمله می‌توان *فرمول زیشارت* (Sichart) را نام برد. که عبارت است از:

$$r_o = 3000\ s\sqrt{K} \qquad (۱۵-۱۱)$$

در این فرمول:

K = ضریب نفوذپذیری لایه آبدار برحسب m/sec

s = افت سطح آب در چاه در هنگام پمپاژ برحسب m

r_o = شعاع تأثیر برحسب m

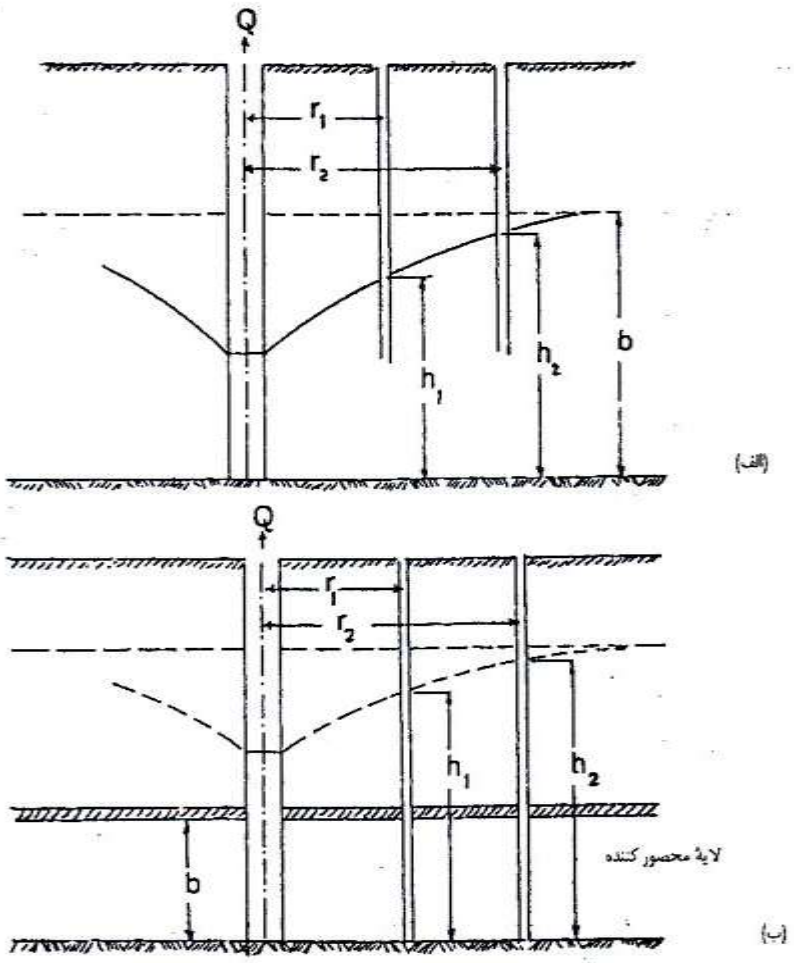
مثلاً بر طبق این فرمول اگر ضریب نفوذپذیری مواد لایه آبدار برابر ۱×۱۰^{-۴} متر در ثانیه باشد چنانچه افت چاه طی پمپاژ ۲۰ متر باشد شعاع تأثیر چاه برابر ۶۰۰ متر خواهد بود.

فرمول‌های دیگری نیز برای تخمین شعاع تأثیر چاه ارائه شده است که عملا نتایج قابل اطمینانی بدست نمی‌دهند. زیرا در آنها پارامترهایی استفاده می‌شود که برآورد آنها مشکل است.

معادلات جریان شعاعی آب به طرف چاه برای تعیین ضریب هدایت هیدرولیکی (K) و یا ضریب انتقال (T) نیز بکار برده می‌شود. در این روش نیاز به یک چاه پمپاژ و دو چاه مشاهده‌ای است که به فواصل r_1 و r_2 در اطراف چاه پمپاژ واقع شده باشند. برای این منظور جریانی با دبی ثابت Q از چاه پمپاژ استخراج می‌شود و پس از برقراری حالت تعادل در منحنی افت، ارتفاع آب در چاههای مشاهده‌ای اندازه‌گیری می‌گردد.

باتوجه به شکل ۱۱-۵ چنانچه h_1 و h_2 ارتفاع آب در دو چاه مشاهده‌ای باشند ضریب نفوذپذیری برای آکیفرهای آزاد و تحت فشار به صورت زیر محاسبه می‌شود:

در لایه‌های آبدار آزاد باتوجه به معادلهٔ زیر و انتگرال آن بین دو حد h_1 و h_2 خواهیم داشت:



شکل ۱۱-۵ اندازه‌گیری صحرایی ضریب نفوذپذیری (الف) در یک لایه آبدار غیرمحصور و (ب) در یک لایهٔ آبدار تحت فشار.

$$Q = 2\pi\, rh\,(K\frac{dh}{dr}) \qquad (۱۶-۱۱)$$

$$K = \frac{Q}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \ln\frac{r_2}{r_1} \qquad (۱۷-۱۱)$$

مقدار $h_2^2 - h_1^2$ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$h_2^2 - h_1^2 = (h_2 + h_1)(h_2 - h_1) \qquad (۱۸-۱۱)$$

حال اگر $h_1 + h_2$ حدوداً دو برابر ضخامت لایه آبدار (2b) فرض شود و $h_2 - h_1$ برابر اختلاف سطح آب در دو چاه مشاهده‌ای (s) باشد خواهیم داشت :

$$h_2^2 - h_1^2 = (h_2 + h_1)(h_2 - h_1) \qquad (۱۹-۱۱)$$

$$h_2^2 - h_1^2 = 2b.s$$

و لذا:

$$K = \frac{Q}{\pi(2b)(h_2 - h_1)} \ln\frac{r_2}{r_1} = \frac{Q}{2\pi.b.s} \ln\frac{r_2}{r_1} \qquad (۲۰-۱۱)$$

که b ضخامت لایهٔ آبدار است.

باید توجه داشت که فرض $h_2 + h_1 = 2b$ زیاد دور از واقعیت نمی‌باشد، زیرا b در مقایسه با $h_2 - h_1$ بسیار بزرگ است.

معادله فوق در سیستم لگاریتمی با مبنای ۱۰ عبارت خواهد بود از:

$$K = \frac{2.3\ Q \log(r_2/r_1)}{2\pi b(h_2 - h_1)} \qquad (۲۱-۱۱)$$

برای بدست آوردن T ابتدا K b محاسبه می‌شود.

$$K\,b = \frac{2.3\ Q \log(r_2/r_1)}{2\pi(h_2 - h_1)} \qquad (۲۲-۱۱)$$

که چون $T = K\,b$ است لذا:

$$T = \frac{2.3\ Q \log(r_2/r_1)}{2\,\pi(h_2 - h_1)} \qquad (۲۳-۱۱)$$

در مورد لایه‌های آبدار محصور یا تحت فشار باتوجه به معادلهٔ ۱۱-۱۱ و انتگرال‌گیری بین دو حد h_1 و h_2 خواهیم داشت:

$$Q = 2\,K\,\pi\, rb(\frac{dh}{dr}) \qquad (۲۴-۱۱)$$

$$K = \frac{Q}{2\pi\ b(h_2 - h_1)} \ln\frac{r_2}{r_1} \qquad (۲۵-۱۱)$$

$$K = \frac{2.3\ Q \log(r_2/r_1)}{2\,\pi\ b(h_2 - h_1)} \qquad (۲۶-۱۱)$$

و ضریب انتقال T برابر خواهد بود با:

$$T = K\,b = \frac{2.3\ Q \log(r_2/r_1)}{2\pi(h_2 - h_1)} \qquad (۲۷-۱۱)$$

بدین‌ترتیب از روی معادلات فوق مقدار ضریب نفوذپذیری لایه آبدار قابل محاسبه است. ارقامی که برای ضریب نفوذپذیری مواد مختلف تشکیل دهنده لایه‌های آبدار از روی این آزمایشات بدست آمده است در محدوده‌ای است که در جدول ۱۱-۱ ذکر شده است.

جدول ۱۱-۱ ضریب نفوذپذیری در مورد برخی تشکیلات زمین‌شناسی

خاک	K (cm/sec)
رس	$<10^{-9}$
رس ماسه‌ای	10^{-9} تا 10^{-8}
پیت	10^{-8} تا 10^{-7}
سیلت	10^{-7} تا 10^{-6}
ماسهٔ بسیار نرم	10^{-6} تا 10^{-5}
ماسهٔ نرم	10^{-5} تا 10^{-4}
ماسهٔ درشت	10^{-4} تا 10^{-3}
شن و گراول	10^{-3} تا 10^{-2}
گراول	$>10^{-2}$

● مثال ۱۱-۱

چاهی به قطر ۲۰ سانتی‌متر در یک لایهٔ آبدار آزاد حفر شده، عمق چاه تا لایهٔ غیرقابل نفوذ کف ادامه دارد. ضخامت لایهٔ آبدار ۳۰ متر است. دبی ۰/۱ مترمکعب در ثانیه از چاه مذکور پمپاژ شده و پس از مدت طولانی که تعادل برقرار شده است افت سطح آب در چاههایی که به فواصل ۲۰ و ۵۰ متر از چاه اصلی قرار گرفته‌اند به ترتیب ۴ و ۲/۵ متر بوده است. ضریب نفوذپذیری و افت سطح آب در چاه پمپاژ را حساب کنید.

حل

$Q = 0.1\ m^3/sec$

$r_1 = 20\ m$

$r_2 = 50\ m$

$h_1 = 30 - 4 = 26\ m$

$h_2 = 30 - 2.5 = 27.5\ m$

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

$$K = \frac{0.1 \ln \frac{50}{20}}{3.14 (27.5^2 - 26^2)}$$

$K = 0.000363\ m/sec$

از همین معادله می‌توان ارتفاع آب در چاه را بدست آورد زیرا:

h_w ارتفاع آب در چاه

$r_w = 0.1$ m شعاع چاه

لذا خواهیم داشت:

$$0.000363 = \frac{0.1 \ln(\frac{20}{0.1})}{3.14(26^2 - h_w^2)}$$

$$h_w = 14.53$$

واقت سطح آب در چاه برابر است با: $30 - 14.53 = 15.47$ m

● **مثال ۱۱-۲**

توسط یک چاه با دبی ۰/۰۸ متر مکعب در ثانیه از یک لایه آبدار محصور پمپاژ می‌شود. دو چاه مشاهده‌ای بفواصل ۱۰ و ۵۰ متر از چاه اصلی قرار دارند که اختلاف سطح آب در آنها ۱/۵ متر است. قابلیت انتقال مواد تشکیل دهنده آکیفر چقدر است.

حل

$$T = \frac{2.3\ Q \log(r_2/r_1)}{2\pi\ (h_2 - h_1)}$$

$$T = \frac{2.3(0.08)\log(50/10)}{2(3.14)(1.5)} = 0.0137\ m^2/s$$

● **مثال ۱۱-۳**

روی یک آکیفر که ضخامت آن ۲۰ متر است لایه غیر قابل نفوذی به ضخامت ۳۰ متر قرار گرفته است (شکل ۱۱-۶). از یک چاه که قطر آن ۰/۵ متر است با دبی ۰/۱ متر مکعب در ثانیه از این آکیفر پمپاژ می‌شود. پس از یک مدت طولانی که از شروع پمپاژ می‌گذرد افت سطح آب در دو چاه مشاهده‌ای که بفواصل ۱۰ و ۶۰ متر از چاه پمپاژ قرار دارند اندازه‌گیری شده است. افت سطح آب در چاه اول ۴ متر و در چاه دوم ۳ متر بوده است. حساب کنید هدایت هیدرولیکی مواد تشکیل دهنده آکیفر را. افت سطح آب در چاه پمپاژ چقدر می‌باشد.

حل

با توجه به معادله ۱۱-۱۴ خواهیم داشت:

$$K = \frac{2.3\ Q \log(r_2/r_1)}{2\pi b\ (s_2 - s_1)}$$

$$K = \frac{2.3(0.1)\log(60/10)}{2(3.14)(20)(4-3)}$$

$K = 0.0014$ m/s

برای بدست آوردن افت در چاه پمپاژ از معادله زیر استفاده می‌کنیم که بین دو حد (h_w , r_w) و (h , r) انتگرال گرفته شود. در این صورت خواهیم داشت:

$$Q \frac{dr}{r} = 2K\pi\, b(dh)$$

$$Q = 2K\pi b \frac{h - h_w}{2.3 \log (r/r_w)}$$

در این معادله $h - h_w$ برابر اختلاف افت سطح آب در دو چاه پمپاژ و مشاهده‌ای اول می‌باشد که اگر افت سطح آب در چاه پمپاژ s باشد خواهیم داشت:

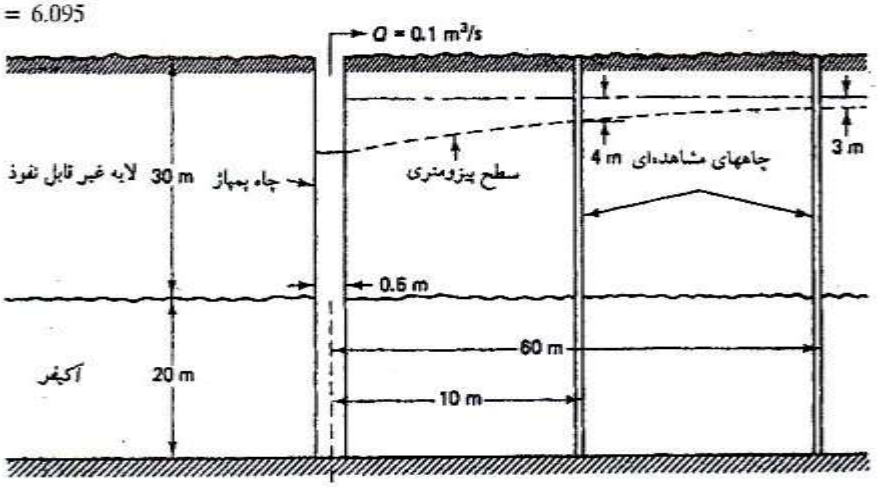
$$h - h_w = s - 4$$

بنابراین:

$$0.1 = 2(0.0014)\,(3.14)\,(20) \frac{s - 4}{2.3 \log (10/0.25)}$$

$$2.095 = s - 4$$

$$s = 6.095$$



شکل ۱۱-۶

۱۱-۳-۳ زمان پیمایش آب در زیر زمین

در آبهای زیرزمینی زمان پیمایش بخصوص در مورد مواد آلاینده بسیار حائز اهمیت است. اگر آب زیرزمینی فاصله dr را در زمان dt طی کند سرعت حرکت (V_r) برابر خواهد بود با:

$$V_r = \frac{dr}{dt} \qquad (۲۸-۱۱)$$

از طرف دیگر سرعت دارسی برابر است با:

$$V = -K \frac{dh}{dr} \qquad (۲۹-۱۱)$$

و سرعت منفذی (V_s) یا سرعت واقعی از روی تخلخل مؤثر (n) با فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$V_s = \frac{V}{n} = -\frac{K}{n}\frac{dh}{dr} \qquad (۳۰-۱۱)$$

چنانچه معادلات ۱۱-۲۸ و ۱۱-۳۰ را برابر قرار دهیم:

$$V_r = V_s \qquad (۳۱-۱۱)$$

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{K}{n}\frac{dh}{dr} \qquad (۳۲-۱۱)$$

$$dt = -\frac{n}{K}\frac{dr}{dh}(dr) \qquad (۳۳-۱۱)$$

ازطرف‌دیگرمطابق‌معادله ۱۱-۱۱ جریان شعاعی‌از یک لایه باضخامت متوسط D برابر است با:

$$Q = 2\pi r DK\frac{dh}{dr} \qquad (۳۴-۱۱)$$

$$\frac{dr}{dh} = \frac{2\pi DKr}{Q} \qquad (۳۵-۱۱)$$

حال اگر مقدار فوق را در معادله ۱۱-۳۳ جایگزین کنیم خواهیم داشت:

$$dt = \frac{-2\pi rD}{Q} n\,(dr) \qquad (۳۶-۱۱)$$

چنانچه از این معادله انتگرال گرفته شود خواهیم داشت:

$$\int_0^t dt = \int_R^r -\frac{2\pi r D}{Q} n \quad (dr) \qquad (۳۷-۱۱)$$

$$t = \frac{\pi Dn}{Q}(R^2 - r^2) \qquad (۳۸-۱۱)$$

در این معادله:

t= زمان پیمایش از R تا r

r= فاصله شعاعی نسبت به یک نقطه مرکزی

R= فاصله شعاعی نقطه‌ای که زمان پیمایش از آنجا تا r مورد نظر است.

D= ضخامت لایه آکیفر یا متوسط ضخامت آکیفر بین R و r

n= تخلخل مؤثر مواد

● **مثال ۱۱-۴**

با توجه به مثال ۱۱-۳اگر تخلخل موثر مواد آکیفر ۰/۳ باشد چه زمانی طول خواهد کشید که آب از چاه مشاهده‌ای که در فاصله ۶۰ متری قرار دارد به چاه پمپاژ برسد.

