دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه مازندران

عنوان درس: آب های زیرزمینی پیشرفته

Advanced Groundwater

هیدرولیک چاه ها در آبخوان های آزاد و محصور

مدرس: دکتر محمود محمد رضاپور طبری

دانشیار گروه مهندسی عمران

هیدرولیک چاه ها در آبخوان های آزاد و محصور

قانون دارسی و قوانین اساسی حاکم بر جریان آب زیرزمینی را می‌توان برای حالت‌های خاص بکار برد. در این میان حل معادلات حاکم بر جریان آب زیرزمینی ورودی به چاه از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. با استفاده از آزمایشات پمپاژ چاه‌ها می‌توان ضرایب ذخیره و انتقال آبخوان را تعیین نمود. علاوه بر این، با معلوم بودن این مشخصات از آبخوان می‌توان میزان کاهش تراز سطح آب زیرزمینی را در آینده که بر اثر پمپاژ رخ می‌دهد، محاسبه نمود. معادلات جریان چاه‌ها برای شرایط جریان پایدار و ناپایدار و برای انواع مختلفی از آبخوان‌ها و برای شرایط مرزی متفاوت توسعه داده شده است.

منظور از هیدرولیک چاه ها، بررسی رفتار جریان و رفتار آبخوان در اطراف و داخل چاه در واکنش به برداشت آب از چاه ها یا تغذیه آن ها، تعیین گستره جانبی هر آبخوان و طبیعت هیدرولیکی مرزها و مطالعه تراوش عمودی (در صورت وجود) به آبخوان می باشد. در ارتباط با رفتار آبخوان در واکنش به پمپاژ آب از چاه ها دو نوع مسئله مطرح است:

۱- شرایط مرزی و اولیه معلوم و همچنین اطلاعاتی در خصوص T، S و دبی پمپاژ مشخص و هدف توزیع بار هیدرولیکی در نقاط مختلف آبخوان و در زمان های آینده می باشد.

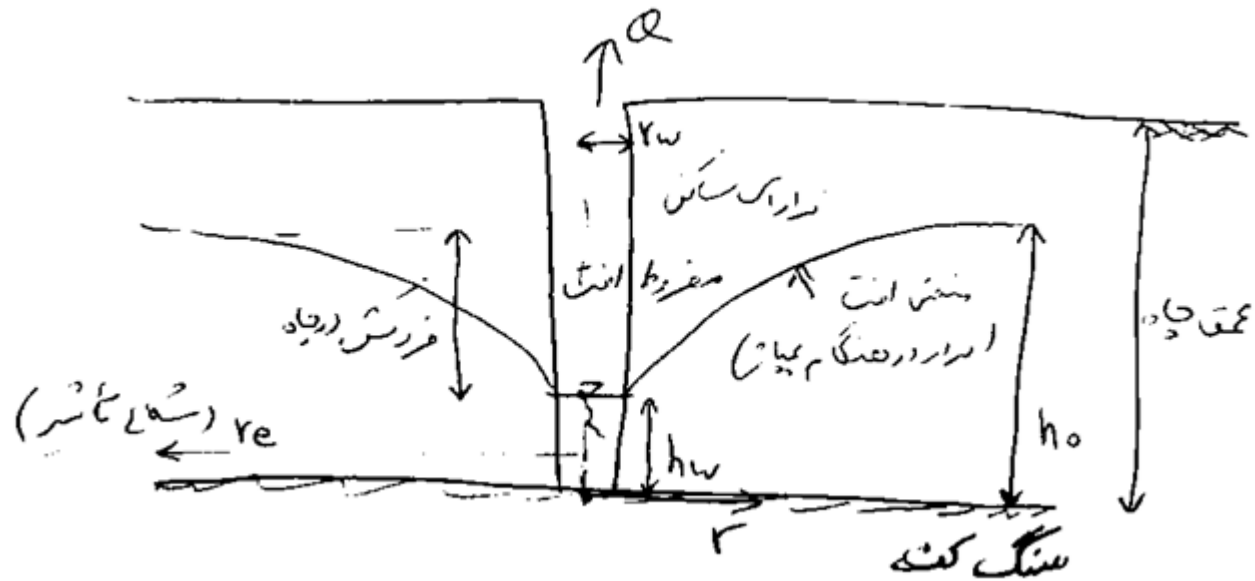
۲- عکس حالت اول بوده و هدف، تعیین مقادیر ضرایب معادلات حاکم (T و S) با اندازه گیری بار هیدرولیکی به صورت تابعی از زمان در یک آبخوان می باشد.

طرز کار چاه

قبل از پمپاژ آب از چاه، تراز سطح آب آبخوان در حالت سکون با تراز سطح آب چاه برابر است. با پمپاژ آب، به دلیل ایجاد گرادیان هیدرولیکی، جریان شعاعی در اطراف چاه ایجاد شده و به طور پیوسته ادامه می یابد. هر چه جریان آب به چاه نزدیک تر می شود، بر سرعت آن افزوده می شود زیرا مقطعی که باید از آن آب بگذرد با نزدیک شده به چاه تدریجاً کاهش می یابد.

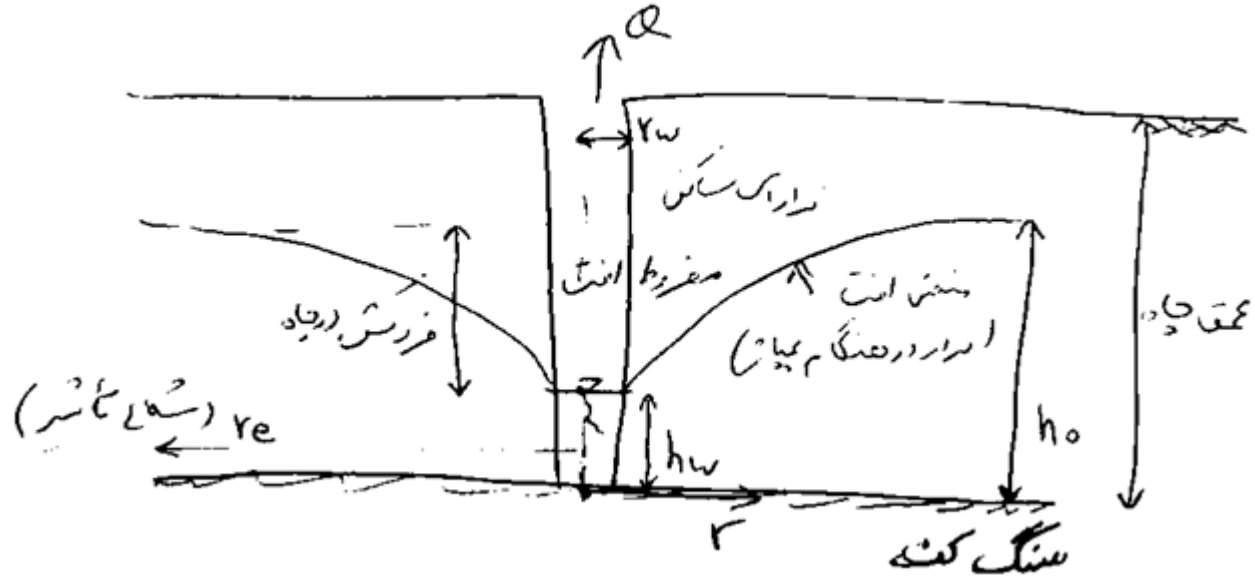
تعاریف:

- تراز آب ساکن (Static water level): تراز سطح آب در چاه قبل از شروع پمپاژ می باشد. فشار در این تراز صفر است و برابر با فشار هوا می باشد.
- تراز آب پمپاژ (Pumping water level): تراز سطح آب در چاه در هنگام پمپاژ آب از چاه می باشد. این تراز متغییر بوده و با تغییر نرخ آب پمپاژ از چاه نوسان می کند.



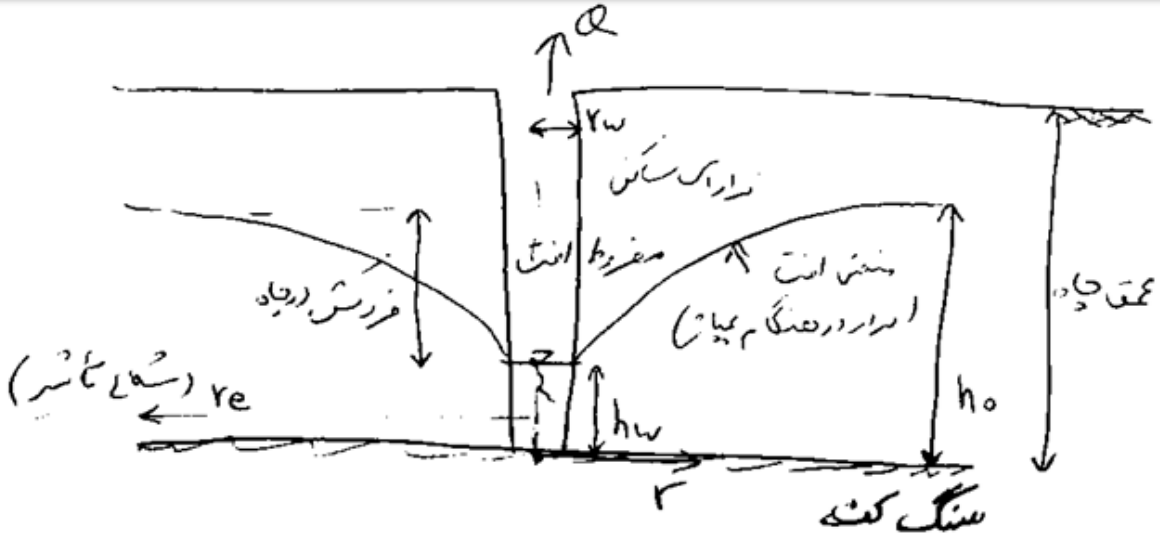
هیدرولیک چاه ها در آبخوان های آزاد و محصور

- افت سطح آب (Drawdown): پایین رفتن سطح آب زیرزمینی یا سطح پیزومتری را که در اثر پمپاژ و خارج کردن آب از چاه صورت می گیرد، فروکش یا افت بار گویند. فاصله بین تراز آب ساکن و تراز آب هیدرولیکی در حین پمپاژ، میزان فروکش یا افت بار در آن نقطه را نشان می دهد. فروکش در میزان آبدهی چاه تأثیر می گذارد و با s نشان می دهند.