حل

$$t = \frac{\pi Dn}{Q}(R^2 - r^2) = \frac{(3.14)(20)(0.3)}{0.1}(60^2 - 0.25^2)$$

$$t = 678000 \text{ sec} = 188 \text{ hr} = 7.8 \text{ days}$$

۴-۱۱ جریان شعاعی در چاه در حالت غیرماندگار

با اعمال قانون دارسی و معادله پیوستگی اگر مقدار جریان ورودی و خروجی به یک حجم کوچک را در جهات z, y, x در نظر بگیریم در یک آکیفر همگن و همروند و در شرایط غیر ماندگار تغییر بار فشار با توجه به معادله ۱۰-۶ که فصل قبل شرح داده شده، بصورت زیر خواهد بود.

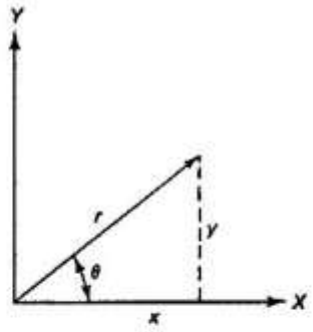
$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_s}{K}\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (۳۹-۱۱)$$

در این معادله S_s ضریب ذخیره ویژه، K هدایت هیدرولیکی، t زمان و h بار فشار می‌باشد. این معادله در سیستم دو بعدی که در آن بجای S_s مقدارش بر اساس S و T قرار داده شود عبارت خواهد بود از:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{bK}\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (۴۰-۱۱)$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T}\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (۴۱-۱۱)$$

چون جریان شعاعی بطرف چاه می‌باشد مناسب خواهد بود که بجای مختصات x و y مختصات قطبی بکار برده شود. در مختصات قطبی با توجه به شکل ۱۱-۷ خواهیم داشت:



شکل ۱۱-۷

$$x = r\cos\theta \qquad (۴۲-۱۱)$$

$$y = r\sin\theta \qquad (۴۳-۱۱)$$

$$r = (x^2 + y^2)^{0.5} \qquad (۴۴-۱۱)$$

$$\theta = \tan^{-1}\frac{y}{x} \qquad (۴۵-۱۱)$$

چنانچه مقادیر فوق را درمعادله ۱۱-۴۱ قرار دهیم این معادله بصورت زیر خلاصه خواهد شد.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T}\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (۴۶-۱۱)$$

حال اگر بجای بار فشار (h) مقدار افت (s) را بکار ببریم بطریق مشابه خواهیم داشت:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial s}{\partial r} = \frac{S}{T}\frac{\partial s}{\partial t} \qquad (۴۷-۱۱)$$

که در واقع معادله تغییرات افت سطح آب در اطراف پمپاژ در وضعیت غیر ماندگار در زمانهای مختلف است. اگر معادله ۱۱-۴۷ را از طریق متغیر بولتزمن (Boltzmann variable) به مبنای u تبدیل کنیم ($u=\frac{r^2S}{4Tt}$) این معادله به یک معادله دیفرانسیلی معمولی تبدیل خواهد شد که با دو دفعه انتگرالگیری در محدوده شرایط مرزی قابل حل است. تیس (Theis) درسال ۱۹۳۵ اولین کسی بود که با مشابه قرار دادن معادله جریان آب زیرزمینی و جریان گرما معادله ۱۱-۴۷ را حل کرد. برای حل این معادله تیس چند فرض را در نظر گرفت که عبارت بودند از:

الف - آکیفر همگن و همروند بوده و گسترش آن تا بی‌نهایت است.

ب - قابلیت انتقال آکیفر (T) ثابت است.

ج - مقدار آبی که پمپاژ می‌شود کلا از ذخیره آکیفر کسب شده باشد.

د - عمق حفاری چاه سرتاسر آکیفر را در برگرفته و قطر چاه بسیار کوچک می‌باشد.

با توجه به این فرضیات حل معادله ۱۱-۴۷ عبارت خواهد بود از:

$$s = \frac{Q}{4\pi T}\int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u}\,du \qquad (۴۸-۱۱)$$

این معادله بنام معادله تیس معروف است و بخش انتگرال آن را تابع چاه (well function) گویند که با علامت W(u) نشان می‌دهند. لذا خواهیم داشت:

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u}\,du \qquad (۴۹-۱۱)$$

و در نتیجه:

$$s = \frac{Q}{4\pi T}W(u) \qquad (۵۰-۱۱)$$

همانطور که گفته شد مقدار u برابر است با:

$$u = \frac{r^2S}{4Tt} \qquad (۵۱-۱۱)$$

تابع چاه از طریق انتگرالگیری بصورت زیر حل می‌شود.

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u}\,du = -0.5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2\times 2!} + \frac{u^3}{3\times 3!} - \cdots \qquad (۵۲-۱۱)$$

r = فاصله نقطه مورد نظر تا مرکز چاه پمپاژ

t = زمان از شروع پمپاژ

s = افت سطح آب در نقطه مورد نظر

S = ضریب ذخیره

T = قابلیت انتقال

مجموعه فرمول‌های فوق برای تعیین خصوصیات هیدرولیکی از جمله ضریب انتقال و ضریب ذخیره آکیفر مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارامترهای مورد لزوم برای حل این معادله‌ها از طریق آزمایشات پمپاژ بدست می‌آید.

آزمایش پمپاژ مشتمل بر این است که آب از یک چاه با دبی ثابت بمدت طولانی که از چند ساعت تا چند روز متغیر است پمپاژ شود و سپس در دوره‌های زمانی از شروع پمپاژ افت سطح آب در چاههای مشاهده‌ای که اطراف چاه پمپاژ حفر شده‌اند اندازه‌گیری گردد. با انجام آزمایشات پمپاژ می‌توان ضرایب هیدرودینامیکی لایه آبدار را بدست آورد. کاربرد معادلات تیس باعث می‌شود که بدون آنکه صبر شود تا شرایط ماندگار حاصل شود در همان وضعیت غیرماندگار و در مدت کوتاهتری ضرایب هیدرودینامیک آکیفر محاسبه شود.

برای حل معادلات فوق روش‌های گوناگونی پیشنهاد شده است از جمله روشی که توسط خود تیس ارائه گردیده است. در روش‌های اولیه از همان معادلات تیس استفاده می‌شود ولی در روش‌های بعدی حک و اصلاحاتی روی معادلات تیس بخصوص تابع چاه نیز صورت گرفت. این اصلاحات با توجه به شرایط واقعی و دوری جستن از فرضیات تیس بوده است.

۱۱-۵ آزمایشهای پمپاژ

همانطور که اشاره شد آزمایش پمپاژ یک کار صحرائی است که در آن از یک چاه آزمایشی با دبی مشخص پمپاژ بعمل می‌آید و سپس با یک سری اندازه‌گیری‌های سطح آب در یک یا چند چاه مشاهده‌ای دیگر که در اطراف چاه پمپاژ قرار گرفته‌اند می‌توان خصوصیات هیدرودینامیکی آکیفر را بدست آورد. آزمایش پمپاژ و محاسبه ضرایب هیدرودینامیک لایه آبدار با روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد که هر کدام برای شرایط خاصی از وضعیت آکیفر کاربرد دارد که در اینجا به ذکر پاره‌ای از این روش‌ها اکتفا می‌شود.

۱۱-۵-۱ آزمایش پمپاژ در لایه‌های آبدار محصور

در لایه‌های آبدار محصور علاوه بر روش منحنی - تیپ (type - curve) که ابتدا توسط تیس پیشنهاد گردید دو روش دیگر نیز بکار برده می‌شود که عبارتند از روش کوپر- ژاکوب (Cooper-Jacob) و روش چاو (Chow). از جائی که این روش‌ها در آزمایش پمپاژ زیاد بکار گرفته می‌شوند به شرح آنها می‌پردازیم.

روش منحنی - تیپ یا روش تیس

بر اساس معادله تابع چاه (۱۱-۴۹) که افت سطح آب در چاه مشاهده‌ای را بدست می‌داد می‌توانیم بنویسیم:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \qquad (۵۳-۱۱)$$

$$\log s = [\log \frac{Q}{4\pi T}] + \log W(u) \qquad (۵۴-۱۱)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \qquad (۵۵-۱۱)$$

$$\frac{t}{r^2} = \frac{S}{4T} \frac{1}{u} \qquad (۵۶-۱۱)$$

$$\log \frac{t}{r^2} = [\log \frac{S}{4T}] + \log \frac{1}{u} \qquad (۵۷-۱۱)$$

چنانچه دبی (Q) ثابت باشد مقادیر داخل کروشه در معادله‌های ۱۱-۵۴ و ۱۱-۵۷ ثابت می‌باشند بنابراین می‌توان چنین گفت که با توجه به معادله ۱۱-۵۴ اگر به $\log W(u)$ مقدار ثابتی اضافه شود $\log s$ بدست می‌آید و بطریق مشابه در معادله ۱۱-۵۷ به $\log \frac{1}{u}$ مقدار ثابتی افزوده شده تا $\log \frac{1}{r^2}$ حاصل شود. بعبارت دیگر منحنی بین $\log W(u)$ و $\log \frac{1}{u}$ مشابه منحنی بین $\log s$ و $\log \frac{t}{r^2}$ خواهد بود و فقط (مطابق شکل ۱۱-۸) به دلیل افزودن مقادیر ثابت از همدیگر فاصله خواهند داشت.

بطور خلاصه در روش منحنی- تیپ به شرح زیر عمل می‌شود.

الف - ابتدا با استفاده از معادله ۱۱-۵۲ به u مقادیر مختلفی را داده و $W(u)$ را بدست آورید. بدین ترتیب به ازاء مقادیر مختلف $\frac{1}{u}$ که از روی u بدست می‌آید مقادیر $W(u)$ در اختیار خواهد بود. در جدول ۱۱-۲ مقادیر $W(u)$ به ازاء مقادیر مختلف $\frac{1}{u}$ از ۱ تا 9×10^{13} ارائه شده است.

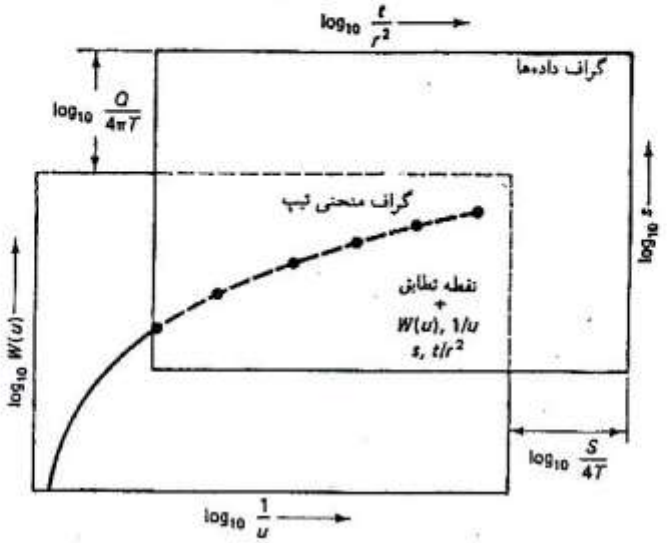
ب - یک کاغذ لگاریتمی (هر دو محور آن لگاریتمی باشد) انتخاب کرده و با قرار دادن مختصات $\frac{1}{u}$ و $W(u)$ برای تعدادی نقاط که از جدول ۱۱-۲ انتخاب خواهید کرد منحنی تغییرات $W(u)$ را نسبت به $\frac{1}{u}$ رسم کنید. این منحنی همان منحنی تیپ می‌باشد. در این گراف محور عمودی به $W(u)$ و محور افقی به $\frac{1}{u}$ اختصاص داده می‌شود.

ج - با انجام آزمایش پمپاژ که در آن در زمان‌های مختلف از شروع پمپاژ (t) افت سطح آب (s) در یک چاه مشاهده‌ای که بفاصله های r از چاه پمپاژ قرار دارد اندازه‌گیری شده است جدولی تشکیل دهید که یک ستون آن $\frac{t}{r^2}$ بوده و در ستون مقابل مقادیر s به ازاء $\frac{t}{r^2}$ های مختلف نوشته شده‌باشد.

د - یک کاغذ لگاریتمی شفاف (ترانسپارانت) مشابه کاغذ لگاریتمی قبل انتخاب کرده و با قرار دادن مختصات $\frac{t}{r^2}$ در ستون افقی و s در ستون عمودی منحنی تغییرات s را نسبت به $\frac{t}{r^2}$ رسم کنید. توجه داشته‌باشید که کاغذهای لگاریتمی ازنظر اندازه سیکل‌هاوفواصل باید کاملاً مشابه همدیگر باشند.

ه - حال که دو منحنی مشابه، یکی بین $W(u)$ و $\frac{1}{u}$ و دیگری بین s و $\frac{t}{r^2}$ بدست آمده است آنها را طوری رویهم می‌لغزانیم تا در حالی که محورهای آنها همیشه با هم موازی باقی بمانند بهترین تطابق را رویهم داشته باشند. شکل ۱۱-۸ نمونه‌ای از این تطابق را نشان می‌دهد و بطوری که در

این شکل مشاهده می‌شود دو منحنی فقط به اندازه $\log \frac{Q}{4\pi T}$ از نظر عمودی و به اندازه $\log \frac{S}{4T}$ از نظر افقی نسبت به یکدیگر فاصله دارند. این مقادیر همان مقادیر ثابت داخل کروشه در معادلات ۱۱-۵۴ و ۱۱-۵۷ هستند که به $\log W(u)$ و $\log \frac{1}{u}$ افزوده شده‌اند.



شکل ۱۱-۸

و - پس از آنکه منحنی‌ها بهم مطابقت داده شده‌اند در قسمتی از صفحه که منحنی‌ها مطابقت داده شده‌اند یک نقطه اختیاری را انتخاب کنید. لازم نیست این نقطه روی منحنی باشد بلکه هر نقطه دلخواه روی صفحه قابل قبول خواهد بود. حال مختصات این نقطه از روی گراف‌ها قرائت کنید. این نقطه نسبت به هر کدام از گراف‌ها دارای یک مختصات است یعنی این نقطه روی کاغذ گراف اول (گراف منحنی تیپ) دارای یک مختصات $W(u)$ و $\frac{1}{u}$ و روی کاغذ گراف دوم (گراف‌داده‌های پمپاژ) دارای یک مختصات s و $\frac{t}{r^2}$ می‌باشد. در واقع این نقطه دارای ۴ مشخصه خواهد بود. با توجه به این که نقطه مورد نظر دلخواه می‌باشد مناسب خواهد بود که آن را طوری انتخاب کنیم که مختصات آن روی منحنی تیپ مضربی از ۱۰ باشد (مثلاً $\frac{1}{u}$ برابر ۱، ۱۰، ۱۰۰ و یا ۱۰۰۰ باشد).

ز- پس از آن که مختصات چهارگانه نقطه انتخابی که $W(u)$ ، $\frac{1}{u}$ ، s و $\frac{t}{r^2}$ باشد تعیین گردید مقادیر قابلیت انتقال (T) و ضریب ذخیره (S) آکیفر را از فرمول های زیر بدست آورید.

$$T=\frac{Q}{4\pi s}W(u) \qquad (۱۱-۵۸)$$

$$S=4T\frac{t}{r^2}u \qquad (۱۱-۵۹)$$

مقدار T دارای بعد L^2T^{-1} و S بدون بعد می‌باشد.