- مخروط افت (Cone of depression): در هنگام پمپاژ آب از چاه، یک منطقه قیف مانند (مخروط معکوس فرضی) شکل می گیرد که مخروط افت نام دارد. قاعده این مخروط بر تراز سطح آب ساکن (آبخوان باز) و یا سطح پیزومتری اولیه (آبخوان بسته) و رأس آن بر تراز سطح آب داخل چاه قرار دارد. سطح جانبی مخروط افت، افت سطح آب زیرزمینی یا افت سطح پیزومتری است.

هیدرولیک چاه ها در آبخوان های آزاد و محصور



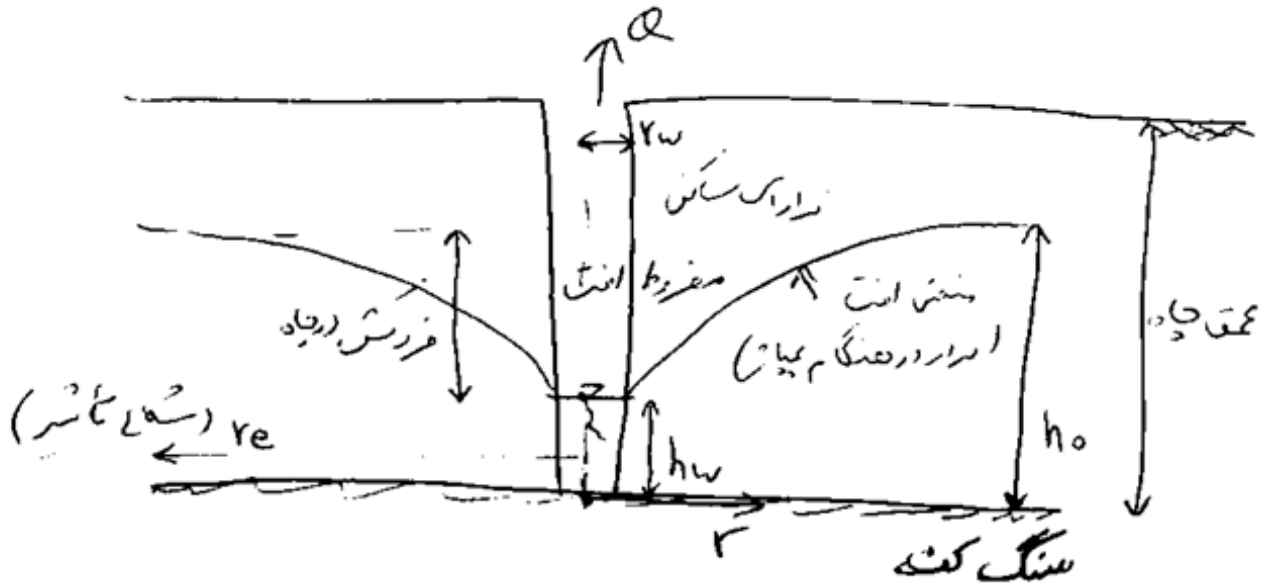
مخروط افت در چاه های آبخوان باز، مخروط افت سطح آب زیرزمینی و در چاه های آبخوان تحت فشار، مخروط افت فشار خوانده می شود. در شکل ایده ال، شکل قاعده مخروط افت، دایره ای است و به علت تغییرات ضریب قابلیت انتقال، شیب هیدرولیکی، تراوش قائم و شرایط مرزی ممکن است این شکل دایره ای نباشد.

در آبخوان باز، مخروط افت، حجمی از آبخوان است که هنگام پمپاژ از آب ثقلی تخلیه می شود و در آبخوان بسته، مخروط افت معادل حجمی از آبخوان است که فشار منفذی در آن کاهش یافته است.

- منحنی فروکش یا نیم رخ مخروط افت (Drawdown curve or profile of cone of depression):

  فصل مشترک یک صفحه قائم عبوری بر محور چاه با سطح جانبی مخروط افت یک منحنی را تشکیل می دهد که منحنی فروکش یا نیم رخ مخروط افت نامیده می شود.

هیدرولیک چاه ها در آبخوان های آزاد و محصور



- حوزه تأثیر (Area of influence): به منطقه ای اطراف چاه که تحت تأثیر برداشت آب از چاه قرار دارد، حوزه تأثیر چاه گفته می شود. مرز حوزه تأثیر، دایره تأثیر (Circle of influence) و شعاع دایره تأثیر، شعاع تأثیر (Radius of influence) گویند. با پمپاژ بیشتر از چاه، آب بیشتری از ذخیره آبخوان خارج و در نتیجه شعاع تأثیر نیز توسعه می یابد. توسعه شعاع تأثیر تا حدی است که نرخ پمپاژ آب از چاه با نرخ آب ورودی به چاه از آبخوان برابر شود. در این لحظه مخروط افت تثبیت شده و شرایط حالت پایدار برقرار می گردد. این شرایط پایداری با کاهش یا افزایش نرخ پمپاژ تغییر می کند. بر این اساس شعاع تأثیر (r_e) همان حریم نظری چاه می باشد. حریم قانونی معمولاً مقداری بیشتر است.

هیدرولیک چاه ها در آبخوان های آزاد و محصور

- دبی یا آبدهی چاه (Well yield): حجم آبی است که در واحد زمان از چاه پمپاژ می شود. دبی یا آبدهی چاه را نرخ پمپاژ (Pumping rate) نیز می نامند.

جهت حل معادلات حاکم بر چاه ها، لازم است فرضیات زیر مورد توجه قرار گیرد:

۱) آبخوان یک محیط متخلخل است که جریان در آن تابع قانون دارسی می باشد.

۲) کف آبخوان افقی است و ضخامت آن یکنواخت است.

۳) آبخوان همگن، همسان و گستره فضائی آن از اطراف نامحدود است.

۴) چاه به طور کامل در آبخوان نفوذ کرده و آب به صورت افقی از تمام ضخامت آبخوان به چاه وارد می شود.

۵) در پاسخ به کاهش بار هیدرولیکی در آبخوان، آب از آبخوان فوراً رها می شود.

۶) قطر حلقه چاه به اندازه ای کوچک است که حجم آب برداشت شده از داخل چاه به هنگام پمپاژ ناچیز و قابل صرفنظر کردن است.

۷) قبل از شروع پمپاژ آب از چاه، تراز اولیه سطح آب یا سطح پیزومتریک، افقی است.

۸) آب از چاه با نرخ ثابت پمپاژ می شود.

معادلات عمومی جریان

معادله عمومی حاکم بر جریان آب زیرزمینی برای شرایط جریان ناپایدار سه بعدی در محیط متخلخل ناهمسان به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial h}{\partial z}\right)=S_s\frac{\partial h}{\partial t}+W$$

در این رابطه S_s ذخیره ویژه، W جریان خروجی یا ورودی به آبخوان، K_x، K_y و K_z هدایت هیدرولیکی در جهت های x، y و z می باشند. h نیز تراز سطح آب زیرزمینی است.

با توجه به اینکه جریانی که در آبخوان ها به طرف چاه برقرار می شود به صورت شعاعی است لذا معادلات حاکم در دستگاه مختصات قطبی ارائه می شود:

- ✓ آبخوان های محصور (بسته): برای آبخوان محصور همگن و همسان در شرایط جریان افقی و ناپایدار ، معادله حاکم به صورت زیر است:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial h}{\partial r}=\frac{S}{T}\frac{\partial h}{\partial t} \qquad \frac{\partial^2 s}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial s}{\partial r}=\frac{S}{T}\frac{\partial s}{\partial t}$$

در این رابطه s، افت سطح آب زیرزمینی و S، ضریب ذخیره آبخوان است. برای شرایط پایدار:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial h}{\partial r}=0 \qquad \frac{\partial^2 s}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial s}{\partial r}=0$$

هیدرولیک چاه ها در آبخوان های آزاد و محصور

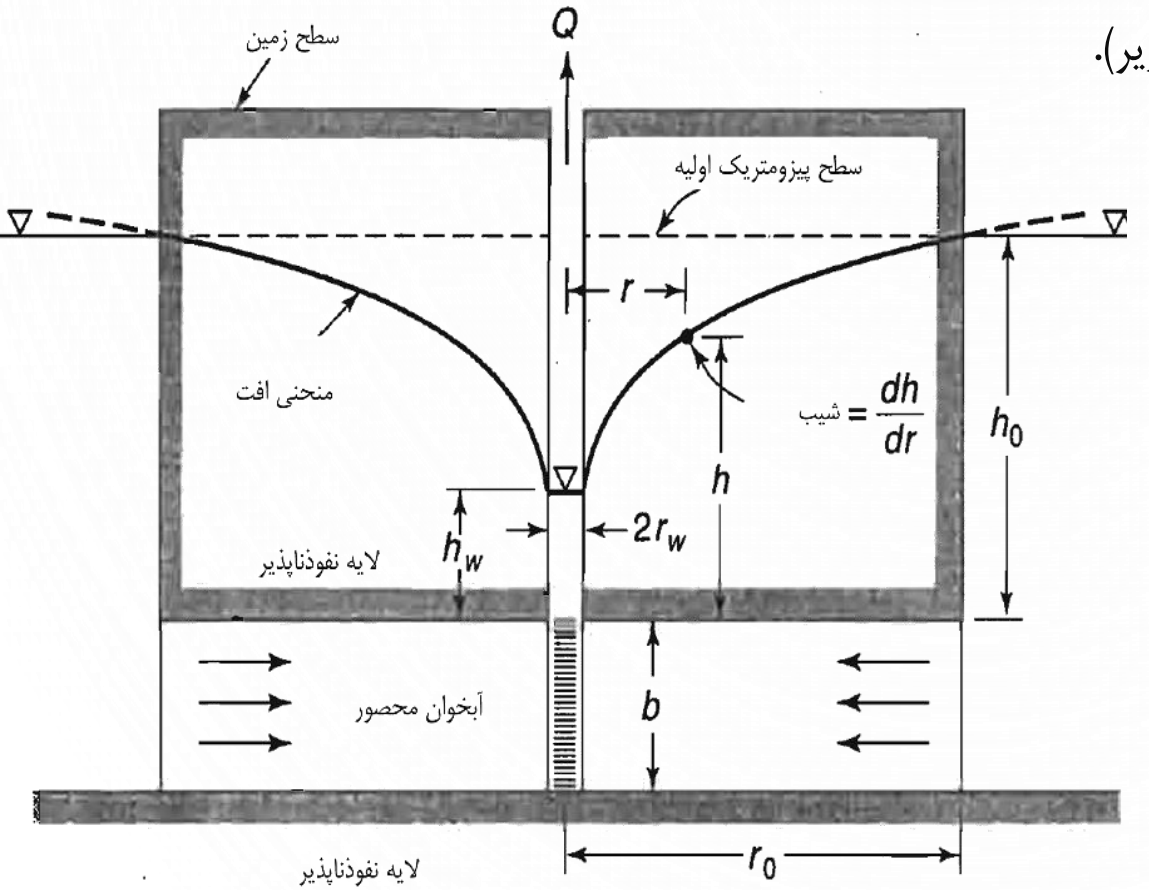
✓ آبخوان های غیرمحصور (باز)

$$\frac{\partial^2 h^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial h^2}{\partial r} = \frac{S_y}{\bar{b}K}\frac{\partial h^2}{\partial t}$$

بر اساس معادلات حاکم ارائه شده و حل آن ها برای شرایط اولیه و مرزی مشخص، معادله افت سطح آب زیرزمینی بر حسب فاصله شعاعی از محور چاه و زمان (در حالت ناپایدار) از شروع پمپاژ استخراج می شود. منحنی افت (فروکش) دارای طبیعتی لگاریتمی است که به طور شعاعی از چاه به سمت خارج امتداد دارد. شکل و دامنه این منحنی تابعی از ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان، نرخ پمپاژ و زمان می باشد.

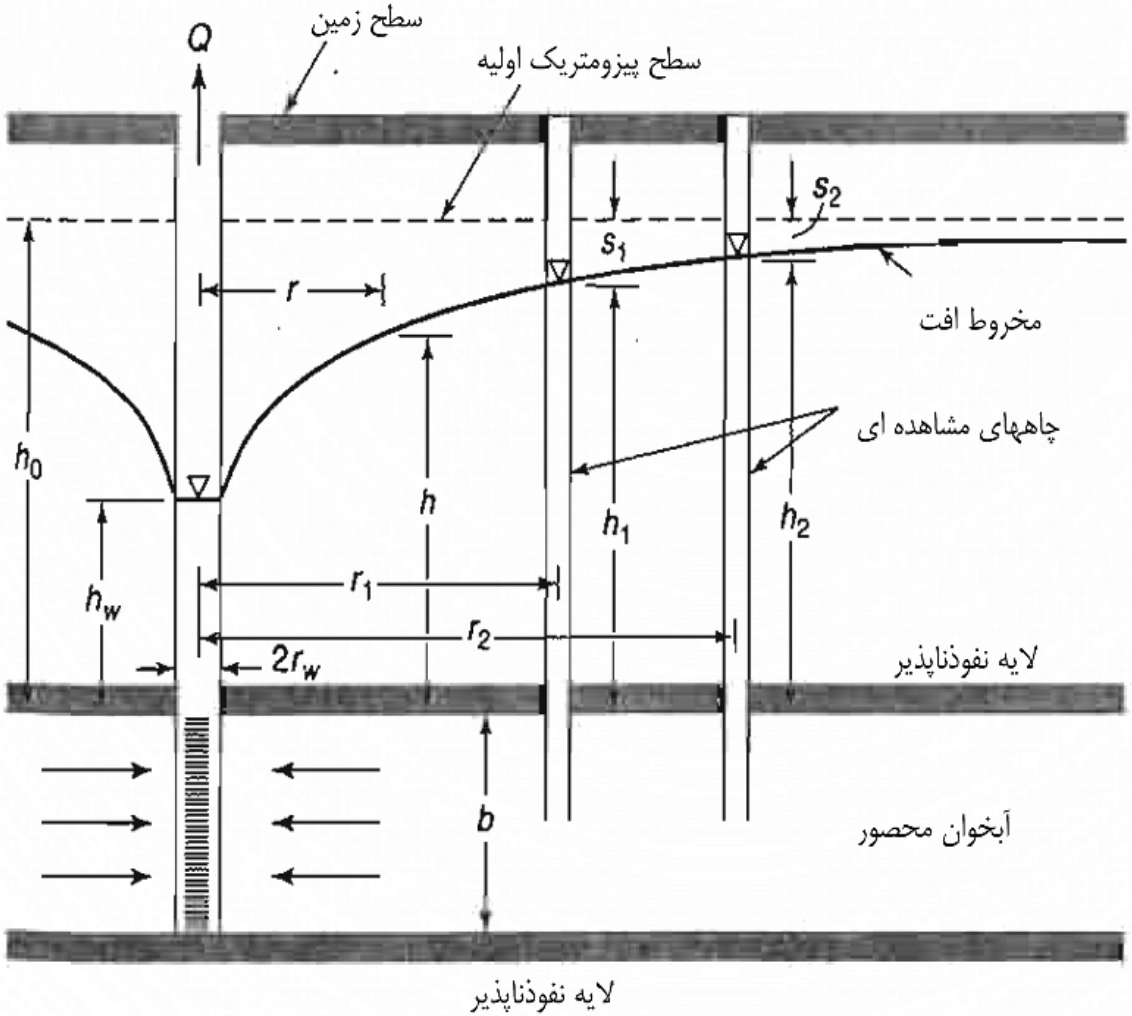
جریان شعاعی پایدار در یک چاه (Steady Radial Flow)

زمانی که از چاه پمپاژ صورت می‌گیرد، آب از آبخوان اطراف چاه به حرکت در می‌آید و تراز سطح ایستابی یا سطح پیزومتریک، که به نوع آبخوان بستگی دارد، پایین می‌افتد. افت (Drawdown) در یک نقطه معلوم عبارتند از ارتفاعی که سطح آب پایین می‌افتد. منحنی افت (Drawdown Curve) (یا مخروط افت (Drawdown Cone)) تغییرات افت را در فواصل مختلف از چاه نشان می‌دهد (شکل زیر).



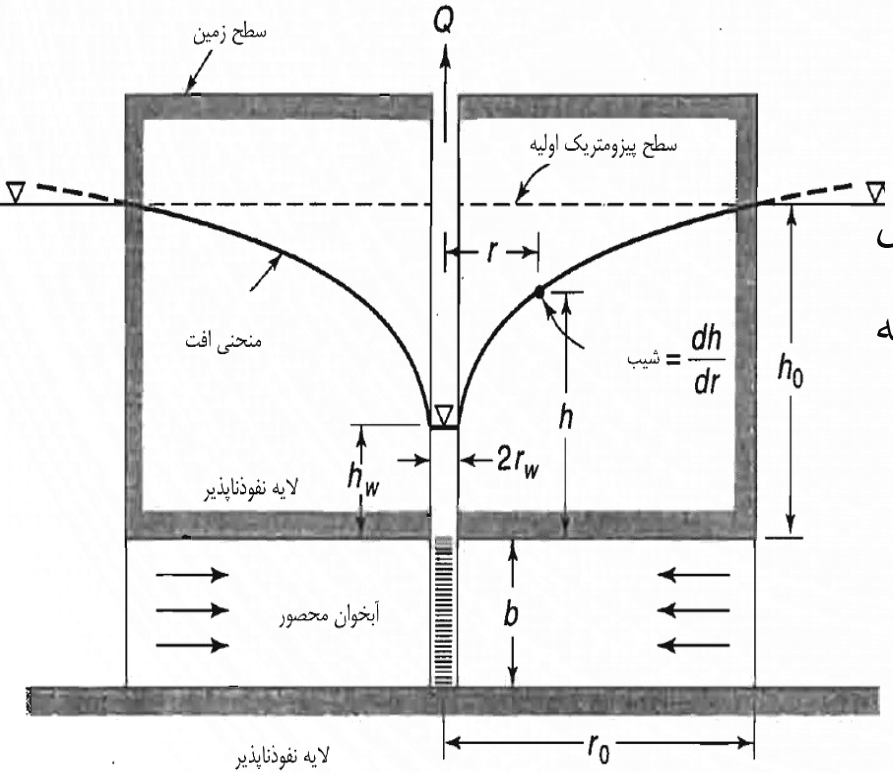
هیدرولیک چاه ها در آبخوان های آزاد و محصور

در فضای ۳ بعدی همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است منحنی افت، مخروطی شکل بوده که به مخروط افت معروف است. همچنین حد بیرونی مخروط افت (که افت صفر می‌باشد) به عنوان سطح تأثیر (Area of Influence) چاه تعریف می‌شود.



جریان شعاعی چاه حفر شده در آبخوان محصور

جهت استخراج معادله جریان شعاعی (که نشان‌دهنده رابطه تخلیه از چاه با افت می‌باشد) برای چاهی که بطور کامل در یک آبخوان محصور نفوذ کرده است، شکل زیر در نظر گرفته می‌شود. در این حالت فرض شده که جریان به سمت چاهی که در مرکز یک جزیره دایره‌ای شکل قرار گرفته و در یک آبخوان همگن و همسان نفوذ کرده، دوبعدی می‌باشد. چون جریان در همه جهات بصورت افقی است، استفاده از فرضیات دوپوئی منجر به ایجاد خطا نخواهد شد. با استفاده از سیستم مختصات قطبی و با در نظر گرفتن چاه در مرکز آن می‌توان برای جریان شعاعی پایدار به سمت چاه، میزان تخلیه چاه یا Q را در هر فاصله r دلخواه از چاه بدست آورد:



$$Q = AV = -2\pi rbK\frac{dh}{dr}$$

با مرتب‌سازی و انتگرال‌گیری از معادله فوق و اعمال شرایط مرزی در چاه که در $r = r_w$، $h = h_w$ و در لبه‌های انتهای منطقه $(r = r_0)$، $h = h_0$ می‌باشد، خواهیم داشت:

$$h_0 - h_w = \frac{Q}{2\pi Kb}ln(r_0/r_w)$$

$$Q = 2\pi Kb\frac{h_0 - h_w}{ln(r_0/r_w)}$$

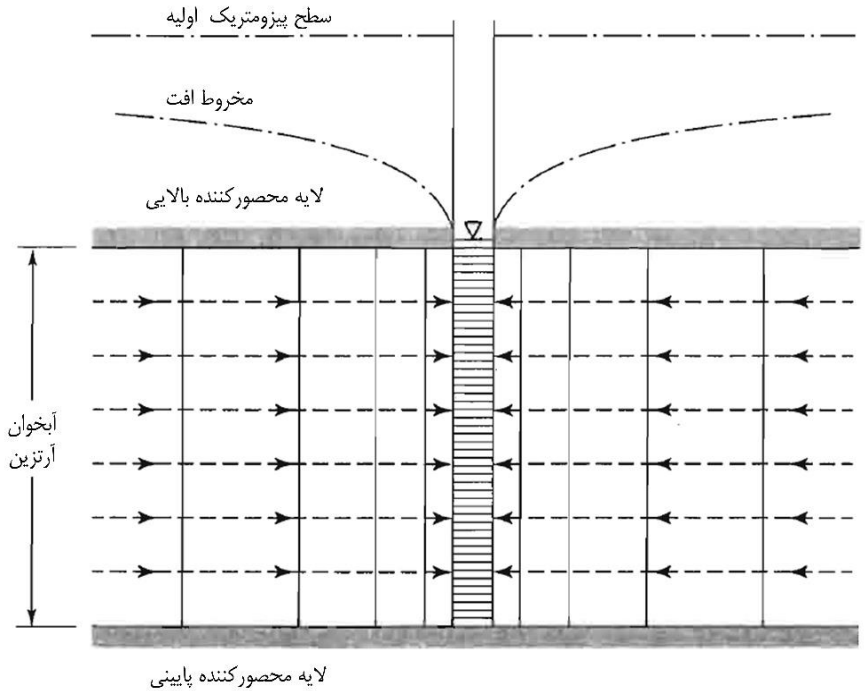
در اغلب مواردی که یک چاه در یک آبخوان محصور گسترده نفوذ کرده است، حد بیرونی برای r نمی‌توان متصور شد. رابطه فوق به ازای هر r به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$Q = 2\pi Kb \frac{h - h_w}{ln(r/r_w)}$$

معادله تعادل $(Thiem)$

این رابطه نشان می‌دهد که با افزایش r، h نیز بطور نامحدود افزایش می‌یابد. این روند افزایشی تا جایی ادامه می‌یابد که به حداکثر مقدار h، یعنی تراز یکنواخت اولیه (h_0) برسد. بنابراین از لحاظ تئوری، به دلیل اینکه مخروط افت بایستی بطور نامحدود با زمان گسترش یابد، جریان شعاعی پایدار در یک آبخوان وسیع وجود ندارد.