جدول ۱۱-۲ مقادیر تابع چاه W(u) به ازاء مقادیر مختلف 1/u

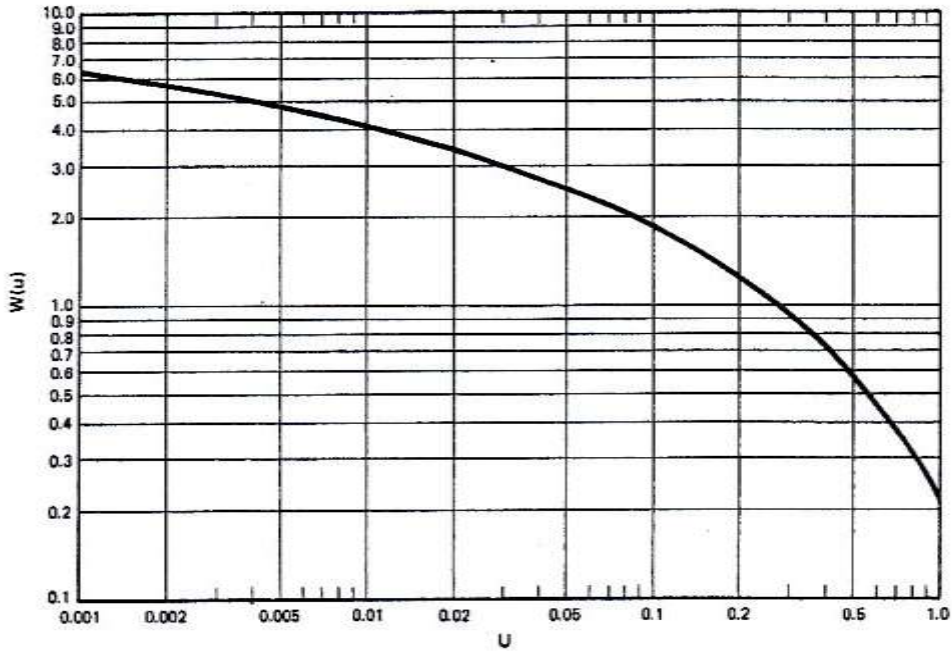
1/u	$1/u \times 10^{-1}$	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5
1.0	0.00000*	0.21938	1.82292	4.03793	6.33154	8.63322	10.93572
1.2	0.00003	0.29255	1.98932	4.21859	6.51369	8.81553	11.11804
1.5	0.00017	0.39841	2.19641	4.44007	6.73667	9.03866	11.34118
2.0	0.00115	0.55977	2.46790	4.72610	7.02419	9.32632	11.62886
2.5	0.00378	0.70238	2.68126	4.94824	7.24723	9.54945	11.85201
3.0	0.00857	0.82889	2.85704	5.12990	7.42949	9.73177	12.03433
3.5	0.01566	0.94208	3.00650	5.28357	7.58359	9.88592	12.18847
4.0	0.02491	1.04428	3.13651	5.41675	7.71708	10.01944	12.32201
5.0	0.04890	1.22265	3.35471	5.63939	7.94018	10.24258	12.54515
6.0	0.07833	1.37451	3.53372	5.82138	8.12247	10.42490	12.72747
7.0	0.11131	1.50661	3.68551	5.97529	8.27659	10.57905	12.88162
8.0	0.14641	1.62342	3.81727	6.10865	8.41011	10.71258	13.01515
9.0	0.18266	1.72811	3.93367	6.22629	8.52787	10.83036	13.13294

1/u	$1/u \times 10^7$	10^8	10^9	10^{10}	10^{11}	10^{12}	10^{13}
1.0	15.54087	17.84344	20.14604	22.44862	24.75121	27.05379	29.35638
1.2	15.72320	18.02577	20.32835	22.63094	24.93353	27.23611	29.53870
1.5	15.94634	18.24892	20.55150	22.85408	25.15668	27.45926	29.76184
2.0	16.23401	18.53659	20.83919	23.14177	25.44435	27.74693	30.04953
2.5	16.45715	18.75974	21.06233	23.36491	25.66750	27.97008	30.27267
3.0	16.63948	18.94206	21.24464	23.54723	25.84982	28.15240	30.45499
3.5	16.79362	19.09621	21.39880	23.70139	26.00397	28.30655	30.60915
4.0	16.92715	19.22975	21.53233	23.83492	26.13750	28.44008	30.74268
5.0	17.15030	19.45288	21.75548	24.05806	26.36064	28.66322	30.96582
6.0	17.33263	19.63521	21.93779	24.24039	26.54297	28.84555	31.14813
7.0	17.48677	19.78937	22.09195	24.39453	26.69711	28.99969	31.30229
8.0	17.62030	19.92290	22.22548	24.52806	26.83064	29.13324	31.43582
9.0	17.73808	20.04068	22.34326	24.64584	26.94843	29.25102	31.55360

گاهی اوقات منحنی تیپ برعکس نیز رسم می‌شود. به این صورت که در منحنی تیپ بجای این که W(u) نسبت به 1/u رسم شود مقدار W(u) نسبت به u رسم می‌شود. جدول ۱۱-۳ مقادیر W(u) را به ازاء مقادیر مختلف u نشان می‌دهد که اگر آن را در یک دستگاه کاغذ لگاریتمی رسم کنیم شکل منحنی بر عکس حالت قبل خواهد بود (شکل ۱۱-۹الف). در این وضعیت نیز در گراف دوم باید s را برخلاف حالت قبل که نسبت به t/r^2 رسم می‌کردیم نسبت به r^2/t رسم کرده و سپس بهمان روش قبل پس از تطابق منحنی‌ها یک نقطه دلخواه را روی کاغذ انتخاب کرده و مختصات چهارگانه آن (s , r^2/t , u , W(u)) را روی دو گراف بدست آورده و بار دیگر از همان فرمول‌های قبل مقادیر S و T را بدست آورد. گاهی اوقات به منحنی تغییرات W(u) نسبت به u منحنی-تیپ و به منحنی W(u) نسبت به 1/u منحنی تیپ-معکوس هم گفته می‌شود. ولی در عمل هر دو منحنی تیپ می‌باشند و تفاوتی با یکدیگر ندارند.

جدول ۱۱-۳ تابع W(u) به ازاء مقادیر مختلف (u)

u	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
$\times 1$	0.219	0.049	0.013	0.0038	0.0011	0.00036	0.00013	0.000051	0.000018
$\times 10^{-1}$	1.82	1.22	0.91	0.70	0.56	0.45	0.37	0.31	0.26
$\times 10^{-2}$	4.04	3.35	2.96	2.68	2.47	2.30	2.15	2.03	1.92
$\times 10^{-3}$	6.33	5.64	5.23	4.95	4.73	4.54	4.39	4.26	4.14
$\times 10^{-4}$	8.63	7.94	7.53	7.25	7.02	6.84	6.69	6.55	6.44
$\times 10^{-5}$	10.94	10.24	9.84	9.55	9.33	9.14	8.99	8.86	8.74
$\times 10^{-6}$	13.24	12.55	12.14	11.85	11.63	11.45	11.29	11.16	11.04
$\times 10^{-7}$	15.54	14.85	14.44	14.15	13.93	13.75	13.60	13.46	13.34
$\times 10^{-8}$	17.84	17.15	16.74	16.46	16.23	16.05	15.90	15.76	15.65
$\times 10^{-9}$	20.15	19.45	19.05	18.76	18.54	18.35	18.20	18.07	17.95
$\times 10^{-10}$	22.45	21.76	21.35	21.06	20.84	20.66	20.50	20.37	20.25
$\times 10^{-11}$	24.75	24.06	23.65	23.36	23.14	22.96	22.81	22.67	22.55
$\times 10^{-12}$	27.05	26.36	25.96	25.67	25.44	25.26	25.11	24.97	24.86
$\times 10^{-13}$	29.36	28.66	28.26	27.97	27.75	27.56	27.41	27.28	27.16
$\times 10^{-14}$	31.66	30.97	30.56	30.27	30.05	29.87	29.71	29.58	29.46
$\times 10^{-15}$	33.96	33.27	32.86	32.58	32.35	32.17	32.02	31.88	31.76



شکل ۱۱-۹الف منحنی تغییرات W(u) نسبت به u

مدت زمان انجام آزمایش پمپاژ بستگی به تغییرات دبی در اثر پمپاژ دارد و باید سعی کرد زمان بقدری طولانی باشد که مقدار افت آب درچاه مشاهده‌ای تقریباً ثابت شود. در هر صورت این مدت حتی‌المقدور از ۵ الی ۶ ساعت کمتر نباشد. برای مثال اگر در یک آزمایش پمپاژ که با دبی ۱۵۰ گالن در دقیقه (۵۶۲ لیتر در دقیقه) به مدت ۵ ساعت پمپاژ شده است مقادیر افت

سطح آب در چاهی که بفاصله ۵۲۵ فوت (۱۶۰ متر) از آن واقع است اندازه‌گیری و جدول زیر تشکیل شده باشد.

زمان(min)	r^2/t	$h_o - h$ (ft)
15	24000	1.941
30	12000	2.672
45	8000	3.115
60	6000	3.434
75	4800	3.683
90	4000	3.888
105	3429	4.061
120	3000	4.212
150	2400	4.464
180	2000	4.671
225	1600	4.925
300	1200	5.252

با توجه به منحنی تیپ شکل ۱۱-۹الف چنانچه در صفحه‌ای مشابه داده‌های ستون دوم و سوم جدول فوق رسم شود (محور افقی r^2/t و محور عمودی $h_o - h$) شکلی مشابه زیر (شکل ۱۱-۹ ب) بوجود خواهد آمد. از تطابق و روی هم انداختن این منحنی و منحنی تیپ (شکل ۱۱-۹الف) ممکن است چندین حالت تطابق را بوجود آورد ولی اگر منحنی‌ها روی کاغذ لگاریتمی مشابه رسم شده باشند شکل ۱۱-۹ ج بهترین حالت برازش را نشان می‌دهد. در این صورت اگر یک نقطه تطابق را (match point) که در شکل نشان داده شده است انتخاب کنیم، مقدار r^2/t آن برابر ۱۲۰۰ و $(h_o - h)$ آن برابر ۲/۶۷۲ فوت می‌باشد. حال آن که برای همین نقطه $U = 0.058$ و $W(u) = 2.33$ خواهد بود. لذا:

$$T = \frac{Q}{4/\pi\ (h_o - h)}\ W(u)$$

$$S = 4T\ (\frac{t}{r^2})\ U = 4TU\ (\frac{1}{r^2/t})$$

$$Q = 150\ gpm = 150\ (24 \times 60) = 216000\ gpd$$

$$T = \frac{216000}{(3.14)\ (2.672)}\ (2.33) = 15000\ gal/d/ft$$

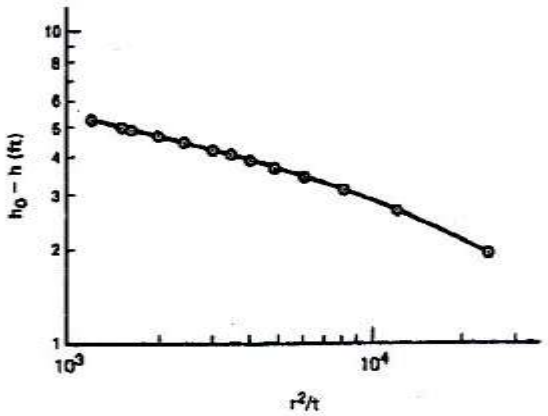
$$T = 15000\ (\frac{1}{7.48})\ (\frac{1}{24 \times 60}) = 1.39\ ft^3/min/ft$$

$$S = 4T\ (\frac{t}{r^2})\ U$$

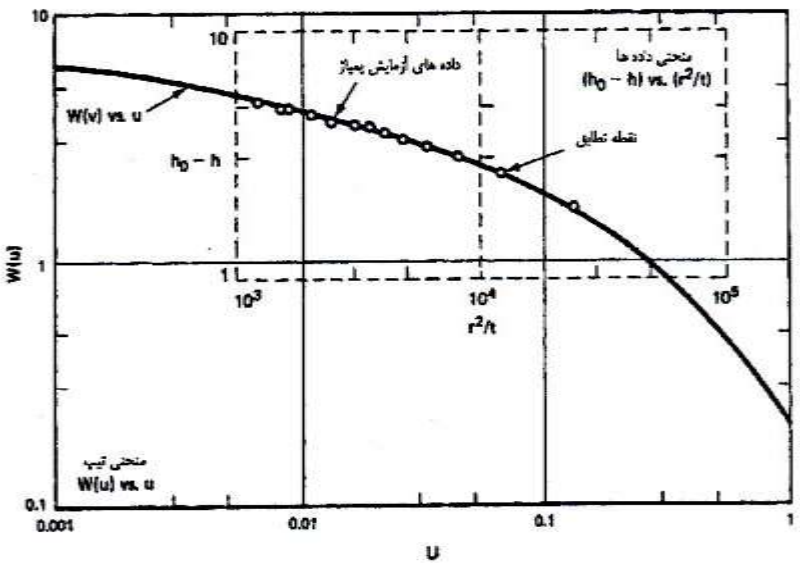
$$S = 4T\ U\ (\frac{1}{r^2/t})$$

$$S = 4\ (1.39)\ (0.058)\ (\frac{1}{12000})$$

$$S = 0.000027$$



شکل ۱۱-۹ ب



شکل ۱۱-۹ ج

توجه داشته باشید که در استفاده از معادله‌های T و S باید واحدهای یکسانی بکار برده شود تا در نهایت S بدون شده و T مطابق واحد موردنظر باشد.

● **مثال ۱۱-۵**

در یک آکیفر محصور آزمایش پمپاژ بعمل آمده و با دبی ۱/۱۱ فوت مکعب در ثانیه پمپاژ صورت گرفته است. در یک چاه مشاهده‌ای که بفاصله ۲۰۰ فوت از چاه اصلی پمپاژ قرار دارد افت سطح آب در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری و ثبت شده است. نتایج اندازه‌گیری‌ها به شرح جدول زیر می‌باشد که در آن تا زمان ۲۴۰ دقیقه اندازه‌گیری‌ها ثبت شده است. حساب کنید مقادیر قابلیت انتقال و ضریب ذخیره آکیفر را.

زمان از شروع پمپاژ (دقیقه)	1	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	8.0
افت مشاهده شده (فوت)	0.66	0.87	0.99	1.11	1.21	1.36	1.49	1.75
زمان (دقیقه)	10.0	14.0	18.0	24.0	30.0	40.0	50.0	60.0
افت (فوت)	1.86	2.08	2.20	2.36	2.49	2.65	2.78	2.88
زمان (دقیقه)	80.0	100.0	120.0	150.0	180.0	210.0	240.0	
افت (فوت)	3.04	3.16	3.28	3.42	3.51	3.61	3.67	

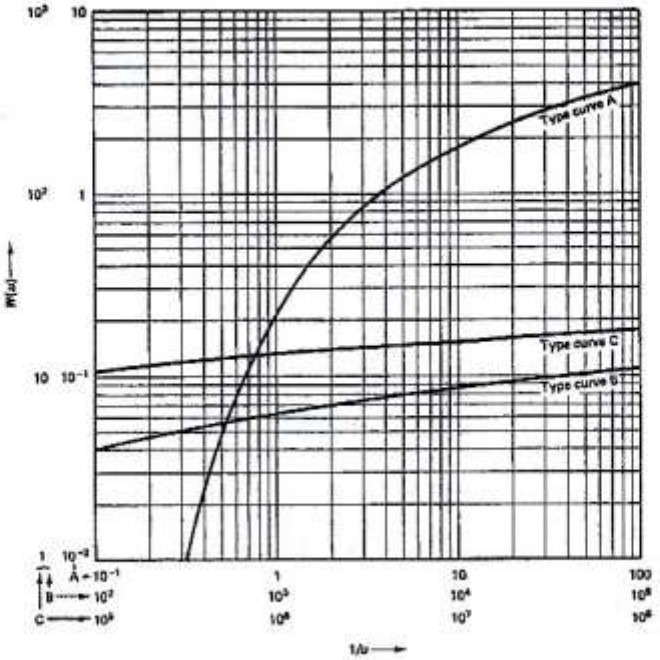
حل

با توجه به ارقام جدول فوق مقادیر t/r^2 را به ازاء افت‌های مختلف محاسبه کرده و در جدول زیر قرار داده‌ایم.

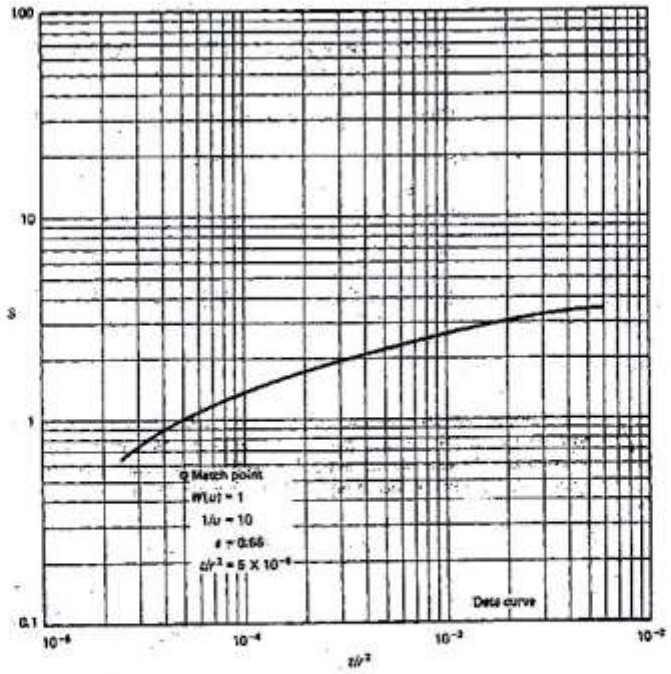
$\frac{t}{r^2}$	2.5×10^{-3}	3.75×10^{-3}	5×10^{-3}	6.25×10^{-3}	7.5×10^{-3}	1×10^{-4}	1.25×10^{-4}	2×10^{-4}
s	0.66	0.87	0.99	1.11	1.21	1.36	1.49	1.75
$\frac{t}{r^2}$	2.5×10^{-4}	3.5×10^{-4}	4.5×10^{-4}	6.0×10^{-4}	7.5×10^{-4}	1×10^{-3}	1.25×10^{-3}	1.5×10^{-3}
s	1.86	2.08	2.20	2.36	2.49	2.65	2.78	2.88
$\frac{t}{r^2}$	2×10^{-3}	2.5×10^{-3}	3×10^{-3}	3.75×10^{-3}	4.5×10^{-3}	5.4×10^{-3}	6×10^{-3}	
s	3.04	3.16	3.28	3.42	3.51	3.61	3.67	

منحنی تیپ $W(u)$ نسبت به $1/u$ و منحنی s نسبت به t/r^2 روی کاغذهای لگاریتمی که از نظر اندازه سیکل‌ها مشابه هستند رسم شده که به ترتیب مطابق شکل‌های ۱۱-۱۰ و ۱۱-۱۱ می‌باشد. توجه شود که در شکل ۱۱-۱۰ منحنی تیپ به سه قسمت تقسیم شده است که هر سه قسمت آن برای سادگی کار در یک گراف واحد نشان داده شده است.