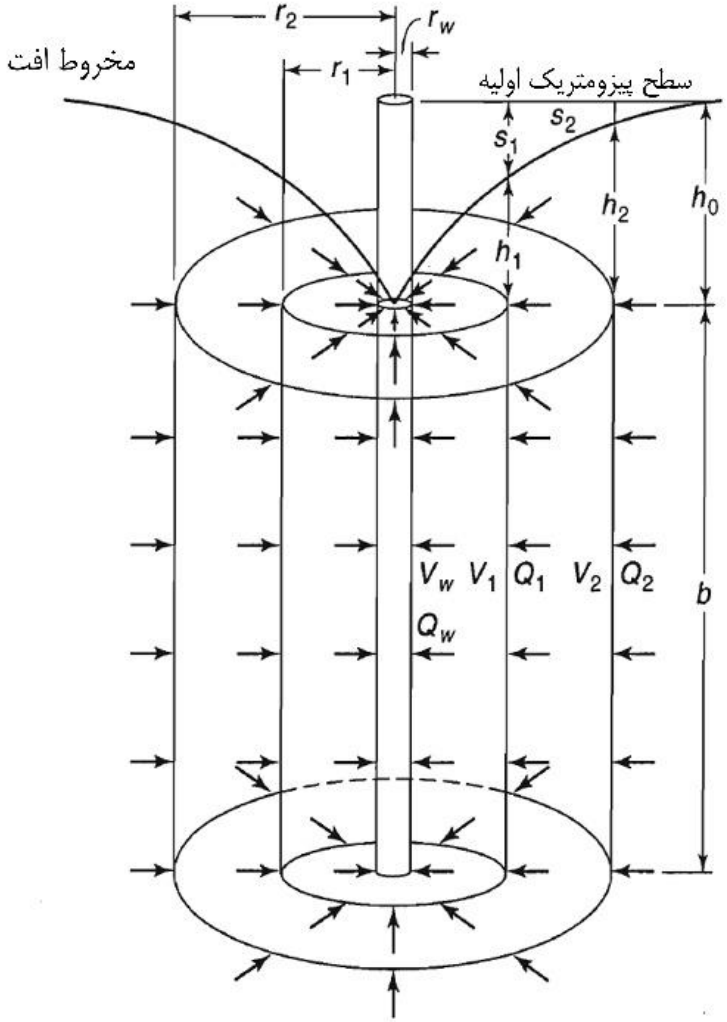
بررسی توزیع جریان برای چاه حفر شده در آبخوان محصور



توزیع جریان ناشی از پمپاژ آب در یک آبخوان تحت فشار، چاه به طور کامل در آبخوان نفوذ کرده و مجاری ورودی آب در لوله جدار چاه ۱۰۰ درصد باز می‌باشد.

هیدرولیک چاه ها در آبخوان های آزاد و محصور

توزیع جریان ناشی از پمپاژ آب در یک آبخوان تحت فشار، چاه به طور کامل در آبخوان نفوذ کرده و مجاری ورودی آب در لوله جدار چاه ۱۰۰ درصد باز می‌باشد.



b = ضخامت آبخوان

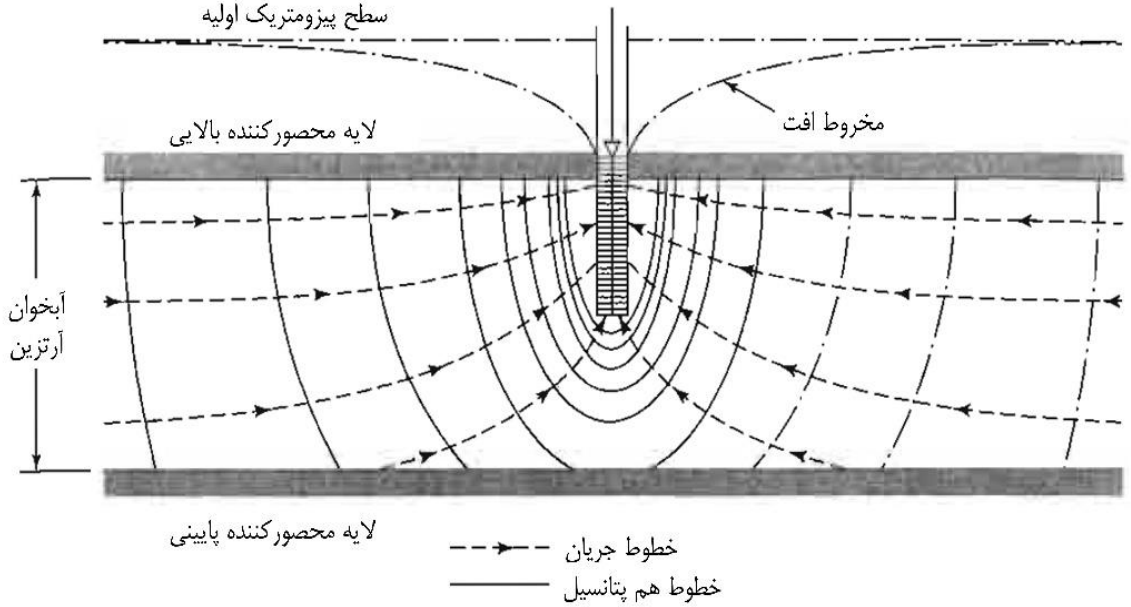
h_0 = تراز اولیه آبخوان

h_1, h_2 = تراز در فاصله r1 و r2 و در زمانی که چاه در حال پمپاژ است

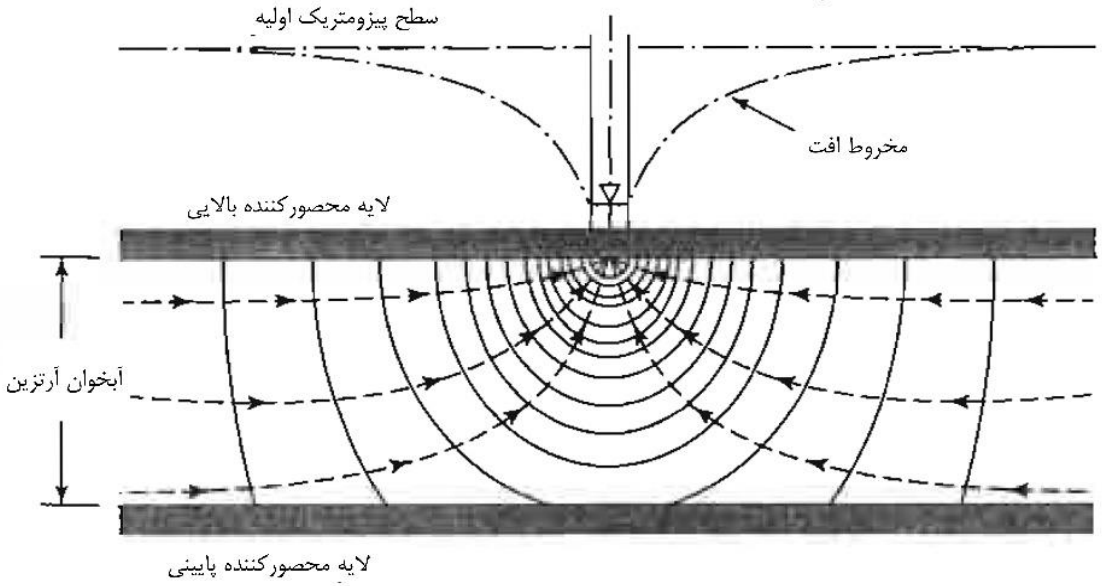
s_1, s_2 = میزان افت در فاصله r1 و r2 و در زمانی که چاه در حال پمپاژ است

$$Q_w = Q_1 = Q_2$$
$$A_w = 2\pi r_w b$$
$$A_1 = 2\pi r_1 b$$
$$A_2 = 2\pi r_2 b$$
$$V_w = Q_w / A_w$$
$$V_1 = Q_1 / A_1$$
$$V_2 = Q_2 / A_2$$

هیدرولیک چاه ها در آبخوان های آزاد و محصور



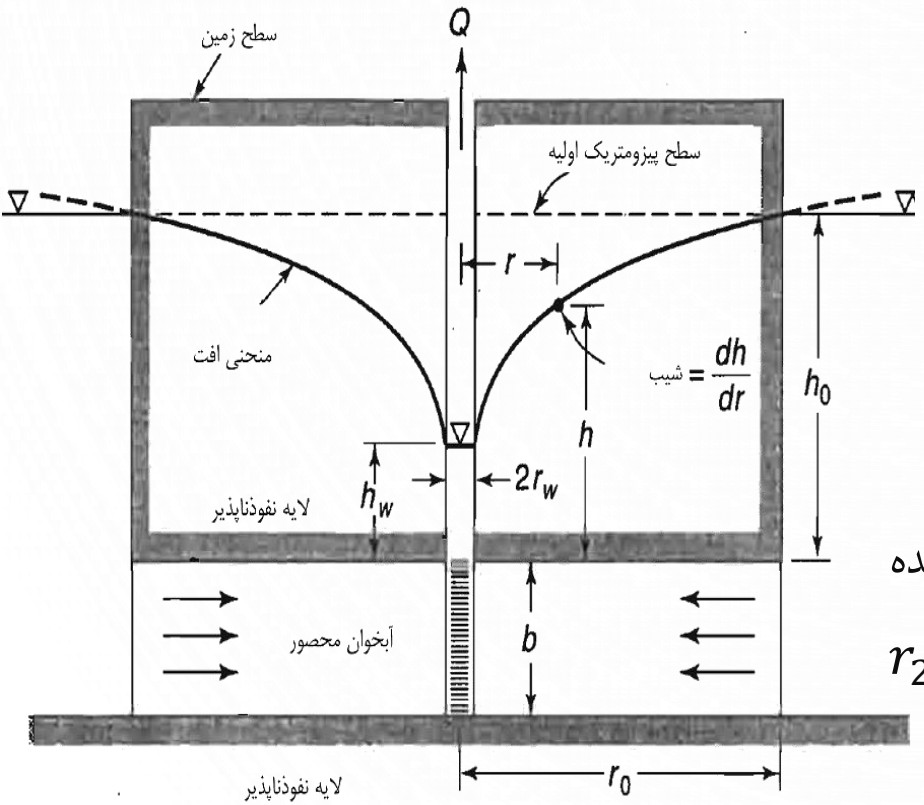
توزیع جریان ناشی از پمپاژ آب در یک آبخوان تحت فشار، چاه به میزان ۵۰ درصد در آبخوان نفوذ کرده و مجاری ورودی آب در لوله جدار چاه کاملاً باز می‌باشد.



توزیع جریان ناشی از پمپاژ آب در یک آبخوان تحت فشارکه چاه تا بالای لایه تحت فشار نفوذ کرده است. تخمین زده می‌شود جریان‌های عمودی با شدت زیاد در زیر چاه و اطراف آن در لایه تحت فشار تا فاصله‌ای به اندازه ضخامت آبخوان وجود داشته باشند.

هیدرولیک چاه ها در آبخوان های آزاد و محصور

بر مبنای معادله تعادل می توان هدایت هیدرولیکی و قابلیت انتقال آبخوان محصور را با استفاده از یک چاه پمپاژ که بطور کامل در آبخوان نفوذ کرده، محاسبه نمود. به دلیل اینکه در هر دو نقطه منحنی افت لگاریتمی تعریف می‌شود لذا این روش شامل اندازه‌گیری افت در دو چاه مشاهده‌ای که در فواصل مختلف از چاه پمپاژی با نرخ ثابت قرار گرفته، می‌باشد. از نظر تئوری، h_w در چاه پمپاژ را می‌توان به عنوان یک نقطه اندازه‌گیری در نظر گرفت. اما با توجه به اینکه علاوه بر افت تراز سطح آب زیرزمینی در چاه، افتی نیز در نتیجه جریان عبوری از شبکه مشبک و دیواره چاه ایجاد می‌شود که منجر به ایجاد خطا می‌نماید. لذا باید از انتخاب h_w خودداری شود. بر این اساس می‌توان ضریب انتقال را با استفاده از رابطه زیر تعریف نمود:



$$Q = 2\pi Kb \frac{h - h_w}{ln(r/r_w)}$$

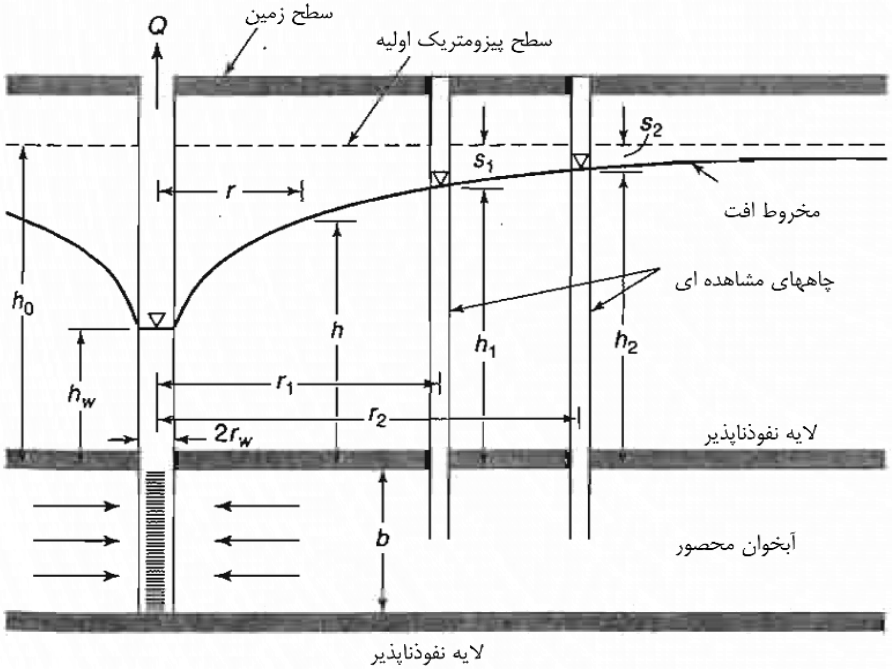
$$T = Kb = \frac{Q}{2\pi(h_2 - h_1)} ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

در این رابطه h_1 و h_2 تراز سطح آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده در چاه‌های مشاهده‌ای واقع در فواصل به ترتیب r_1 و r_2 می‌باشند.

هیدرولیک چاه ها در آبخوان های آزاد و محصور

از لحاظ عملی، افت s نسبت به بار آبی h اندازه‌گیری می‌شود. بر این اساس می‌توان رابطه ضریب انتقال را به صورت زیر ارائه نمود:

$$T = Kb = \frac{Q}{2\pi(h_2 - h_1)} ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) = \frac{Q}{2\pi(s_1 - s_2)} ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$



جهت استفاده از رابطه فوق، لازم است عملیات پمپاژ با نرخ ثابت و در زمان کافی تا رسیدن به حالت پایدار ادامه یابد. در این حالت تغییرات افت با زمان ناچیز خواهد بود. در حقیقت می‌توان گفت که اختلاف افت $(s_1 - s_2)$ در طی پمپاژ ثابت خواهد شد در حالی که مقادیر افت در طی پمپاژ در حال افزایش می‌باشند. بنابراین استفاده از معادله فوق زمانی که پمپاژ در طی چند روز ادامه می‌یابد، می‌تواند منجر به ارائه نتایج خوبی گردد.

چاه‌های مشاهده‌ای باید به اندازه کافی به چاه پمپاژ نزدیک باشند تا میزان افت در آنها محسوس و قابل اندازه‌گیری باشد. در استخراج روابط فوق فرض شده که آبخوان همگن و همسان، با ضخامت یکنواخت، دارای گسترش جانبی نامحدود و چاه به طور کامل در آبخوان نفوذ کرده و سطح پیزومتریک اولیه تقریباً افقی می‌باشد.

هیدرولیک چاه ها در آبخوان های آزاد و محصور

مثال) یک چاه بطور کامل در آبخوانی با ضخامت $25m$ نفوذ کرده است. پس از یک دوره طولانی پمپاژ با نرخ ثابت $0.05m^3/s$، افت در فواصل $50m$ و $150m$ از چاه به ترتیب برابر با $3m$ و $1.2m$ می‌باشد. هدایت هیدرولیکی و قابلیت انتقال آبخوان را تعیین نمائید. بر اساس ضرایب هیدرودینامیکی بدست آمده، جنس مواد تحکیم نیافته آبخوان را مورد ارزیابی قرار دهید.

با استفاده از معادله تعادل، می‌توان هدایت هیدرولیکی را با در نظر گرفتن پارامترهایی همچون:

$Q = 0.05m^3/s,\ r_2 = 150m, s_1 = h_0 - h_1, s_2 = h_0 - h_2$ و $r_1 = 50m$ محاسبه نمود. بنابراین:

$$s_1 - s_2 = h_2 - h_1 = 3 - 1.2 = 1.8$$

$$Q = 0.05m^3/s = 4320m^3/day$$

$$K = \frac{Q}{2\pi b(h_2 - h_1)} ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) = \frac{4320m^3/day}{2\pi(25m)(1.8m)} ln\left(\frac{150}{50}\right) = 16.8m/day$$

بنابراین ضریب انتقال آبخوان برابر است با $T = Kb = (16.8m/day)(25m) = 420m^2/day$. با توجه به $K = 1.94 \times 10^{-4}m/s$، این آبخوان احتمالاً یک آبخوان با ماسه تقریباً تمیز است.

هیدرولیک چاه ها در آبخوان های آزاد و محصور

مثال) یک چاه با قطر ۱ متر بطور قائم در آبخوان محصوری با ضخامت ۳۰ متر نفوذ کرده است. زمانی که چاه با نرخ $113m^3/hr$ پمپاژ می‌شود، افت در چاهی که در فاصله ۱۵ متری این چاه قرار دارد حدود ۱/۸ متر است. در چاهی دیگری که در فاصله ۵۰ متری قرار دارد، افت نیم متر اندازه‌گیری شده است. تراز سطح آب و میزان افت به صورت تقریبی در چاه پمپاژ شده برای شرایط پایدار چقدر است؟ همچنین قابلیت انتقال آبخوان و شعاع تأثیر چاه پمپاژی را محاسبه نمائید. لازم به ذکر است تراز سطح پیزومتریک اولیه ۴۰ متر بالای سطح مبنا قرار دارد.

ابتدا هدایت هیدرولیکی با استفاده از رابطه تعادل و بر اساس $Q = 113m^3/hr = 2712m^3/day$ تعیین می‌شود. بنابراین:

$$K = \frac{Q}{2\pi b(s_1 - s_2)} ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) = \frac{2712m^3/day}{2\pi(30m)(1.8m - 0.5m)} ln\left(\frac{50}{15}\right) = 13.3m/day$$

لذا ضریب انتقال برابر است با $T = Kb = (13.3m/day)(30m) = 400m^2/day$.