منحنی داده‌های آزمایشی با قسمت A در منحنی تیپ مطابقت خواهد داشت که پس از انطباق، نقطه‌ای به مختصات زیر را انتخاب می‌کنیم.



شکل ۱۱-۱۰ منحنی تیپ



شکل ۱۱-۱۱ داده‌های آزمایش تغییرات s نسبت به t/r^2

$W(u)=1$

$1/u=10$

این نقطه در گراف s نسبت به t/r^2 با علامت o نشان داده شده و مختصات آن روی این گراف برابر است با:

$s = 0.55$

$t/r^2 = 5 \times 10^{-5} \frac{min}{ft^2}$

بنابراین مقادیر S و T برابر خواهند بود با:

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

$$T=\frac{1.11}{4(3.14)(0.55)}(1)=0.161 \text{ ft}^2/\text{sec} = 13880 \text{ ft}^2/\text{day}$$

$$S=4Tu \frac{t}{r^2}$$

$$S = 4(0.161 \frac{ft^2}{sec})(\frac{60 \text{ sec}}{1 \text{ min}}) (\frac{1}{10})(5 \times 10^{-5} \frac{min}{ft^2})$$

$$S=1.93 \times 10^{-4}$$

● مثال ۱۱-۶

در یک آکیفر محصور آزمایش پمپاژ بعمل آمده است. دبی پمپاژ ۳۰۰۰ متر مکعب در روز بوده و پس از ۳۰ ساعت افت سطح آب در سه چاه مشاهده‌ای که بفواصل ۱۵۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ متر از چاه پمپاژ قرار داشته‌اند به ترتیب ۱/۴۴، ۱/۱۷ و ۰/۹ متر می‌باشد حساب کنید قابلیت انتقال و ضریب ذخیره آکیفر را.

$\frac{t}{r^2}$ (min)	8×10^{-2}	2×10^{-2}	5×10^{-3}
s(m)	1.44	1.17	0.9

حل

این داده‌ها را روی یک کاغذ لگاریتمی رسم و منحنی شکل ۱۱-۱۲ حاصل می‌شود. این منحنی با بخش B منحنی تیپ که در مثال قبل رسم شده است مطابقت دارد و نقطه انتخابی با علامت * روی شکل ۱۱-۱۲ مشخص گردیده است در این صورت خواهیم داشت:

$W(u)=5$

$$\frac{1}{u} = 2.8 \times 10^3$$

$s = 1$

$$\frac{t}{r^2} = 1 \times 10^{-1}$$

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

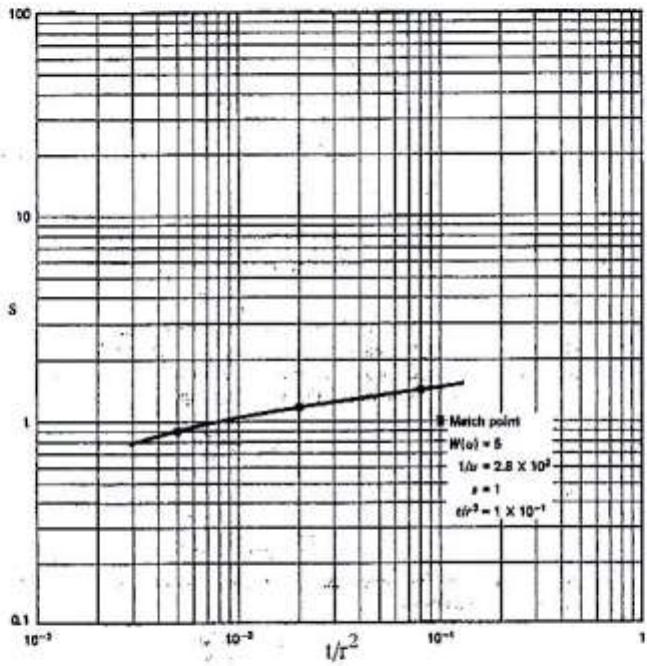
در نتیجه:

$$T=\frac{3000}{4(3.14)(1)}(5) = 1194\ m^2/day$$

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

$$S= 4(1194\ \frac{m^2}{day})(\frac{1}{2.8\times 10^3})(1\times 10^{-1}\ \frac{min}{m^2})(\frac{1\ day}{24\times 60\ min})$$

$$S = 1.2\times 10^{-4}$$



شکل ۱۱-۱۲

● مثال ۱۱-۷

در چاهی که کاملاً در یک لایه آبدار تحت فشار حفر شده است آزمایش پمپاژ بعمل آمده است، دبی خروجی از چاه ۲۵۰۰ مترمکعب در روز است. افت سطح آب در چاه مشاهده‌ای که در فاصلهٔ ۶۰ متری از چاه اصلی واقع است در زمانهای مختلف اندازه‌گیری و نتایج حاصله در ستون اول و دوم جدول ۱۱-۴ ردیف شده‌اند. ضرایب هیدرودینامیکی آکیفر (T و S) را بدست آورید.

حل

ـ مقادیر r^2/t برحسب m^2/min برای هر یک از ردیفهای جدول محاسبه و در ستون جداگانه‌ای (ستون آخر سمت راست) نوشته شده است.

جدول ۱۱-۴ نتایج آزمایش پمپاژ در مثال ۱۱-۷

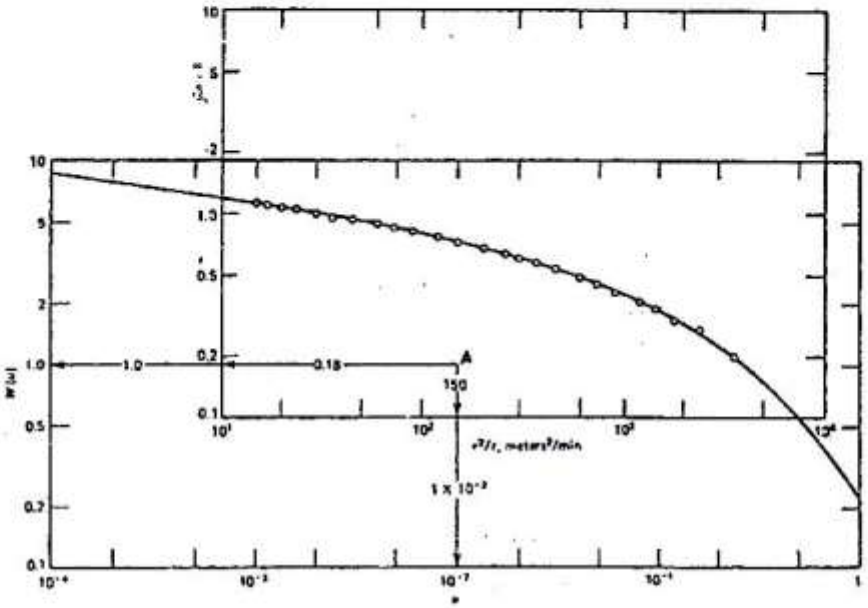
زمان t,min	افت s,m	r^2/t m^2/min
0	0	∞
1.0	0.20	3600
1.5	0.27	2400
2.0	0.30	1800
2.5	0.34	1440
3.0	0.37	1200
4	0.41	900
5	0.45	720
6	0.48	600
8	0.53	450
10	0.57	360
12	0.60	300
14	0.63	257
18	0.67	200
24	0.72	150
30	0.76	120
40	0.81	90
50	0.85	72
60	0.90	60
80	0.93	45
100	0.96	36
120	1.00	30
150	1.04	24
180	1.07	20
210	1.10	17
240	1.12	15

ـ از روی ارقام جدول ۱۱-۴ منحنی تیپ در یک دستگاه محور مختصات لگاریتمی رسم می‌شود.

ـ در یک دستگاه مشابه دیگر لگاریتمی محور افقی به r^2/t و محور قائم به s اختصاص داده شده و نقاطی راکه مختصات آنها به ازای t های مختلف s و r^2/t است، مشخص شود.

ـ دو دستگاه محور مختصات رویهم مطابقت داده می‌شود تا بهترین برازش را مطابق شکل

۱۱-۱۳ داشته باشند، در شکل مذکور خط مشکی مربوط به دستگاه مختصاتی پایین و نقاط دایره‌ای مربوط به‌دستگاه مختصاتی بالاست. این دو دستگاه طوری رویهم قرار گرفته‌اند که محورهای آنها موازی بوده و نقاط با منحنی بهترین برازش را داشته باشد.



شکل ۱۱-۱۳ تطابق منحنی تیپ با نتایج آزمایش پمپاژ.

ـ یک نقطهٔ دلخواه (A) روی صفحهٔ مختصات انتخاب می‌کنیم. مختصات این نقطه انتخابی به‌شرح زیر می‌باشد.

$r^2/t = 150\ m^2/min$ $\qquad u = 10^{-2}$

$s = 0.18\ m$ $\qquad W(u) = 1$

ـ لذا ضرایب T و S به شرح زیر قابل محاسبه است.

$$T = \frac{Q}{4\pi s}W(u) = \frac{2500(1)}{4 \times 3.14 \times 0.18} = 1105\ m^2/day$$

$$S = \frac{4Tu}{r^2/t} = \frac{4 \times 1105(1 \times 10^{-2})}{150 \times 1440} = 0.000206$$

● **مثال ۱۱-۸**

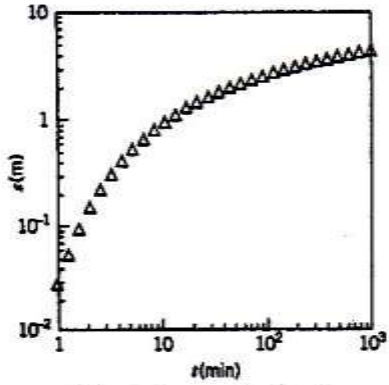
در یک آزمایش پمپاژ از لایه آبدار محصور دبی خروجی از پمپ ۵۰۰ متر مکعب در روز

بوده است.در چاهی که بفاصله ۳۰۰ متر از چاه پمپاژ قرار دارد افت سطح ایستابی اندازه‌گیری و به شرح جدول زیر بوده است. با استفاده از روش منحنی تیپ قابلیت انتقال (T) و قابلیت ذخیره (S) را بدست آورید.

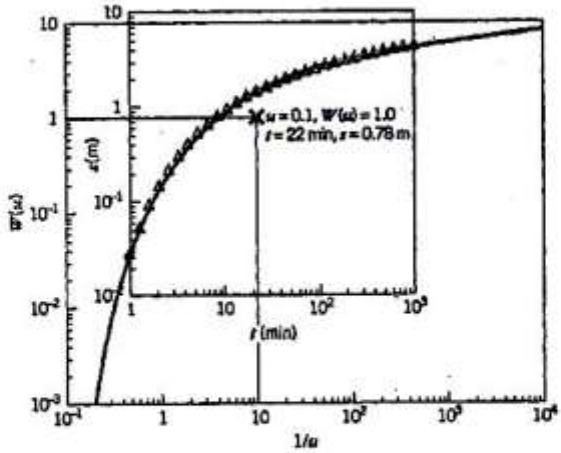
افت (m)	زمان (min)	افت (متر)	زمان (min)
1.96	42.20	0.03	1.0
2.15	57.36	0.05	1.27
2.33	72.79	0.09	1.61
2.52	92.37	0.15	2.04
2.70	117.21	0.22	2.59
2.89	148.74	0.41	4.18
3.07	188.74	0.53	5.30
3.26	239.50	0.66	6.72
3.45	303.92	0.80	8.53
3.64	385.66	0.95	10.83
3.83	489.39	1.11	13.74
4.02	621.02	1.27	17.43
4.21	788.05	1.44	22.12
4.21	788.05	1.61	28.07
4.39	1000	1.79	35.662

حل

ابتدا منحنی افت (s) بر حسب متر را نسبت به زمان بر حسب دقیقه رسم می‌شود:



با رسم منحنی تیپ معکوس و تطابق آن با منحنی فوق شکلی بصورت زیر حاصل می‌شود



نقطه‌ای به مختصات $1/u = 10$, $W(u) = 1$ زیر را روی منحنی تیپ معکوس انتخاب می‌کنیم. در این نقطه مقادیر t و s به ترتیب ۲۲ دقیقه و ۰/۷۸ متر خواهد بود. در نتیجه خواهیم داشت.

$$\begin{cases}\frac{1}{u} = 10 \quad \Rightarrow U = 0.1 \\ W(u) = 1\end{cases} \qquad \begin{cases}t = 22 \quad \text{min} \\ s = 0.78 \text{ m}\end{cases}$$

$$T = \frac{Q}{4\pi s} W(u) = \frac{(500 \text{ m}^3/\text{day})(1)}{(4\pi)(0.78 \text{ m})} = 51 \text{ m}^2/\text{day}$$

$$S = \frac{4T\,tU}{r^2} = \frac{4(51 \text{ m}^2/\text{day})\,(22 \text{ min}\frac{1 \text{ day}}{1440 \text{ min}})\,0.1}{(300 \text{ m})^2} = 3.46\times10^{-6}$$

روش کوپر - ژاکوب

کوپر (Cooper) و ژاکوب (Jacob) نشان دادند که اگر در معادله تیس u کوچک باشد ($u<0.05$) می‌توان معادله افت سطح آب را بصورت زیر خلاصه نمود.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \qquad (۶۰-۱۱)$$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} [-0.5772 - \ln(u)] \qquad (۶۱-۱۱)$$

بطوری که مشاهده می‌شود دراین روش در تابع چاه از عبارت $u - \frac{u^2}{2\times 2!} + \frac{u^3}{3\,3!} - \cdots$ که اثر چندانی ندارد صرف نظر شده است. معادله (۱۱-۶۱) را می‌توان بصورت زیر در آورد.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} (\ln 0.562 - \ln \frac{r^2 S}{4Tt}) \qquad (۶۲-۱۱)$$

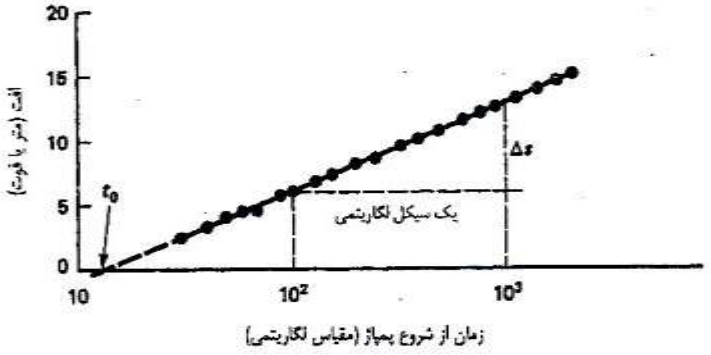
$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25\,Tt}{r^2 S} \qquad (۶۳-۱۱)$$

$$s = \frac{2.3\ Q}{4\ \pi T} \log \frac{2.25\ Tt}{r^2\ S} \qquad (۶۴-۱۱)$$

اگر معادله (۱۱-۶۴) را روی یک کاغذ نیمه لگاریتمی رسم کنیم یک خط مستقیم خواهد بود که شیب آن $\frac{2.3Q}{4\pi T}$ می‌باشد. این خط رابه سه طریق می‌توان رسم کرد که هر کدام یک روش برای تحلیل داده‌های آزمایشی پمپاژ می‌باشند.

الف - تحلیل از طریق رسم منحنی افت نسبت به زمان

در این روش مقادیر اندازه‌گیری شده افت سطح آب در چاه مشاهده‌ای که در فاصله r از چاه اصلی قرار دارد نسبت به زمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای این منظور مقادیر افت (s) روی محور عمودی که مقیاس آن معمولی است برده شده و زمان (t) روی محور افقی که مقیاس لگاریتمی دارد آورده می‌شود (شکل ۱۱-۱۴).