جهت محاسبه تقریبی تراز سطح آب زیرزمینی، h_w در چاه پمپاژ، بر اساس رابطه $Q = 2\pi Kb \frac{h-h_w}{ln(r/r_w)}$ و با استفاده از $h_2 = h_0 - s_2 = 40 - 0.5 = 39.5m$ عمل می‌شود:

$$h_w = h_2 - \frac{Q}{2\pi Kb} ln\left(\frac{r_2}{r_w}\right) h_w = 39.5m - \frac{2712\,m^3/d\,ay}{2\pi(13.3\,m/d\,ay)(30m)} ln\left(\frac{50m}{0.5m}\right) = 34.5m$$

لذا افت برابر است با:

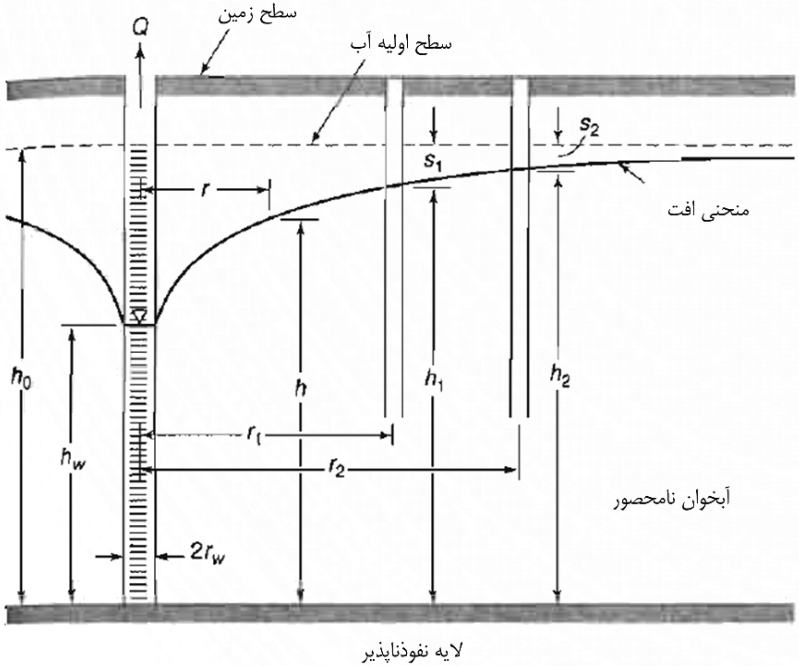
$$s_w = h_0 - h_w = 40m - 34.5m = 5.5m$$

شعاع تأثیر (R) چاه پمپاژ را می‌توان با مرتب نمودن رابطه $T = Kb = \frac{Q}{2\pi(h_1 - h_0)} ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)$ و حل آن بر اساس r_0 بدست آورد. لذا:

$$R = (r_1)\, exp\left[\frac{2\pi Kb(h_0 - h_1)}{Q}\right] = (15m)\, exp\left[\frac{2\pi(13.3m/day)(30m)(40m - 38.2m)}{2712m^3/day}\right] = 79m$$

جریان شعاعی چاه حفر شده در آبخوان آزاد

رابطه حاکم بر جریان شعاعی پایدار در یک چاه پمپاژ حفاری شده در آبخوان آزاد را می‌توان با استفاده از فرضیات دوپوئی بدست آورد. مطابق شکل زیر، چاهی بطور کامل در یک آبخوان با سنگ کف افقی و مرز با بار آبی ثابت در اطراف چاه، نفوذ کرده است. میزان تخلیه از چاه برابر است با:



$$Q = 2\pi r K h \frac{dh}{dr}$$

با توجه به اینکه در نقطه $r = r_w$، $h = h_w$ و در $r = r_0$، $h = h_0$ می‌باشد، مقدار Q برابر است با:

$$Q = \pi K \frac{h_0^2 - h_w^2}{ln(r_0/r_w)}$$

هیدرولیک چاه ها در آبخوان های آزاد و محصور

بر اساس بار آبی در دو چاه مشاهده‌ای (مطابق شکل زیر) معادله فوق بصورت زیر تبدیل می‌شود:

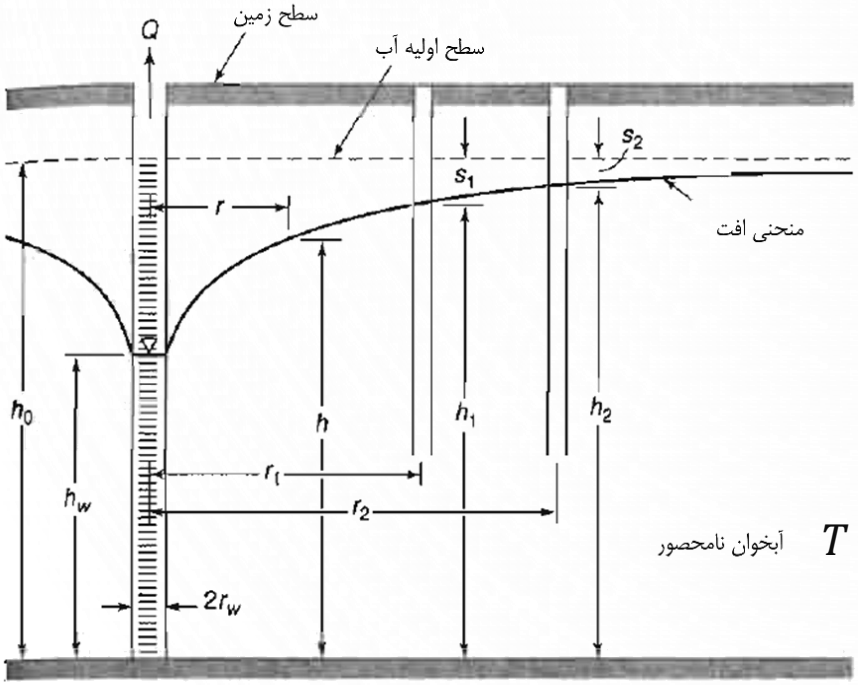
$$Q = \pi K \frac{h_0^2 - h_w^2}{ln(r_0/r_w)} = \pi K \frac{h_2^2 - h_1^2}{ln(r_2/r_1)}$$

با مرتب نمودن معادله فوق، هدایت هیدرولیکی برابر است با:

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

این رابطه جهت تخمین میزان افت در نزدیکی چاه دارای دقت کافی نمی‌باشد زیرا مؤلفه‌های عمودی جریان در نزدیکی چاه زیاد بوده که با فرضیات دو پویی متناقض است. هر چند تخمین‌های K در بارهای معلوم قابل قبول می‌باشند. در صورتی که در عمل، میزان افت تراز سطح آب زیرزمینی در مقایسه با ضخامت اشباع آبخوان آزاد ناچیز (کوچک) باشد، میزان ضریب انتقال آبخوان را بطور تقریبی می‌توان از معادله زیر بدست آورد:

$$T \cong K \frac{h_1 + h_2}{2}$$



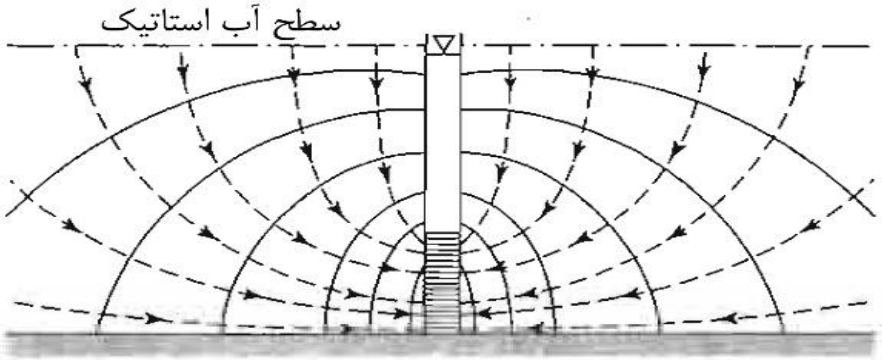
مطابق شکل مقابل، (چنانچه افت‌ها قابل ملاحظه باشند) h_1 و h_2 در معادله $K = \frac{Q}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} ln(r_2/r_1)$ را می‌توان توسط $(h_0 - s_1)$ و $(h_0 - s_2)$ جایگزین نمود. لذا ضریب قابلیت انتقال برای کل ضخامت آبخوان برابر است با:

$$T = Kh_0 = \frac{Q}{2\pi\left[\left(s_1 - \frac{s_1^2}{2h_0}\right) - \left(s_2 - \frac{s_2^2}{2h_0}\right)\right]} ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

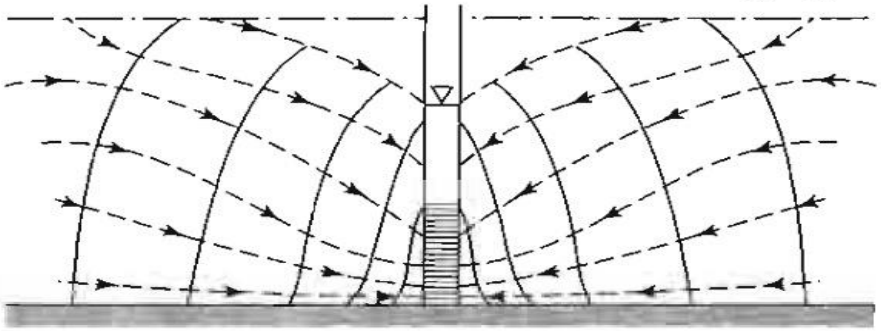
هیدرولیک چاه ها در آبخوان های آزاد و محصور

بررسی توزیع جریان برای چاه حفر شده در آبخوان آزاد

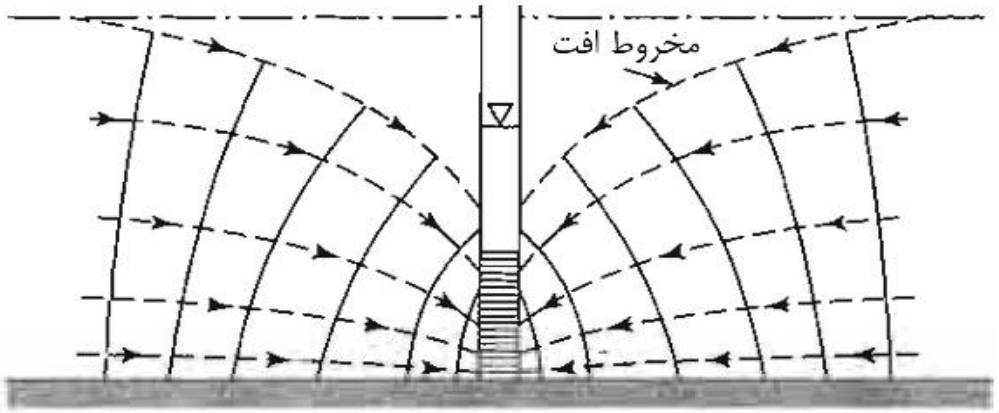
نحوه توسعه توزیع جریان در اطراف چاه پمپاژی کاملاً نفوذ کرده در یک آبخوان آزاد با ۳۳ درصد بازشدگی مجرا در لوله مشبک چاه



الف–مرحله اولیه بعد از شروع پمپاژ: حرکت ذرات آب از سطح آب زیرزمینی به سمت توری چاه مسیرهایی را دنبال می کند که مؤلفه قائم جریان در آن مسیرها بزرگ است.



ب –مرحله میانی بعد از شروع پمپاژ: بعد از شروع پمپاژ علی رغم نمایان شدن جریان شعاعی در اطراف چاه، هنوز مؤلفه عمودی جریان در نزدیکی چاه دارای اهمیت است.



ج –مرحله پایدار جریان بطور تقریب بعد از شروع پمپاژ:با برقراری جریان پایدار، تمام آبی که از چاه پمپاژ می شود تقریباً از خارج منطقه تأثیر چاه تأمین می شود و آرایش جریان شعاعی در اطراف چاه تثبت می گردد.

هیدرولیک چاه ها در آبخوان های آزاد و محصور

مثال) یک چاه در آبخوان آزاد نفوذ کرده است. قبل از پمپاژ، تراز سطح آب (بار آبی) $h_0 = 25m$ می‌باشد. پس از یک دوره طولانی پمپاژ با نرخ ثابت $0.05m^3/s$، افت در فواصل ۵۰ و ۱۵۰ متری از چاه پمپاژ به ترتیب برابر با ۳ و ۱/۲ متر می‌باشد. هدایت هیدرولیکی آبخوان و شعاع تأثیر چاه پمپاژ را محاسبه و بر اساس آن، نوع رسوبات تشکیل‌دهنده آبخوان را مشخص نمائید.

حل) با استفاده از معادله حاکم بر آبخوان های آزاد و با توجه به مقادیر داده شده $Q = 0.05m^3/s = 4320m^3/day$، $r_1 = 50m, r_2 = 150m$ و $h_1 = 25 - 3 = 22m$، $h_2 = 25 - 1.2 = 23.8m$ می‌توان K را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$K = \frac{Q}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} ln(r_2/r_1) = \frac{4320\, m^3/d\, ay}{\pi(23.8^2 - 22^2)} ln\left(\frac{150m}{50m}\right) = 18.3\, m/d\, ay$$

بر اساس مقدار هدایت هیدرولیکی بدست آمده، مواد رسوبی آبخوان احتمالاً از جنس ماسه دانه‌متوسط تمیز (Medium clean sand) می‌باشند. جهت محاسبه شعاع تأثیر چاه، معادله زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$R = (r_1)\, exp\left[\frac{K\pi(h_0^2 - h_1^2)}{Q}\right] = (50m)\, exp\left[\frac{(18.3\, m/d\, ay)\pi(25^2 - 22^2)}{4320\, m^3/d\, ay}\right] = 327m$$

مثال) چاهی با قطر نیم متر، تا ارتفاع ۳۳ متر زیر سطح استاتیک نفوذ کرده است. پس از یک دوره طولانی پمپاژ با نرخ $80m^3/hr$، افت در چاه‌هایی که در فواصل ۱۸ و ۴۵ متر از چاه پمپاژ قرار دارند به ترتیب برابر با ۱/۸ و ۱/۱ متر اندازه‌گیری شده است. الف) مقدار ضریب قابلیت انتقال چقدر است؟ ب) میزان افت تقریبی در چاه پمپاژ را محاسبه نمایید. ج) شعاع تأثیر چاه پمپاژ را بیابید.

الف) با استفاده از معادله حاکم بر جریان شعاعی پایدار در یک چاه واقع در آبخوان آزاد، می‌توان هدایت هیدرولیکی را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$Q = 80m^3/hr = 1920m^3/day, h_1 = 33 - 1.8 = 31.2m$$
$$h_2 = 33 - 1.1 = 31.9m, r_2 = 45m, r_1 = 18m$$

$$K = \frac{Q}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} ln(r_2/r_1) = \frac{1920m^3/day}{\pi(31.9^2 - 31.2^2)} ln\left(\frac{45}{18}\right) = 12.7m/day$$

لذا ضریب انتقال برابر است با:

$$T = Kb = (12.7\, m/d\, ay)(33m) = 418\, m^2/d\, ay$$

ب) جهت محاسبه افت در چاه لازم است ابتدا بر اساس معادله زیر، تراز سطح آب در چاه تعیین شود:

$$h_w = \sqrt{h_2^2 - \frac{Q}{\pi K} ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = \sqrt{31.2^2 - \frac{1920\, m^3/d\, ay}{\pi(12.68\, m/d\, ay)} ln\left(\frac{18m}{0.25m}\right)} = 27.7m$$

بنابراین میزان افت برابر است با: $s_w = 33m - 27.7m = 5.3m$.

ج) شعاع تأثیر چاه پمپاژی

$$R = (r_1)\, exp\left[\frac{K\pi(h_0^2 - h_1^2)}{Q}\right] = (45m)\, exp\left[\frac{(12.68\, m/d\, ay)\pi(33^2 - 31.9^2)}{1920\, m^3/d\, ay}\right] = 198m$$

جریان شعاعی ناپایدار در آبخوان محصور

زمانی که از یک چاه نفوذ کرده به یک آبخوان محصور وسیع، با نرخ ثابت پمپاژ شود، اثرات تخلیه به سمت بیرون با زمان توسعه می‌یابد. حاصلضرب نرخ کاهش بار آبی در ضریب ذخیره در سطح تأثیر برابر است با میزان تخلیه از آبخوان. با توجه به اینکه میزان آب استخراجی می‌بایست در نتیجه کاهش حجم ذخیره آب درون آبخوان تأمین شود لذا بار آبی بطور پیوسته به شرطی که آبخوان تا بی‌نهایت ادامه داشته باشد، کاهش خواهد یافت. معادله دیفرانسیل قابل استفاده در مختصات قطبی برابر است با:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial h}{\partial r}=\frac{S}{T}\frac{\partial h}{\partial t}$$

در این رابطه h بار آبی، r فاصله شعاعی از چاه پمپاژ، S ضریب ذخیره، T ضریب قابلیت انتقال و t زمان از شروع پمپاژ می‌باشد.

تایس (Theis) راه‌حلی را برای معادله فوق با بهره‌گیری از شباهت بین جریان آب زیرزمینی و انتقال حرارت ارائه نمود که در آن چاه به صورت یک چاهک خطی (که به صورت ریاضی این چاهک دارای میزان برداشت ثابت می‌باشد) و با شرایط مرزی زیر فرض شده است.

در $t=0$، $h=h_0$ و زمانی که $r\to\infty$ و $t\geq 0$، $h\to h_0$.

$$s=\frac{Q}{4\pi T}\int_u^{\infty}\frac{e^{-u}du}{u}=\frac{Q}{4\pi T}W(\mathrm{u})$$

راه‌حل تایس:

$$s=\frac{Q}{4\pi T}\left[-0.5772-ln\,u+u-\frac{u^2}{2.2!}+\frac{u^3}{3.3!}-\frac{u^4}{4.4!}+\ldots\right]$$

معادله تایس یا معادله غیرتعادلی تایس

در این رابطه، s برابر افت و Q ثابت تخلیه چاه و u بصورت زیر محاسبه می‌شود:

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

معادله غیرتعادلی تایس جهت تعیین S و T از طریق آزمایشات پمپاژ چاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این معادله بطور گسترده در مطالعات صحرایی کاربرد داشته و به دلایل زیر به معادله تعادلی ترجیح داده می‌شود: ۱) مقدار S را می‌توان تعیین نمود ۲) فقط یک چاه مشاهده‌ای مورد نیاز است ۳) در این حالت عموماً نیاز یک دوره کوتاه پمپاژ می‌باشد ۴) نیازمند پایدار بودن شرایط جریان نمی‌باشد.

در استفاده از معادله تایس لازم است فرضیاتی مورد توجه قرار گیرد که اغلب در کاربرد معادله غیرتعادلی چشم‌پوشی می‌شود و این امر می‌تواند منجر به ارائه نتایج نادرست گردد. این فرضیات عبارتند از:

۱- آبخوان همگن، همسان، دارای ضخامت یکنواخت و گسترش جانبی نامحدود باشد.

۲- قبل از پمپاژ، سطح پیزومتریک افقی باشد.

۳- نرخ پمپاژ آب از چاه ثابت باشد.

۴- چاه به طور کامل در ضخامت آبخوان نفوذ کرده و جریان آب به صورت افقی از تمام ضخامت آبخوان به چاه وارد شود.

۵- قطر حلقه چاه به اندازه‌ای کوچک است که حجم آب برداشت شده از داخل چاه به هنگام پمپاژ آب، ناچیز و بنابراین قابل صرفنظر کردن است.

۶- در پاسخ به کاهش بار هیدرولیکی در آبخوان، آب از آبخوان آناً رها می‌شود.

همه این فرضیات به ندرت اتفاق می‌افتد اما شناسایی آنها می‌تواند تقریب‌های بکارگرفته شده در معادله غیرتعادلی تحت شرایط صحرایی را نشان دهد.

متوسط S و T در نزدیکی چاه را می‌توان با اندازه‌گیری تغییرات افت با زمان در یک یا چند چاه مشاهده‌ای تحت نرخ ثابت پمپاژ بدست آورد. به دلیل مشکلات محاسباتی در هنگام استفاده از معادله تایس، محققان مختلفی راه‌حل‌های تقریبی آسان‌تری را ارائه کردند که می‌تواند به راحتی برای اهداف صحرایی به کار گرفته شود. سه روش تایس، کوپر–ژاکوب (Cooper and Jacob) و چاو (Chow) از جمله این روش ها می باشند.

حل با روش تایس

معادله تایس را می‌توان بصورت مقابل ساده نمود:

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

که $W(u)$ پارامتر تابع چاه و شکل ساده شده‌ای از انتگرال نمایی می‌باشد. با بازنویسی رابطه $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$ خواهیم داشت:

$$\frac{r^2}{t} = \left(\frac{4T}{S}\right) u$$

در این رابطه می‌توان ملاحظه نمود که رابطه بین $W(u)$ و u، مشابه رابطه بین s و r^2/t است چرا که عبارت‌های داخل پرانتز در هر دو رابطه ثابت می‌باشند. با این خلاصه‌سازی، تایس بر اساس روش برهم‌نهی، یک راه‌حل تقریبی برای محاسبه S و T پیشنهاد نمود.

در این روش مقادیر $W(u)$ در مقابل u روی یک کاغذ لگاریتمی، که به منحنی تیپ (Type Curve) معروف است، تهیه می‌شود.