شکل ۱۱-۱۴ تغییرات s نسبت به زمان

در این شکل شیب خط حاصله (m) برابر است با:

$$m = \frac{\Delta s}{\log t_2 - \log t_1} \qquad (۶۵-۱۱)$$

$$m = \frac{\Delta s}{\log (t_2 / t_1)} \qquad (۶۶-۱۱)$$

از طرفی بر اساس معادله (۱۱-۶۴) در بخش قبل شیب خط برابر $\frac{2.3Q}{4\pi T}$ می‌باشد لذا:

$$\frac{2.3Q}{4\pi T} = \frac{\Delta s}{\log (t_2 / t_1)} \qquad (۶۷-۱۱)$$

اگر اختلاف t_2 و t_1 را برابر یک سیکل لگاریتمی انتخاب کنیم $\log \frac{t_2}{t_1}$ همیشه برابر یک خواهد شد بنابراین:

$$\frac{2.3Q}{4\pi T} = \frac{\Delta s}{1} \qquad (۶۸-۱۱)$$

$$\Delta s = \frac{2.3Q}{4\pi T} \qquad (۶۹-۱۱)$$

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi \Delta s} \qquad (۷۰-۱۱)$$

که در آن Δs اختلاف افت به ازاء یک سیکل لگاریتمی است. از طرف دیگر در جائی که خط محور افقی را قطع می‌کند افت سطح آب صفر است. یعنی اگر این نقطه را روی محور افقی t_o بنامیم خواهیم داشت:

$$s = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25\ Tt}{r^2 S} \qquad (۷۱-۱۱)$$

$$0 = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25 T t_o}{r^2 S} \qquad (۷۲-۱۱)$$

چون در فرمول (۱۱-۷۲) حاصلضرب دو جمله صفر شده است و قسمت اول آن عدد ثابت می‌باشد لذا فقط قسمت دوم آن می‌تواند صفر باشد. در این صورت:

$$0 = \log \frac{2.25\ T t_o}{r^2 S} \qquad (۷۳-۱۱)$$

$$\log 1 = \log \frac{2.25\ T t_o}{r^2 S} \qquad (۷۴-۱۱)$$

$$1 = \frac{2.25\ T t_o}{r^2 S} \qquad (۷۵-۱۱)$$

$$S = \frac{2.25\ T t_o}{r^2} \qquad (۷۶-۱۱)$$

بدین ترتیب با داشتن t_o می‌توان ضریب ذخیره را محاسبه کرد.

● مثال ۱۱-۹

با توجه به نتایج پمپاژ که در مثال ۱۱-۷ گفته شد ضرایب هیدرودینامیکی را به روش کوپر- ژاکوب محاسبه کنید.

حل

تغییرات افت سطح آب (ارقام ستون دوم در مثال ۱۱-۷) نسبت به زمان (ارقام ستون اول) را در یک سیستم نیمه لگاریتمی رسم می‌کنیم و بر حسب نتایج استخراج شده از نمودار و نتیجه به معادلات T و S شرح زیر است.

$$t_o = 0.39\ \text{min} = 2.7 \times 10^{-4}\ \text{day}$$

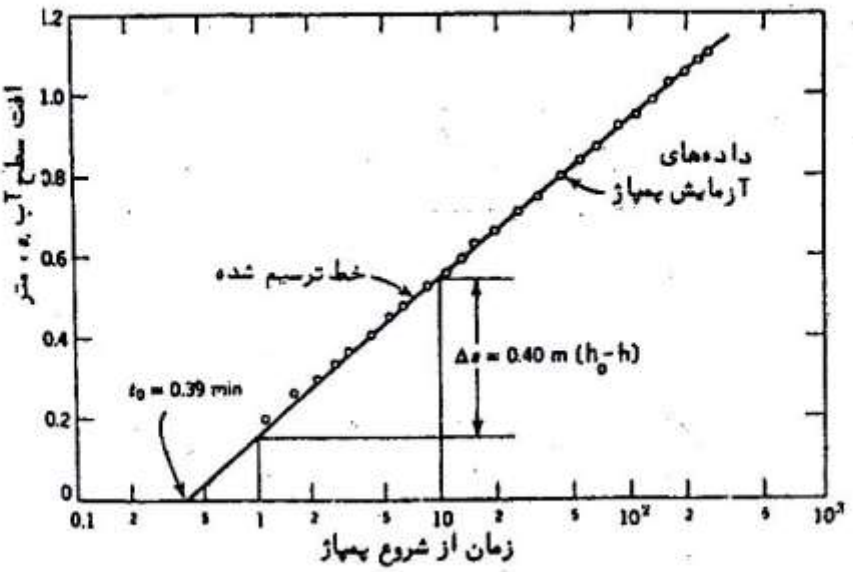
$$\Delta s = 0.4\ \text{m}$$

$$T = \frac{2.3\ Q}{4\pi \times \Delta s} = \frac{2.3\ (2500)}{4 \times 3.14 \times 0.4} = 1144.5\ \text{m}^2/\text{day}$$

$$S = \frac{2.25\ T t_o}{r^2}$$

$$S = \frac{2.25(1144.5)(2.7 \times 10^{-4})}{(60)^2}$$

$$S = 0.000193$$



شکل ۱۱-۱۵ منحنی تغییرات افت نسبت به زمان

● **مثال ۱۱-۱۰**

با روش کوپر- ژاکوب و بر اساس نتایج آزمایش پمپاژ که در شکل ۱۱-۱۶ رسم شده است ضرایب T، K و S را در لایه‌آبداری که ضخامت آن ۴۰ متر است به دست آورید. دبی ثابت پمپاژ ۸/۵ متر مکعب در ساعت و چاه مشاهده‌ای در فاصله ۲۰ متری از چاه پمپاژ قرار دارد.

حل

افت به ازاء یک سیکل لگاریتم (t_1=0.5 تا t_2=5) در شکل ۱۱-۱۶ برابر ۰/۹ متر است لذا،

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

$$T = \frac{2.3 \times 8.5}{4 \times 3.14 \times 0.9} \log \frac{5}{0.5}$$

$$T = 1.73\ m^3/hr.m$$

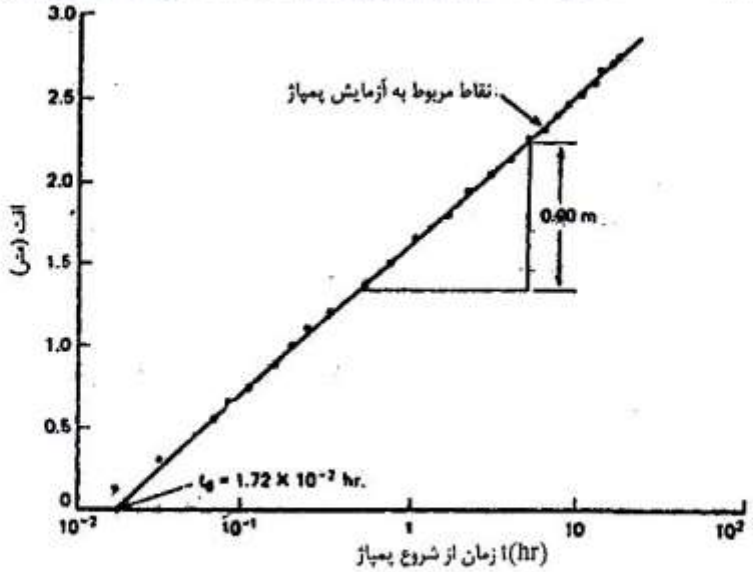
$$T = K.b$$

$$K = \frac{1.73}{40} = 0.043\ m/hr$$

$$S = \frac{2.25\ Tt_o}{r^2}$$

$$S = \frac{2.25 \times 1.73 \times 1.72 \times 10^{-2}}{(20)^2}$$

$$S = 1.67 \times 10^{-4}$$



شکل ۱۱-۱۶

● **مثال ۱۱-۱۱**

با استفاده از داده‌های مثال ۱۱-۸ ضرایب هیدرودینامیک لایه آبدار را به روش ژاکوب-کوپر بدست آورید.

حل

منحنی تغییرات افت نسبت به لگاریتم زمان بصورت زیر خواهد بود که در آن یک خط مستقیم به نقاط مشاهده شده برازش داده شده است. دو نقطه $t_1 = 100$ و $t_2 = 1000$ دقیقه را در نظر گرفته که مقادیر افت در آنها به ترتیب ۲/۵۸ و ۴/۳۹ متر می‌باشد.

$t_1 = 100$ min $\qquad t_2 = 1000$ min

$s_1 = 2.58$ m $\qquad s_2 = 4.39$ m

مقدار افت به ازاء یک سیکل لگاریتمی برابر است با:

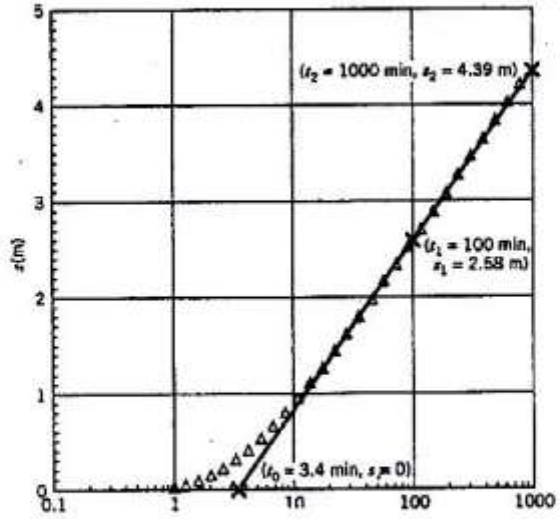
$$\Delta s = 4.39 - 2.58 = 1.81 \text{ m}$$

$$T = \frac{2.3\,Q}{4\pi\,\Delta s} = \frac{(2.3)\,(500\ m^3/d)}{4\pi(1.81\ m)}$$

$$T = 51\ m^2/day$$

از روی شکل به ازای $s = 0$ مقدار $t_0 = 3.4$ min می‌باشد لذا:

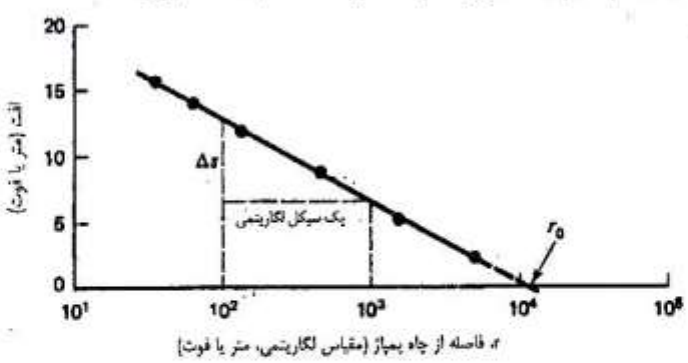
$$S = \frac{2.25\,Tt_0}{r^2} = \frac{(2.25)\,(51\ m^2/day)(3.4\ min\ \frac{1\ day}{1440\ min})}{(300\ m)^2} = 3.0\times 10^{-6}$$



شکل ۱۱-۱۷

ب - تحلیل از طریق افت نسبت به فاصله از چاه پمپاژ

اگر در یک زمان ثابت پس از پمپاژ افت سطح ایستایی در چند چاه مشاهده‌ای که بفواصل مختلف r از چاه اصلی می‌باشند اندازه‌گیری شود می‌توان رابطه بین افت سطح آب (s) را نسبت به فاصله از چاه پمپاژ روی یک کاغذ لگاریتمی رسم کرد. برای این منظور اگر s های هر چاه را نسبت به r آنها رسم کنیم وضعیتی مشابه شکل ۱۱-۱۸ بدست می‌آید.



شکل ۱۱-۱۸ تغییرات s نسبت به log r

با توجه به شکل ۱۱-۱۸ محلی که خط محور افقی را قطع می‌کند (r_0) وضعیتی است که در آن افت (s) صفر است. لذا مانند حالت قبل به ازاء یک سیکل لگاریتمی (Δs) مقادیر T و S

عبارت خواهند بود از:

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi(\Delta s)} \qquad (۷۷-۱۱)$$

$$S = \frac{2.25\ Tt}{r_o^2} \qquad (۷۸-۱۱)$$

ج - تحلیل از طریق اندازه‌گیری افت در تعدادی چاه مشاهده‌ای در زمان‌های مختلف

این حالت ترکیبی از دو حالت قبل است. در این روش افت سطح آب در هر کدام از چاههای مشاهده‌ای در زمان‌های متفاوت اندازه‌گیری می‌شود. برای هر کدام از چاهها می‌توان t/r^2 را محاسبه کرد. سپس رابطه بین s ها و $\log (t/r^2)$ را مطابق شکل ۱۱-۱۹ رسم می‌کنیم. نقطه‌ای که خط محور افقی را قطع می‌کند $(t/r_o^2)_o$ است که از روی فرمول‌های زیر می‌توان S و T بدست آورد.

$$T = \frac{2.3Q}{4\ \pi\Delta s} \qquad (۷۹-۱۱)$$

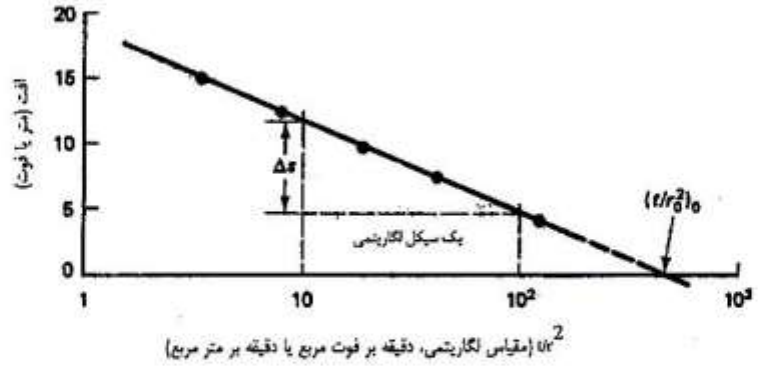
$$S = 2.25\ T(t/r_o^2)_o \qquad (۸۰-۱۱)$$

در این فرمول‌ها T دارای بعد $L^2\ T^{-1}$ و S بدون بعد است.

توجه شود که در تمام حالاتی که به روش کوپر- ژاکوب تحلیل می‌شود فرض بر این است که u بسیار کوچک می‌باشد (یعنی باید $u \leq 0.05$ گردد) بعبارت دیگر روابط زیر باید صادق باشد.

$$\frac{r^2S}{4Tt} \leq 0.05 \qquad (۸۱-۱۱)$$

$$t \geq \frac{5\ r^2S}{T} \qquad (۸۲-۱۱)$$



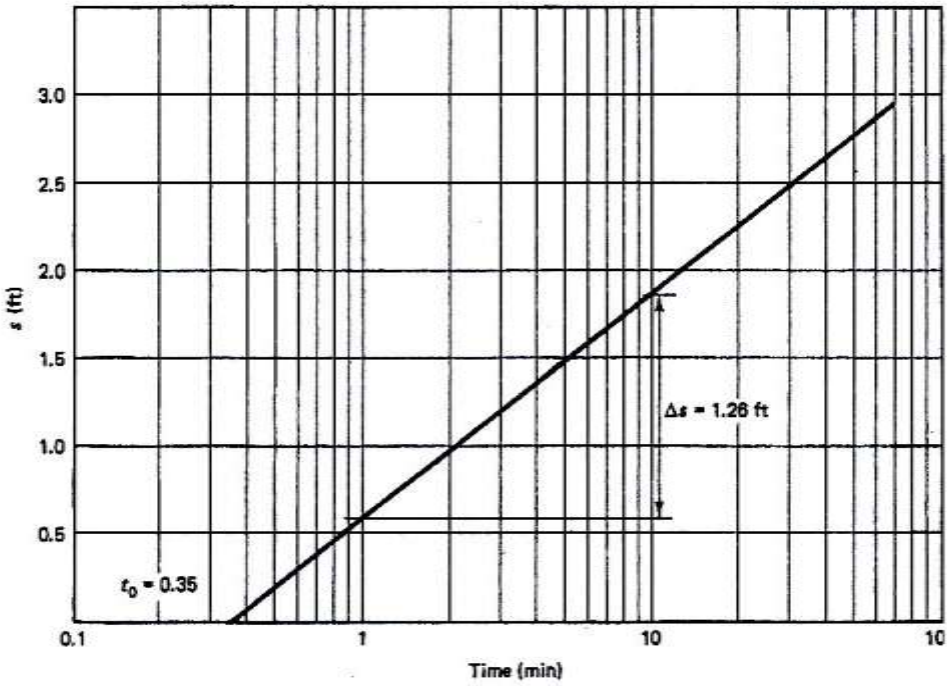
شکل ۱۱-۱۹ تغییرات s نسبت به t/r^2

● مثال ۱۱-۱۲

مثال ۱۱-۵ را به روش کوپر- ژاکوب حل کنید.

حل

روی کاغذ نیمه لگاریتمی مقادیر s را نسبت به t رسم می‌کنیم تا شکل ۱۱-۲۰ بدست آید.



شکل ۱۱-۲۰

چون به ازاء یک سیکل لگاریتمی مقدار Δs برابر ۱/۲۶ فوت می‌باشد با توجه به شکل داریم:

$$\Delta s = 1.26 \text{ ft}$$

$$t_o = 0.35$$

$$T = \frac{2.3\,Q}{4\pi\Delta s} = \frac{2.3\,(1.11)}{4(3.14)\,(1.26)} = 0.161 \text{ ft}^2\text{/se} = 13880 \text{ ft}^2\text{/ day}$$

$$S = \frac{2.25\,T\,t_o}{r^2} = 2.25\left(13880\,\frac{\text{ft}^2}{\text{day}}\right)\left(\frac{1}{200^2\text{ ft}^2}\right)(0.35\text{ min})\left(\frac{1\text{ day}}{24\times 60\text{ min}}\right)$$

$$S = 1.9 \times 10^{-4}$$

چون رابطه کوپر- ژاکوب هنگامی صادق است که $t \geq \frac{5\,r^2S}{T}$ باشد لذا:

$$t \geq \frac{5\,(200)^2\,(1.9 \times 10^{-4})}{13880}$$

$$t \geq 0.0027 \text{ day} = 4 \text{ min}$$

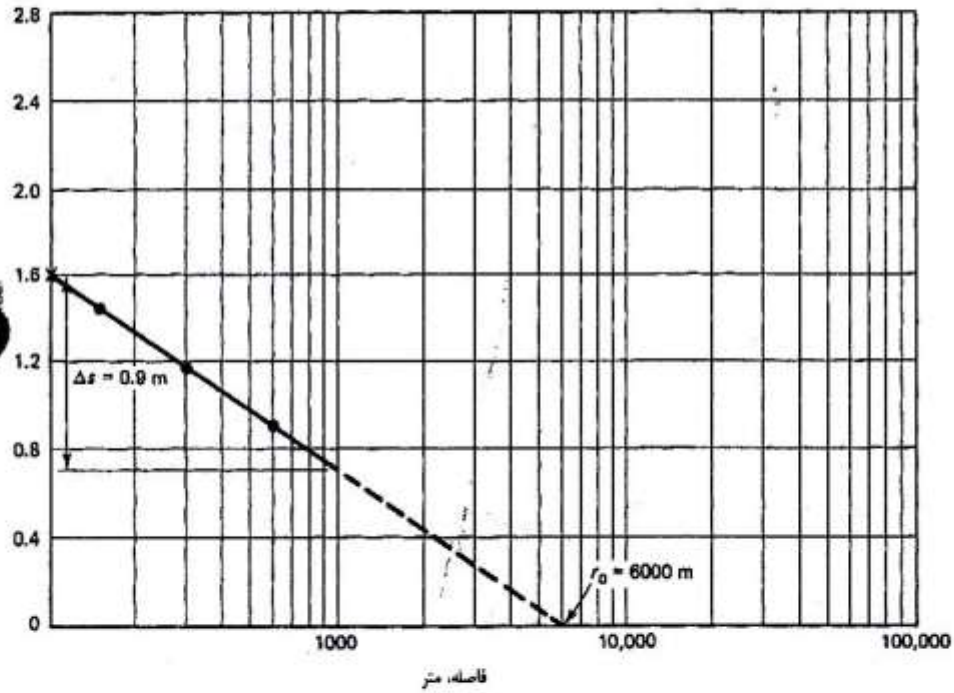
بنابراین روش مذکور برای مورد این مثال که در آن اندازه‌گیری‌ها بیش از ۴ دقیقه طول کشیده است معتبر می‌باشد.

● **مثال ۱۱-۱۳**

مساله ۱۱-۶ را به روش کوپر- ژاکوب حل کنید.

حل

برای ۳ نقطه اندازه‌گیری شده رابطه بین فاصله چاه‌های مشاهده‌ای از چاه اصلی را نسبت به افت ایجاد شده در هر چاه رسم می‌کنیم که شکلی مشابه ۱۱-۲۱ خواهد بود.



شکل ۱۱-۲۱

مطابق این شکل برای یک سیکل لگاریتمی خواهیم داشت:

$\Delta s = 0.9$ m

$r_0 = 6000$ m

$$T = \frac{2.3Q}{2\pi\ \Delta s} = \frac{2.3\ (3000)}{2(3.14)\ (0.9)} = 1220\ m^2/\ day$$

$$S = \frac{2.25\ Tt}{r_o^2}$$

$$S = 2.25\ \left(1220\ \frac{m^2}{day}\right)\ (30\ hr)\ \left(\frac{1}{6000^2\ m^2}\right)\ \left(\frac{1\ day}{24\ hr}\right) = 0.0001$$

حال معتبر بودن رابطه کوپر - ژاکوب را برای این مثال کنترل می‌کنیم زیرا باید:

$$t \geq \frac{5\ r^2S}{T}$$

$$t \geq \frac{5\ (6000)^2\ (1 \times 10^{-4})}{1220}$$

$$t \geq 0.148\ day\ = 3.5\ hr$$

چون اندازه گیری پس از ۳۰ ساعت (که بزرگتر از ۳/۵ ساعت می‌باشد) طول کشیده است، لذا استفاده از این روش معتبر است.

روش چاو

چاو (Chow) در سال ۱۹۵۲ روش‌های تیس و کوپر- ژاکوب را با همدیگر ترکیب کرده و برای تحلیل آکیفرهای غیرنشتی روش ساده‌ای را پیشنهاد نمود. فرمول پیشنهادی چاو بر اساس فرمول‌های زیر است:

$$\frac{W(u)\ e^u}{2.3} = \frac{s}{\Delta s/[\log(t_2/t_1)]} \qquad (۸۳-۱۱)$$

در فرمول فوق:

W(u) = تابع چاه

s = افت در چاه مشاهده‌ای در زمان t

$\Delta s/[\log\ (t_2/t_1)]$ = شیب خط تغییرات s نسبت به زمان در یک کاغذ نیمه لگاریتمی.

قسمت راست معادله فوق را با F(u) نشان می‌دهیم که رابطه آن با u و W(u) توسط چاو بصورت شکل ۱۱-۲۳ ارائه شده است. بنابراین:

$$F(u) = \frac{s}{\Delta s\ /[\log(t_2/t_1)]} \qquad (۸۴-۱۱)$$

حال اگر در منحنی تغییرات s نسبت به t یک سیکل لگاریتمی را انتخاب کنیم $\log\ (t_2/t_1)=1$ خواهد بود و لذا:

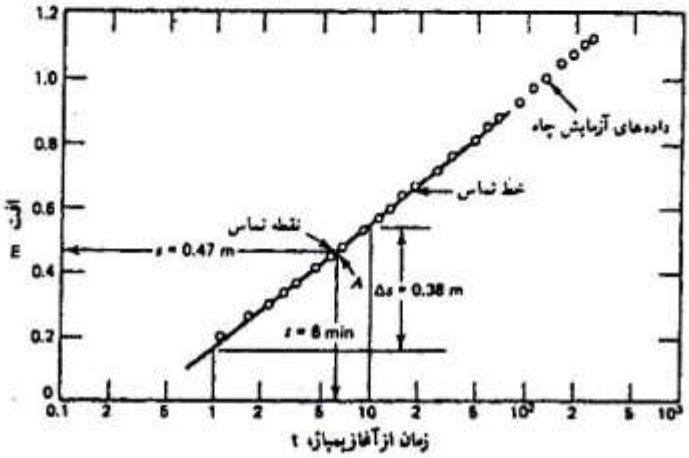
$$F\ (u) = \frac{s}{\Delta s} \qquad (۸۵-۱۱)$$

با استفاده از فرمول فوق و شکل شماره ۱۱-۲۳ می‌توان T و u را به روشی که بصورت زیر خلاصه می‌شود بدست آورد:

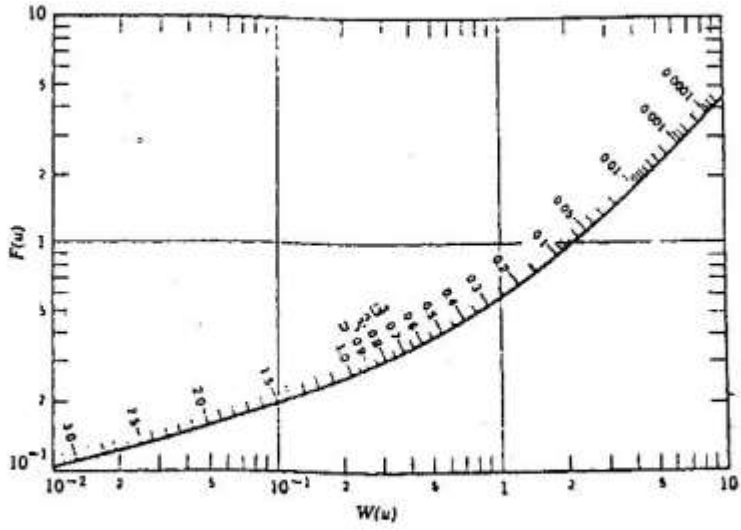
۱- روی یک کاغذ نیمه لگاریتمی تغییرات افت (محور عمودی ساده) را نسبت به زمان

(محور افقی لگاریتمی) مطابق آنچه در روش کوپر- ژاکوب گفته شد رسم کنید تا یک خط مستقیم حاصل شود. شکل ۱۱-۲۲ نمونه‌ای از این نوع گراف‌ها می‌باشد.

۲- روی این خط یک نقطه اختیاری را انتخاب کرده و مختصات را به ازاء (t , s) این نقطه را یادداشت کنید. همچنین روی این خط، تغییرات افت را به ازاء یک سیکل لگاریتمی مشخص نمائید. (Δs) یک سیکل لگاریتمی مثلا در شکل ۱۱-۲۲ که داده‌های آزمایشی از یک چاه پمپاژ رسم شده است Δs = 0.38 m بوده و نقطه اختیاری دارای مختصات t = 6 min و s = 0.47 می‌باشد.



شکل ۱۱-۲۲ روش چاو برای حل معادله غیرماندگار چاه



شکل ۱۱-۲۳ رابطه بین F(u) ، W(u) و u در روش چاو

۳- با داشتن s و Δs از فرمول ۱۱-۸۵ مقدار F(u) را محاسبه کنید.

۴- با داشتن F(u) و استفاده از شکل ۱۱-۲۳ مقدار F(u) را روی محور عمودی برده و یک خط افقی رسم کنید تا منحنی u را در نقطه‌ای قطع کند (این نقطه را که u می‌باشد یادداشت نمائید) از این نقطه یک خط عمودی رسم کنید تا محور افقی را در نقطه W(u) کند. این نقطه نیز یادداشت نمائید.

۵- با داشتن u و W(u) و s و t مقادیر T و S را از فرمول‌های زیر محاسبه کنید.

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

$$S = 4T \frac{t}{r^2} U$$

● **مثال ۱۱-۱۴**

مسالهٔ ۱۱-۵ را با روش چاو حل نمائید:

حل

در شکل ۱۱-۲۰ تغییرات افت (s) نسبت به زمان (t) رسم شده است. روی این خط نقطه‌ای دلخواه با مختصات s =1.5 ft و t = 5.1 min را انتخاب می‌کنیم. همچنین Δs به ازاء یک سیکل لگاریتم در این شکل Δs = 1.26 ft می‌باشد.

$$F(u) = \frac{s}{\Delta s} = \frac{1.5}{1.26} = 1.19$$

از روی شکل ۱۱-۲۳ به ازاء F(u) = 1.19 مقادیر u و W(u) بدست می‌آید که عبارت خواهند بود از:

$$u = 0.04$$

$$W(u) = 2.68$$

با استفاده از معادلات مربوطه T و S محاسبه می‌شوند.

$$T=\frac{Q}{4\pi s} W(u) = \frac{(1.11)\ (2.68)}{4(3.14)\ (1.5)} = 0.158\ ft^2/sec$$

$$T= 13640\ ft^2/day$$

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

$$S= 4 \left(0.158 \frac{ft^2}{sec}\right) (5.1\ min) \left(\frac{1}{200^2\ ft^2}\right) (0.04) \left(\frac{60\ sec}{1 min}\right)$$

$$S = 1.93 \times 10^{-4}$$

۱۱-۵-۲ آزمایش پمپاژ در لایه‌های آزاد

روش‌هائی که تا بحال گفته شد برای آکیفرهای تحت فشار صادق بوده و به دلایل مختلفی نمی‌توان آنها را در آکیفرهای آزاد بکار برد. از جمله این دلایل عبارتند از:

الف - تخلیه شدن آکیفر از آب در طی پمپاژ

ب - عمودی بودن جریان در نزدیک چاه

ج - تاخیر آبدهی به دلیل زهکشی ثقلی

اگر مقدار افت نسبت به ضخامت لایه آبدار کوچک باشد می‌توان از اثرات ناشی از تخلیه آب و عمودی بودن جریان صرف نظر کرده و از همان روش‌هائی که برای آکیفرهای تحت فشار گفته شد استفاده نمود. بر طبق نظر هانتوش (Hantush) اگر زمان پمپاژ بیشتر از مقدار مشخصه زیر باشد در نزدیک چاه (محدوده‌ای که فاصله آن تا چاه کمتر از ۰/۲ ضخامت آکیفر است) اثر عمودی بودن جریان قابل صرف نظر است.

$$t > 5\, b\, \frac{S_y}{K} \qquad (۸۶-۱۱)$$

در این معادله:

t= زمان

b= ضخامت آکیفر

S_y= آبدهی مخصوص

K= هدایت هیدرولیکی

فرمول دیگری نیز برای محاسبه زمان تخلیه توسط استالمان (Stallman) پیشنهاد شده است که در واقع زمان پمپاژ باید از آن نیز بیشتر باشد. این فرمول به شرح زیر می‌باشد.

$$t = 10\, S_y\, \frac{\bar{s}}{K} \qquad (۸۷-۱۱)$$

در این فرمول $\bar{s}$ مقدار افت در انتهای زمان پمپاژ می‌باشد.

بنابراین در آکیفرهای آزاد باید زمان پمپاژ از مقادیر بالا بزرگتر باشد تا بتوان روش‌هائی راکه برای آکیفرهای تحت فشار گفته شد در مورد آنها نیز بکار برد. از نظر تخلیه آکیفر از آب نیز اگر مقدار افت یا پائین آوردن سطح ایستایی کمتر از ۲۵ درصد ضخامت اولیه لایه اشباع باشد می‌توان همان فرمول‌های آکیفرهای اشباع را بکار برد با این تفاوت که لازم است اصلاحاتی روی افت‌های مشاهده شده انجام شود. برای این کار قبل از استفاده از داده‌های افت (s) باید آنها را با فرمول زیر اصلاح کرد.

$$s' = s - \frac{s^2}{2\, b} \qquad (۸۸-۱۱)$$

که در آن:

s'= مقدار اصلاح شده افت

s= مقدار مشاهده شده یا اندازه‌گیری شده افت

b= ضخامت لایه آکیفر

حال پس از آن که ضریب ذخیره با روش‌هائی که برای آکیفرهای تحت فشار گفته شد محاسبه گردید مقدار آن با فرمول زیر اصلاح می‌شود.

$$S_y = \frac{(b - \bar{s})\, S'_y}{b} \qquad (۸۹-۱۱)$$

در این فرمول:

S_y = مقدار اصلاح شده آبدهی مخصوص

S'_y = مقدار محاسبه شده آبدهی مخصوص

$\bar{s}$ = افت در انتهای آزمایش پمپاژ (در صورتی که چندین چاه مشاهده‌ای وجود داشته باشد افت در انتهای آزمایش پمپاژ در نقطه‌ای که فاصله آن تا چاه پمپاژ برابر متوسط فاصله چاههای مشاهده‌ای تا چاه اصلی باشد در نظر گرفته شود)

● مثال ۱۱-۱۵

یک چاه بطور کامل در سرتاسر لایه غیر محصور (آزاد) حفر شده است. ضخامت لایه اشباع آکیفر ۵۰ فوت و با دبی ۰/۸ فوت مکعب در ثانیه از آن پمپاژ می‌شود. افت سطح آب در یک چاه مشاهده‌ای که در فاصله ۳۰ فوتی از چاه پمپاژ قرار دارد در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری و به شرح زیر بوده است. تعیین کنید خصوصیات آکیفر را.

زمان، (min)	20	50	70	110	200	400	800	1200	1700	2000
افت، s (ft)	1.52	1.78	2.0	2.39	2.88	3.42	4.07	4.39	4.72	4.91

حل

چون آکیفر غیر محصور است برای استفاده از روش‌های مرسوم در آکیفرهای تحت فشار لازم است ابتدا s را با استفاده از فرمول زیر اصلاح کنیم.

$$s' = s - \frac{s^2}{2b}$$

نتایج اصلاح افت در جدول زیر ارائه شده است.

زمان، (min)	20	50	70	110	200	400	800	1200	1700	2000
s' (ft)	1.5	1.75	1.96	2.33	2.80	3.33	3.90	4.20	4.50	4.67

حال روش کوپر- ژاکوب را بکار برده و افت‌های اصلاح شده را نسبت به زمان در یک دستگاه محور مختصات نیمه لگاریتمی رسم می‌کنیم که شکل ۱۱-۲۴ حاصل می‌شود. در این شکل به ازاء یک سیکل لگاریتم اختلاف افت ۱/۸۵ فوت است لذا:

$\Delta s = 1.85$ ft

$t_o = 5.7$ min

$$T = \frac{2.3\ Q}{4\ \pi(\Delta s)} = \frac{2.3\ (0.8)}{4(3.14)\ (1.85)} = 0.079\ \text{ft}^2/\text{sec}$$

$T = 6842\ \text{ft}^2/\text{day}$

حال مقدار ضریب ذخیره را که همان S'_y باشد محاسبه می‌کنیم.

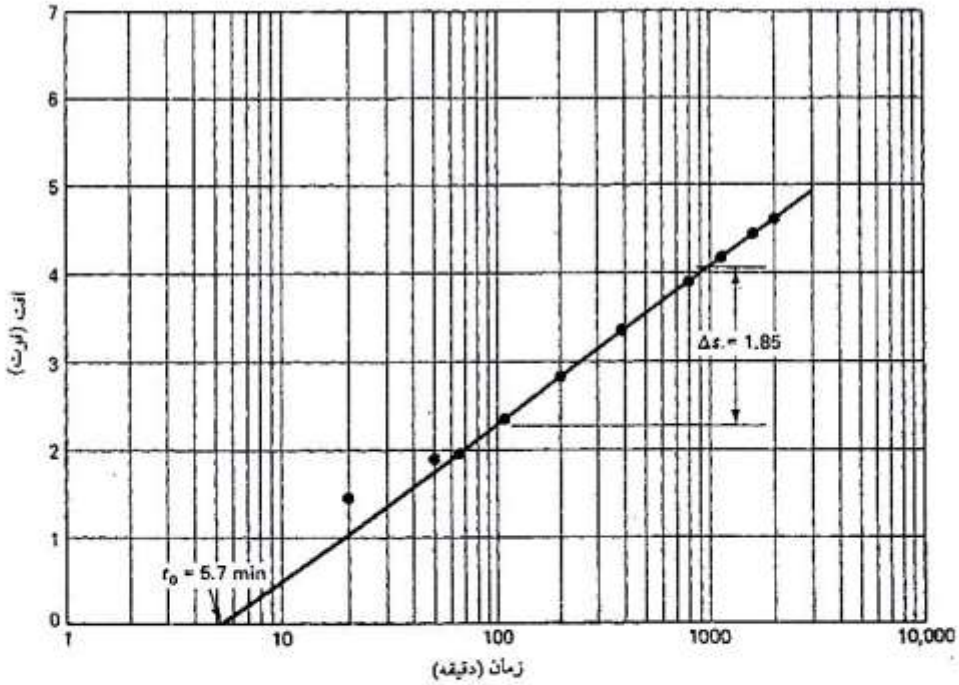
$$S'_y = S = \frac{2.25\ T\ t_o}{r^2}$$

$$S'_y = 2.25 \left(6842\ \frac{\text{ft}^2}{\text{day}}\right) (5.7\ \text{min}) \left(\frac{1}{30^2\ \text{ft}^2}\right) \left(\frac{1\ \text{day}}{24 \times 60\ \text{min}}\right)$$

$S'_y = 6.8 \times 10^{-2}$

با داشتن مقدار محاسبه شده آبدهی مخصوص مقدار اصلاح شده آن S_y را از فرمول زیر بدست می‌آوریم.

$$S_y = \frac{(b - s)\ S'_y}{b}$$



شکل ۱۱-۲۴

چون s افت در انتهای دوره پمپاژ برابر ۴/۶۷ فوت می‌باشد لذا:

$$S_y = \left(\frac{50 - 4.67}{50}\right)(6.8 \times 10^{-2}) = 6.16 \times 10^{-2}$$

برای این که کنترل شود آیا زمان پمپاژ به اندازه کافی طولانی بوده است که از روش‌های مرسوم در آکیفرهای تحت فشار استفاده کنیم یا خیر t را از فرمول زیر بدست می‌آوریم.

$$t > 5\ b\ \frac{S_y}{K}$$

$$t > 5\ (50)\ (6.16 \times 10^{-2})\ \left(\frac{1}{T/b}\right)$$

$$t > 5\ (50)\ (6.16 \times 10^{-2})\ \left(\frac{1}{6842/50}\right)$$

$$t > 0.11\ \text{day}$$

$$t > 160\ \text{min}$$

چون زمان پمپاژ (۲۰۰۰ دقیقه) بوده که بیش از ۱۶۰ دقیقه می‌باشد لذا از نظر اثر عمودی بودن جریان مشکلی وجود نخواهد داشت. از نظر تاثیر زمان تخلیه نیز باید زمان را کنترل نمود. در این مورد خواهیم داشت:

$$t = 10\ S_y\ \frac{\bar{s}}{K}$$

$$t = 10\ (6.16 \times 10^{-2})\ (4.67)\ \left(\frac{1}{6842/50}\right)$$

$$t = 0.021\ \text{day} = 30\ \text{min}$$

بنابراین چون زمان پمپاژ بیش از ۳۰ دقیقه بوده است لذا اثر زمان تخلیه شدن آکیفر از آب نیز قابل اغماض است.

۶-۱۱ تغذیه مصنوعی آبهای زیرزمینی

امروزه تخلیه آبهای زیرزمینی و عدم جایگزین شدن آب این منابع یکی از بزرگترین مشکلات محسوب می‌شود. خشک شدن تعداد زیادی از قناتها و چاهها باعث شده است که بخش زیادی از سرمایه گذاری‌های انجام شده از بین برود. تغذیه مصنوعی یکی از روش‌هائی است که می‌تواند بخشی از آب خارج شده از زیرزمین را جایگزین نماید. تغذیه مصنوعی آبهای زیرزمینی با روش‌های مختلف صورت می‌گیرد که ۵ روش بیش از سایر روش‌ها کاربری دارند. این روش‌ها عبارتند از:

۱- پخش آب (water spreading) از طریق:

الف - غرقاب کردن زمین در کرت‌های وسیع یا حوضچه‌ای (basin)

ب - تغذیه از طریق رودخانه (stream channel)

ج - تغذیه از طریق ایجاد نهر (ditch method)

د - تغذیه از طریق پخش سیلاب (flooding method)

۲- گودال‌های تغذیه

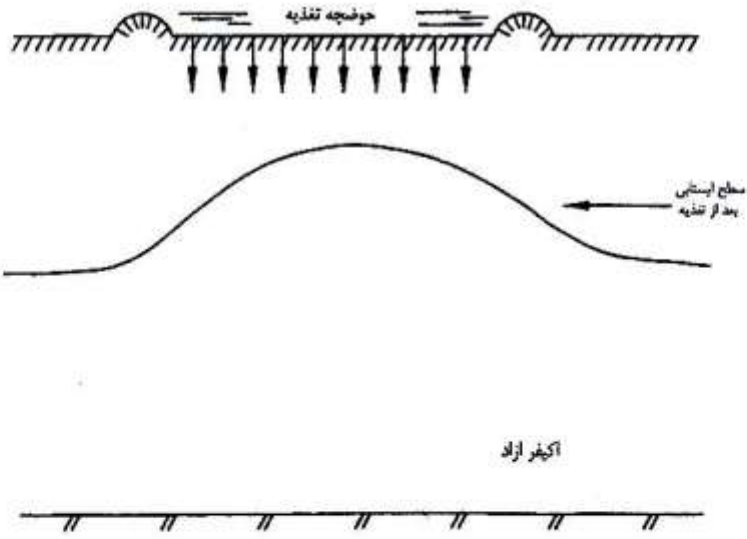
۳- چاههای تغذیه

۴- تشدید تغذیه

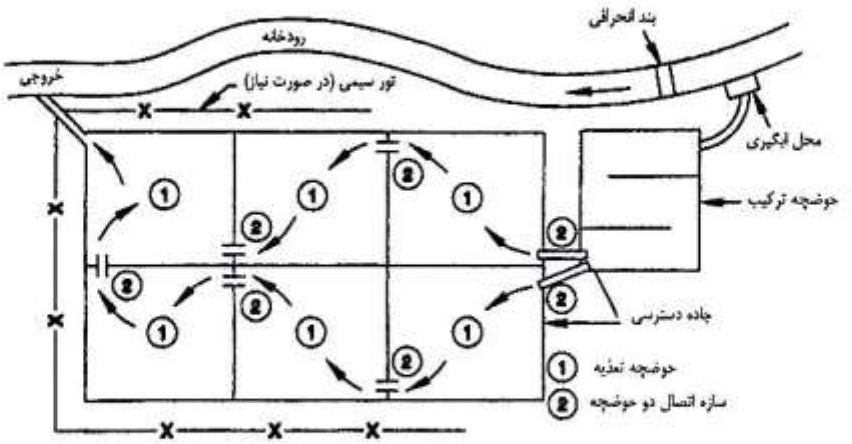
۵- پخش پساب‌ها روی زمین

روش حوضچه‌ای (basin method)

در این روش آب از رودخانه یا منابع دیگر وارد یک (شکل ۱۱-۲۵) یا تعدادی حوضچه که پشت سرهم ساخته شده‌اند (شکل ۱۱-۲۶) می‌شوند. آب بتدریج در خاک نفوذ کرده و وارد لایه آبدار زیرزمینی می‌گردد. سرعت نفوذ بستگی به اختلاف سطح آب روی زمین و سطح ایستایی دارد و خصوصیات فیزیکی خاک دارد. اما از جائی که بتدریج منافذ خاک گرفته می‌شود سرعت نفوذ نسبت به زمان کاهش پیدا می‌کند. کاهش سرعت نفوذ ممکن است بحدی باشد که آب بمدت طولانی در سطح زمین باقی مانده و تبخیر گردد. در این روش اطراف کرت‌ها پشته سازی می‌شود تا از حرکات جانبی آب جلوگیری شود. روش حوضچه‌ای می‌تواند بصورت طبیعی با آب رودخانه و یا مصنوعی با وارد کردن آب از محل دیگر صورت گیرد.



شکل ۱۱-۲۵ تغذیه آب زیرزمینی در آکیفرهای آزاد با روش حوضچه‌ای



شکل ۱۱-۲۶ تغذیه آب زیرزمینی با آبگیری از رودخانه و استفاده از تعدادی حوضچه پشت سرهم

روش تغذیه رودخانه‌ای (stream - channel method)

در رودخانه‌های آبرفتی آب در طی جریان در کف و دیواره نفوذ کرده و وارد لایه‌های آبدار زیرزمینی می‌شود. برای افزایش تغذیه باید اقداماتی را در رودخانه انجام داد تا هم زمان توقف آب در مسیر و هم سطح نفوذ افزایش یابد. از جمله این اقدامات عبارتند از: عریض کردن بستر، ایجاد موانع در مسیر حرکت آب با مواد رودخانه‌ها و یا احداث سدهای موقتی.

روش تغذیه با ایجاد نهر (ditch method)

مشابه روشی که در مورد رودخانه‌ها گفته شد در این روش تعدادی نهر عریض بفاصله نزدیک‌ازهمدیگرساخته‌شده‌وآب‌واردآن‌هامی‌گردد.عرض‌این‌نهرها۱تا ۳ متر و شیب آن‌ها طوری است که مانع از ته نشین شدن ذرات کلوئیدی که باعث مسدود شدن منافذ شوند می‌گردد.

روش غرقابی (flooding method)

این روش مشابه روش کرتی است با این تفاوت که پشته وجود نداشته و فقط در اراضی مسطح آب روی زمین پخش می‌شود تا بتدریج در زمین نفوذ کند. مقدار پخش آب و عمق آن باید بقدری باشد که فرسایش خاک صورت نگیرد. با این وجود لازم است اطراف منطقه‌ای که قرار است تغذیه صورت گیرد خاکریز ساخته شود تا آب در همان محدوده محصور گردد. این روش ساده‌ترین و کم هزینه‌ترین روش برای تغذیه مصنوعی است.

گودال‌های تغذیه (recharge pits)

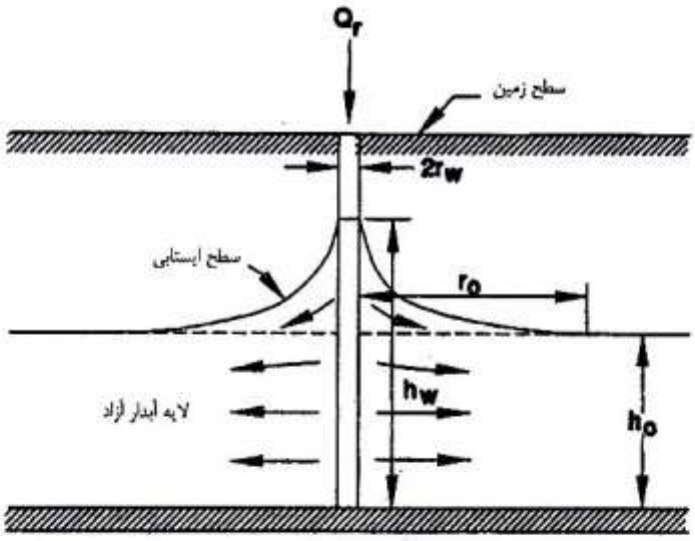
اگر سطح زمین را لایه نسبتاً سخت و تراکم پوشانده ولی در زیر آن لایه نفوذپذیر وجود داشته باشد با ایجاد حفره و گودال می‌توان شرایط نفوذ آب را فراهم کرد. این گودالها باید از لایه

سطحی عبور کرده و به منطقه‌ای برسد که نفوذپذیری آن زیاد باشد.

چاههای تغذیه (recharge well)

چاههای تغذیه مشابه با چاههای پمپاژ هستند. در این روش آب وارد چاه شده و با ایجاد مخروط تغذیه به اطراف آن نفوذ می‌کند. باید توجه داشت که میزان تغذیه چاه برابر مقدار پمپاژ آن نیست زیرا هدایت هیدرولیکی در هنگام تغذیه به دلیل مسدود شدن منافذ کمتر از هدایت هیدرولیکی در هنگام پمپاژ است. تغذیه از طریق تزریق آب در چاه فقط یک روش مصنوعی بوده و نمی‌تواند بصورت طبیعی انجام شود.

بطوریکه در شکل ۱۱-۲۷ مشاهده می‌شود یک چاه تغذیه درست برعکس چاه‌های پمپاژ عمل می‌کند. در اینجا بجای ایجاد مخروط افت مخروط دیگری بصورت قیف وارونه ایجاد شده و آب با دبی معین (Q_r) وارد لایه‌آبدار آزاد یا محصور می‌گردد. ملاحظه می‌شود که برعکس چاه‌های پمپاژ در حالت تغذیه ارتفاع آب در چاه (h_w) بیشتر از ارتفاع آب در آکیفر (h_o) می‌باشد.

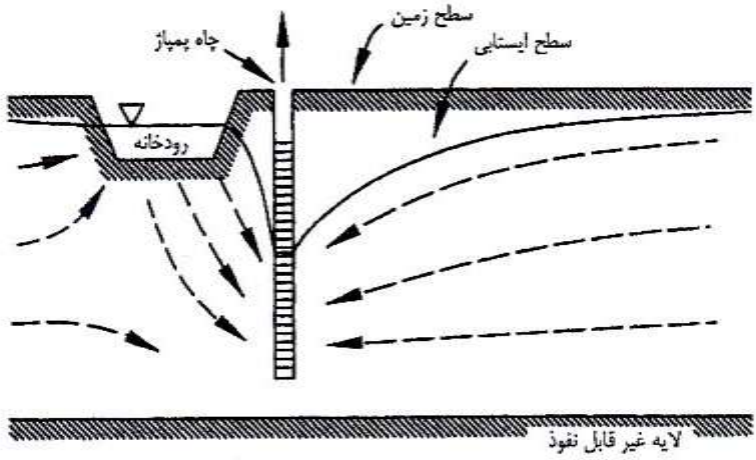


شکل ۱۱-۲۷ تزریق آب به داخل چاه برای تغذیه مصنوعی لایه آبدار

تغذیه القایی (induced recharge)

در سیستم‌هائی که آکیفر و رودخانه بهم مرتبط می‌باشند هنگامی که از چاههای مجاور رودخانه پمپاژ شود پائین رفتن سطح آب در اطراف چاه باعث می‌شود که گرادیان هیدرولیکی بین رودخانه و چاه تشدید شده و آب بیشتری از رودخانه وارد حریم چاه شود. بنابراین انجام این عمل در زمانی که رودخانه آب اضافی داشته باشد می‌تواند به تغذیه لایه‌های آبدار کمک نماید. این روش را تشدید تغذیه یا روش القائی گویند.

در واقع روش القائی (induction) به روشی گفته می‌شود که با برداشت آب زیرزمینی توسط چاه شرایط را برای ورود بیشتر آب به داخل لایه آبدار فراهم می‌آوریم. این روش در شکل ۱۱-۲۸ نشان داده شده است. در این شکل چاهی در حاشیه رودخانه حفر و از آن پمپاژ می‌شود. افت سطح آب در چاه باعث می‌شود که آب بیشتری از بستر رودخانه وارد لایه زیرزمینی گردد.



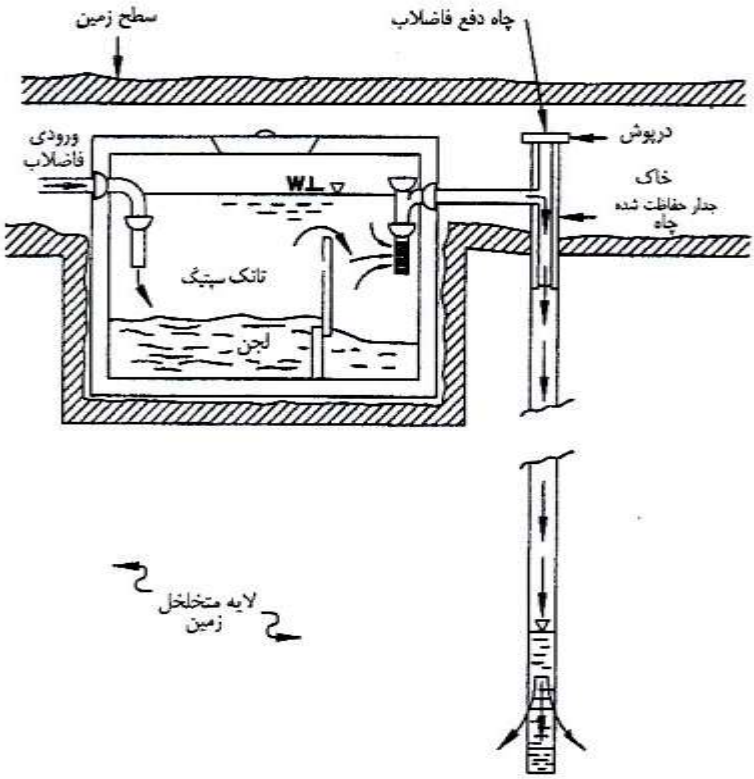
شکل ۱۱-۲۸ تغذیه القائی با برداشت آب توسط چاه

پخش پساب روی زمین

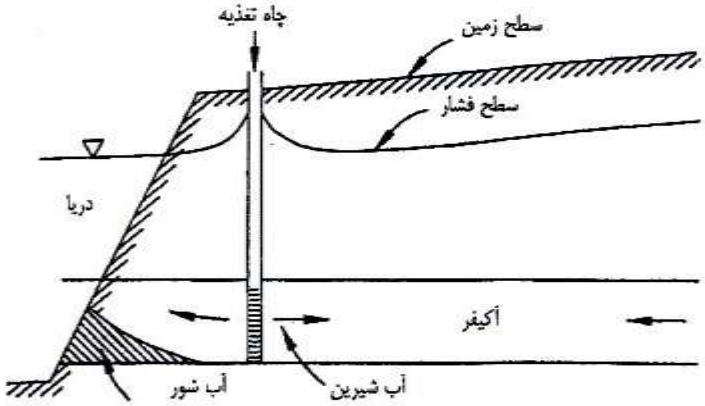
معمولاً فاضلاب‌های تصفیه شده در تغذیه آبهای زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرند با انجام این عمل علاوه بر دفع آنها که می‌تواند اثرات بهداشتی و محیطی دربرداشته باشد به تصفیه بیشتر آنها کمک شده و آبهای زیرزمینی نیز تغذیه می‌شوند. برای دفع پساب می‌توان از روش‌های تغذیه مصنوعی که در بالا گفته شد استفاده نمود.

غالباً آب حاصله از تانک‌های سپتیک که در مجتمع‌های مسکونی یا صنعتی برای دفع و تصفیه فاضلاب بکار می‌رود وارد چاه‌های تغذیه می‌شود (شکل ۱۱-۲۹). در این شرایط باید سعی کرد سپتیک بخوبی عمل کرده و کلیه جنبه‌های بهداشتی برای جلوگیری از آلوده شدن آب‌های زیرزمینی بکار برده شده و از آب‌های زیرزمینی تغذیه شده برای شرب استفاده نشود.

تغذیه مصنوعی می‌تواند در حاشیه کویرها و یا در نواحی نزدیک ساحل بمنظور جلوگیری از وارد شدن آب شور به داخل آکیفرها نیز صورت گیرد. در این شرایط از طریق حفر چاه و وارد کردن آب به داخل آن (شکل ۱۱-۳۰) لایه آبدار نزدیک ساحل پرآب شده و آب شور در اثر فشار پیزومتری اصطلاحاً بطرف دریا یا کویر پس زده می‌شود.



شکل ۱۱-۲۹ چاه تغذیه مصنوعی با فاضلاب حاصله از تانک سپتیک به داخل لایه متخلخل زمین



شکل ۱۱-۳۰ کنترل پیشروی آب شور با استفاده از چاه‌های تغذیه

۱۱-۷ تداخل آب شور

یکی از مشکلاتی که منابع آبهای زیرزمینی را تهدید می‌کند وارد شدن آبهای شور به داخل لایه‌های آبدار و یا بعبارت دیگر شور شدن لایه‌های آبدار زیرزمینی است. این امر بخصوص درمناطق ساحلی و مناطق کویری و یا نقاطی که آب شور در اعماق پائین‌تر وجود دارد از اهمیت بیشتری برخوردار است. در این مناطق آب شور و شیرین مطابق شکل ۱۱-۳۱ توسط یک جبهه از هم مجزا می‌باشند. در هر نقطه از این جبهه فشاری که از پائین و بالا وارد می‌شود مساوی بوده و لذا آن را در حالت تعادل قرار می‌دهد. فشار وارده‌از پائین‌معادل فشارآب شور $\rho_s g.Z$ و فشاری که ازبالا واردمی‌شودمعادل فشارآب شیرین وعبارت است از: $\rho_f g(Z + h)$ می‌باشد. بنابراین:

$$\rho_s g.Z = \rho_f g(Z + h) \qquad (۹۰-۱۱)$$

که در آن:

ρ_s = دانسیته آب شور

ρ_f = دانسیته آب شیرین

h = فاصله سطح ایستایی تا تراز آب سطح دریا (بار پیزومتری نسبت به سطح دریا)

Z = عمق جبهه آب شور نسبت به سطح دریا در هر نقطه

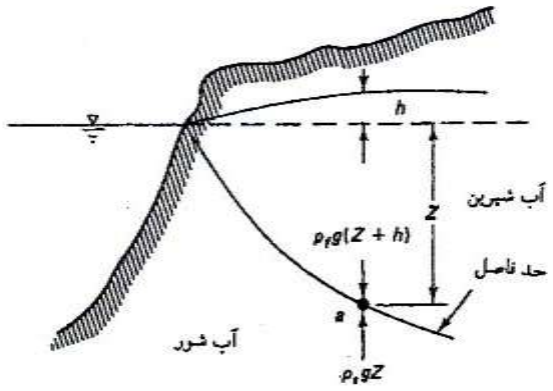
از فرمول فوق می‌توان Z را محاسبه کرد.

$$Z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h \qquad (۹۱-۱۱)$$

چون دانسیته آب شور ۱/۰۲۵ و دانسیته آب شیرین ۱ گرم در سانتی متر مکعب می‌باشد لذا:

$$Z = \frac{1.0}{1.025 - 1.0} h \qquad (۹۲-۱۱)$$

$$Z = 40\ h \qquad (۹۳-۱۱)$$



شکل ۱۱-۳۱ تعادل آب شور و شیرین در نواحی ساحلی

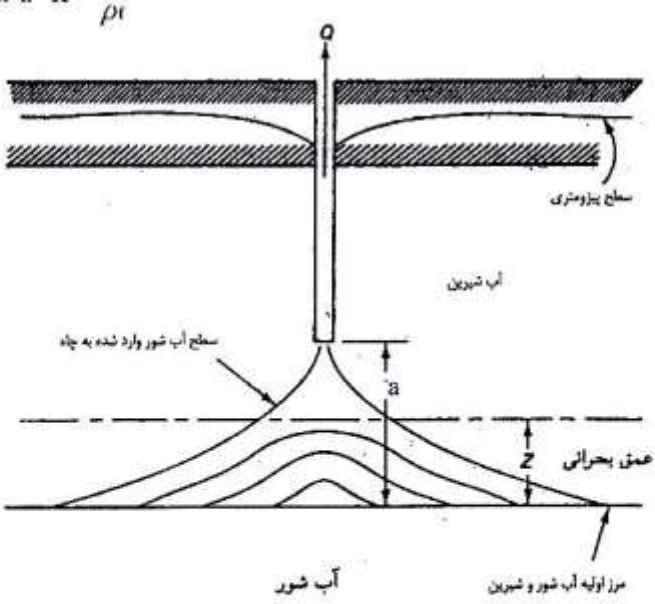
بدین ترتیب مشاهده می‌شود که اگر سطح ایستایی در نواحی ساحلی به اندازه h بالاتر از تراز سطح آب دریا قرارگیرد تا عمق 40 h در زیر آب شیرین وجود خواهد داشت و هر زمان که این به پائین‌تر از سطح دریا برسد آب شور به سمت ساحل حرکت خواهد کرد.

یکی دیگر از مسائلی که در مورد تداخل آب شور اتفاق می‌افتد وضعیتی است که در آن یک لایه آب شور در زیر لایه آب شیرین وجود داشته و چاه فقط در لایه آب شیرین حفر شده باشد و در اثر پمپاژ زیاد یا حفر بیشتر چاه، آب شور وارد چاه می‌گردد. این وضعیت که در شکل ۱۱-۳۲ نشان داده شده است بنام پدیده بالاآمدگی مخروطی آب شور (upconing) معروف است. اگر عمق اولیه خط مرزی آب شور و شیرین نسبت به انتهای چاه a و ضریب آبگذری مواد آکیفر K باشد آب شور در زیر چاه به اندازه Z بالا خواهد آمد که این مقدار بستگی به دبی پمپاژ دارد.

$$Z = \frac{Q \cdot \rho_f}{2\pi a K (\rho_s - \rho_f)} \qquad (۹۴-۱۱)$$

در این فرمول Q دبی پمپاژ و ρ_s و ρ_f به ترتیب دانسیته آب شور و شیرین می‌باشد. هنگامی که Z به مقدار نصف a برسد وضعیت بحرانی شده و آب شور می‌تواند وارد چاه شود. بنابراین با توجه به این که در این حالت Z = 0.5 a می‌باشد حداکثر دبی (Q_{max}) مجاز برای این که آب شور نتواند وارد چاه شود برابر است با:

$$Q_{max} = \pi a^2 K \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \qquad (۹۵-۱۱)$$



شکل ۱۱-۳۲ بالاآمدگی مخروطی شکل آب شور در زیر چاه پمپاژ

برای حل مسائل هیدرولیک چاه و آزمایشات پمپاژ مدل‌های کامپیوتری مختلفی ارائه شده است که از جمله می‌توان به مدل weilz.2.0 و Pumpz اشاره کرد. این مدل‌ها از سایت اینترنتی www.wiley.com/college/schwartz بخش student قابل دسترسی و downloadکردن می‌باشند.

● مثال ۱۱-۱۶

در یک آکیفر عمق لایه آب شیرین ۴۰ متر بوده و زیر آن لایه‌ای از آب شور قرارگرفته است. چاهی به عمق ۲۵ متر در لایه آب شیرین حفاری شده است. حساب کنید حداکثر دبی مجاز از این چاه را برای آنکه آب شور نتواند وارد چاه شود. دانسیته آب شور و شیرین به ترتیب ۱/۰۲۵ و ۱ گرم بر سانتی متر مکعب و ضریب هدایت هیدرولیکی لایه آبدار ۳۰۰ متر بر روز است.

$\rho_s = 1.025$

$\rho_f = 1.0$

$K = 300$ m/day

$a = 40 - 25 = 15$ m

$$Q_{max} = \pi a^2 K \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}$$

$$Q_{max} = (3.14)(15^2)(300)\left(\frac{1.025 - 1.0}{1.0}\right)$$

$$= 5298.75 \text{ m}^3/\text{day}$$

$Q_{max} = 61$ l/sec

بنابراین دبی مجاز برای اینکه آب شور نتواند وارد چاه شود ۶۱ لیتر در ثانیه است.

مسائل

۱۱-۱ در یک آکیفر تحت فشار ضخامت لایهٔ آبدار ۱۸ متر است. چاهی بطور کامل در آن‌حفر شده و با دبی ۰/۳ مترمکعب در ثانیه از آن پمپاژ به عمل می‌آید. سطح آب‌در چاههای مشاهده‌ای که در فواصل $r_1 = 20$ و $r_2 = 65$ متری از آن واقع شده است پس‌از تثبیت نسبت به قبل از پمپاژ به ترتیب ۱۶/۲۵ و ۳/۴۲ متر افت داشته است. ضریب‌نفوذپذیری آکیفر را حساب کنید.

۱۱-۲ چاهی در یک آکیفرکه ضریب نفوذپذیری آن ۱۵ متر در روز و ضریب ذخیرهٔ آن ۰/۰۰۵ است حفر شده است. ضخامت لایهٔ آبدار ۲۰ متر و دبی پمپاژ ۲۷۲۵ مترمکعب در روز است. افت سطح‌آب‌رادرفاصلهٔ ۷ متری‌ازچاه‌پمپاژپس از یک روز پمپاژ حساب کنید (جواب: ۵/۷۳ متر).

۱۱-۳ چاهی در یک آکیفر تحت فشار حفر و با دبی ۲۲۰ گالن در دقیقه پمپاژ می‌شود. مدت پمپاژ ۸ ساعت است. ضخامت لایهٔ آبدار ۱۸ فوت و افت سطح آب در چاه مشاهده‌ای که در فاصله ۸۲۴ فوتی آن قرارگرفته است در جدول زیر ثبت شده است. T ، K و S را حساب کنید.(جواب: ۱۰۵۰۰، ۵۸۰ و ۰/۰۰۰۰۲).

زمان از شروع پمپاژ (min)	t/r2	افت (ft)
3	4.46×10^{6}	0.3
5	7.46×10^{6}	0.7
8	1.18×10^{5}	1.3
12	1.77×10^{5}	2.1
20	2.95×10^{5}	3.2
24	3.53×10^{5}	3.6
30	4.42×10^{5}	4.1
38	5.57×10^{5}	4.7
46	6.94×10^{5}	5.1
50	7.41×10^{5}	5.3
60	8.85×10^{5}	5.7
70	1.03×10^{4}	6.1
80	1.18×10^{4}	6.3
90	1.33×10^{4}	6.7
100	1.47×10^{4}	7.0
130	1.92×10^{4}	7.5
160	2.36×10^{4}	8.3
200	2.95×10^{4}	8.5
260	3.83×10^{4}	9.2
320	4.72×10^{4}	9.7
380	5.62×10^{4}	10.2
500	7.35×10^{4}	10.9

۱۱-۴ ضخامت یک لایه آبدار ۲۰ متر است.روی این لایه یک لایه غیر قابل نفوذ به ضخامت ۳۰ متر قرارگرفته است. قطر چاه پمپاژ ۵۰ سانتی‌متر و دو چاه مشاهده‌ای در فواصل ۱۰ و ۶۰ متر از چاه پمپاژ قرار دارند. پس از آزمایش پمپاژ با دبی ۰/۱ متر مکعب بر ثانیه مقادیر افت در چاههای مشاهده‌ای ۴ و ۳ متر بوده است. هدایت هیدرولیکی و افت در چاه پمپاژ چقدر است. جواب (۰/۰۰۱۴۳ متر برثانیه و ۶/۰۵ متر)

۱۱-۵ ضخامت یک لایه‌آبدار محصور ۲۰ متر بوده و چاهی بطورکامل در آن حفر شده است.

حساب کنید قابلیت انتقال این لایه آبدار را در صورتی که با دبی ۱/۵ متر مکعب در دقیقه داده‌های زیر بدست آمده باشد (قطر چاه ۳۰ سانتی‌متر است).

$r_1 = 120$ m $\qquad r_2 = 58.9$

$h_1 = 58$ m $\qquad h_2 = 160$ m

(جواب: ۰/۰۰۱۷۲ متر مربع بر ثانیه)

۱۱-۶ در یک آکیفر عمیق آب شیرین تا عمق ۱۲۰ فوت ادامه داشته و زیر آن یک لایه آب شور با وزن مخصوص ۶۴ پوند بر فوت مکعب قرار گرفته است. چاهی تا عمق ۸۰ فوت در لایه شیرین حفر شده است. حساب کنید حداکثر دبی راکه می‌توان بدون این که آب شور وارد چاه شود پمپاژ کرد ضریب هدایت هیدرولیکی آکیفر ۱۰۰۰ فوت بر روز می‌باشد.

(جواب: ۱۲۸۸۰۰۰ فوت مکعب در روز (۱/۴۹ فوت مکعب بر ثانیه))

منابع برای مطالعه بیشتر

1- Bennett, G., *Introduction to ground water hydraulics*, USGS BK. 3, 1979.

2- Chow, V.T., *On the determination of transmissibility and storage coefficient from Pumping test data*. Trans. Amer. Geop. Uni. V. 33, 1952.

3- Driscoll, F.G., *Ground water and wells*, Johnson Division, St. Paul, Minnesota, USA, 1987.

4- Fetter C., *Applied hydrogeology*, Merrill Book Co. Columbus Ohio, 1982.

5- Gupta, R.S., *Hydrology and hydraulic systems*, prentice Hall New Jeresy, 1989.

6- Jacob. C., *Flow of ground water in Eng. hydraulics*, ed. H. Rose, John Wiley and Sons's Inc. New York, 1950.

7- Maidment, D.F., *Handbook hydrology*, Mc Graw-Hill Inc. NewYork, 1993.

8- Schwartz, F.W. and H. Zhang, *Fundamental of ground water* , John Wiley and Sons, Inc., New York, 2002.

9- Todd, D., *Ground water hydrology*, John Wiley and Sons, New York, 1980.

10- Wilson, E., *Engineering hydrology*, MacMillan Co. London, 1984.