جدول مقادیر $W(u)$ برای 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	0.00012	0.000038	0.000012
$\times 10^{-1}$	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

جهت استفاده از این روش، مقادیر افت در مقابل مقادیر r^2/t روی یک کاغذ لگاریتمی، در مقیاس مشابه منحنی تیپ، نیز ترسیم می‌گردد. سپس داده‌های مشاهده‌ای افت- زمان روی منحنی تیپ پیاده شده و با موازی نگه داشتن محورهای دو منحنی، تا زمانی که یک موقعیت مناسب از انطباق داده‌های مشاهده‌ای روی منحنی تیپ بدست آید، منحنی جابجا می‌شود. یک نقطه منطبق شده (نقطه انطباق (Match Point)) انتخاب و مختصات این نقطه ثبت می‌شود. با استفاده از مقادیر $W(u),u,s,r^2/t$، مقادیر S و T با استفاده از معادله $s=\left(\frac{Q}{4\pi T}\right)W(\mathrm{u})$ و $u=\left(\frac{4T}{S}\right)\frac{r^2}{t}$ بدست می‌آید.

در مناطقی که چندین چاه در نزدیکی چاه پمپاژ مورد آزمایش قرار دارد، با ثبت همزمان s در چاه‌ها می‌توان داده‌های افت- فاصله را مشابه روش داده‌های افت- زمان روی منحنی تیپ پیاده کرد.

مثال) چاهی که در یک آبخوان محصور نفوذ کرده با نرخ یکنواخت $2{,}500m^3/day$ پمپاژ می‌شود. میزان افت حین دوره پمپاژ در یک چاه مشاهده‌ای که در فاصله $60m$ چاه پمپاژ قرار دارد، اندازه‌گیری شده است. مقادیر مشاهده‌ای t و s در جدول مقابل ارائه شده است. با استفاده از روش تایس، مقادیر T و S را در این آبخوان محصور تعیین نمائید.

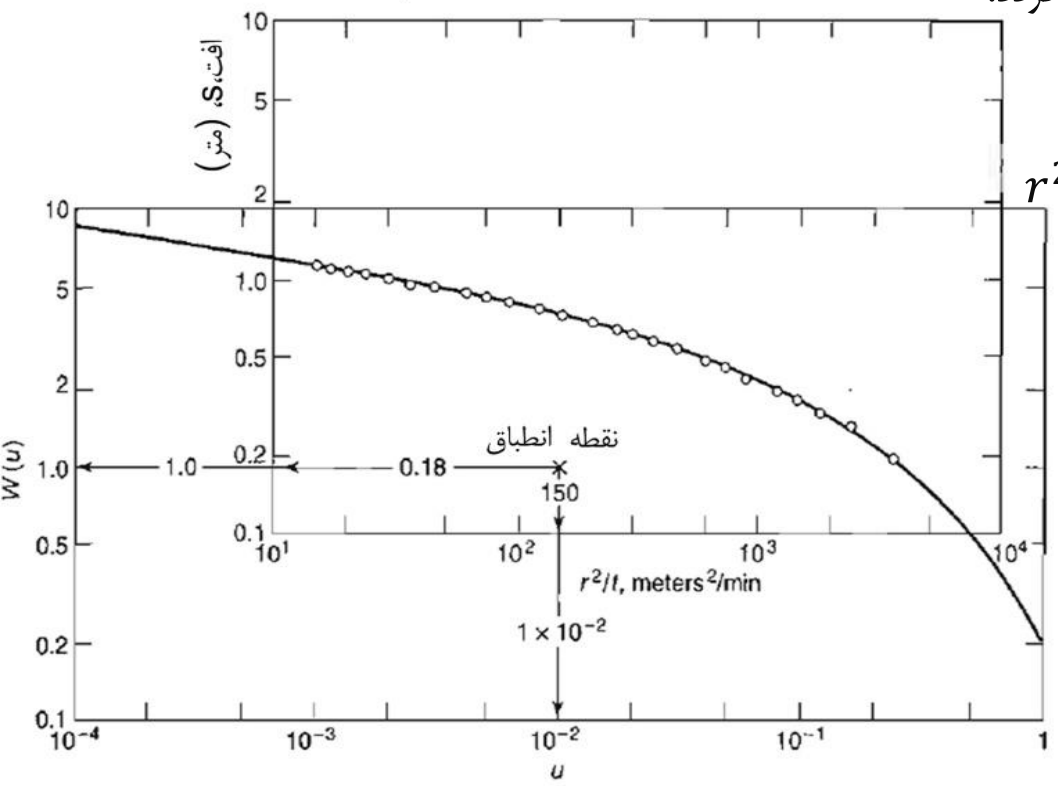
(r = 60 m)

t, min	s, m	r^2/t, m²/min	t, min	s, m	r^2/t, m²/min
0	0	∞	18	0.67	200
1	0.20	3,600	24	0.72	150
1.5	0.27	2,400	30	0.76	120
2	0.30	1,800	40	0.81	90
2.5	0.34	1,440	50	0.85	72
3	0.37	1,200	60	0.90	60
4	0.41	900	80	0.93	45
5	0.45	720	100	0.96	36
6	0.48	600	120	1.00	30
8	0.53	450	150	1.04	24
10	0.57	360	180	1.07	20
12	0.60	300	210	1.10	17
14	0.63	257	240	1.12	15

مرحله ۱: داده‌های افت- زمان در یک کاغذ لگاریتمی ترسیم می‌شود. میزان افت در روی محور عمودی و زمان از شروع پمپاژ روی محور افقی رسم می‌شود.

مرحله ۲: این منحنی بر منحنی تیپ، که با مقیاس مشابه منحنی زمان- افت می‌باشد، منطبق شده بطوریکه نقاط رسم شده با منحنی تیپ روی هم قرار بگیرد. محورهای هر دو منحنی بایستی موازی یکدیگر باشد.

مرحله ۳: یک نقطه منطبق شده، که می‌تواند هر نقطه‌ای روی صفحه منحنی داده‌ها باشد، انتخاب می‌گردد. معمولاً بهتر است نقطه‌ای روی منحنی تیپ انتخاب شود که مختصاتش مشخص باشد (به عنوان مثال $W(u)=1$ و $1/u=1$ یا $W(u)=1$ و $1/u=10$ و ....). سپس مقادیر s و t برای این نقطه تعیین می‌گردد.



بر این اساس $s=0.18m$ و

$$r^2/t = 150m^2/min = 216{,}000m^2/day$$

بدست می‌آید.

بنابراین با استفاده از معادله $s = \left(\frac{Q}{4\pi T}\right) W(u)$ خواهیم داشت:

$$T = \frac{Q}{4\pi s} W(u) = \frac{2500(1)}{4\pi(0.18)} = 1110\, m^2/day$$

و با استفاده از معادله $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$ داریم:

$$S = \frac{4Tu}{r^2/t} = \frac{4(1110)(1 \times 10^{-2})}{216{,}000} = 0.000206$$

حل با روش کوپر و ژاکوب (Cooper-Jacob Method)

بررسی‌های صورت گرفته توسط کوپر- ژاکوب نشان می‌دهد که برای مقادیر کوچک r و مقادیر بزرگ t، میزان u کوچک می‌باشد. بنابراین بجز دو جمله اول سری تابع چاه ارائه شده در رابطه ، مقدار بقیه جملات اندک بوده و می‌توان از آن ها صرفنظر نمود. لذا مقدار افت را می‌توان توسط مجانب زیر بیان نمود:

$$s = \frac{Q}{4\pi T}\left[-0.5772 - ln\, u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \ldots\right] = \frac{Q}{4\pi T}\left(-0.5772 - ln\frac{r^2 S}{4Tt}\right)$$

با بازنویسی و تغییر لگاریتم طبیعی به لگاریتم اعشاری، معادله فوق به صورت مقابل خلاصه می‌شود:

$$s = \frac{2.303Q}{4\pi T} log\frac{2.25Tt}{r^2 S}$$

بنابراین، منحنی‌ایی که از ترسیم افت s در مقابل لگاریتم زمان t بدست می‌آید به صورت یک خط راست می‌باشد. با امتداد این خط تا جایی که $s = 0$ شود، مقدار $t = t_0$ بدست می‌آید. بر این اساس خواهیم داشت:

$$0 = \frac{2.303Q}{4\pi T} log\frac{2.25Tt_0}{r^2 S}$$

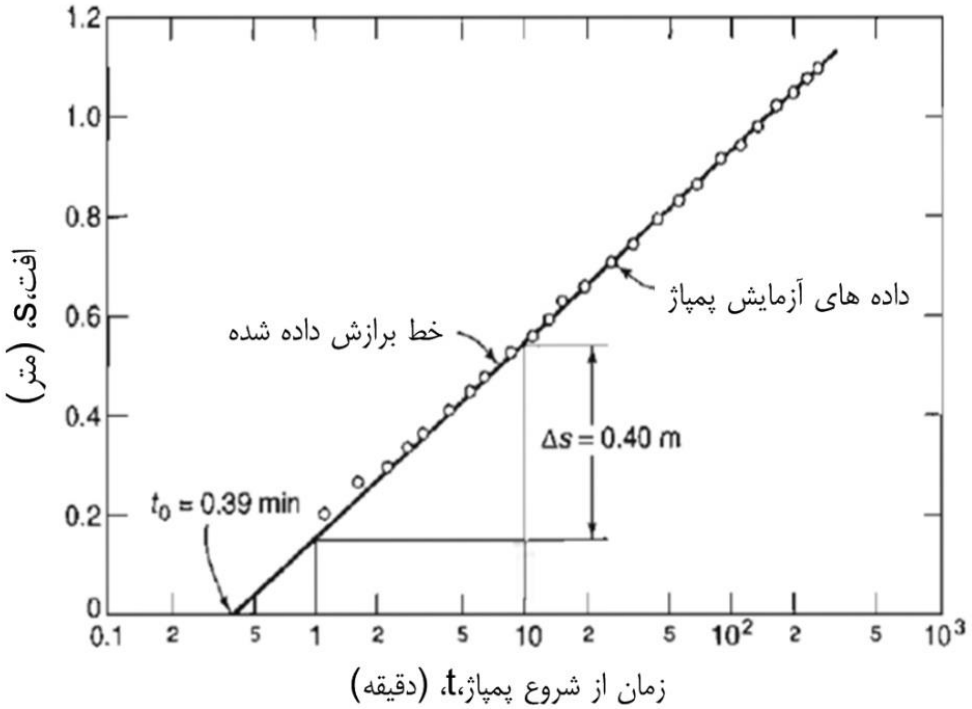
برای صفر شدن رابطه فوق لازم است $log(1) = 0$ گردد. لذا:

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

اگر $t/t_0 = 10$ باشد می‌توان یک مقدار برای T بدست آورد. بنابراین $log\ t\ /t_0 = 1$. از این رو با جایگزینی s با Δs جایی که Δs اختلاف افت برای یک سیکل لگاریتمی از t می‌باشد، معادله $s = \frac{2.303Q}{4\pi T} log \frac{2.25Tt}{r^2S}$ به صورت زیر قابل ارائه است:

$$T = \frac{2.303Q}{4\pi\Delta s}$$

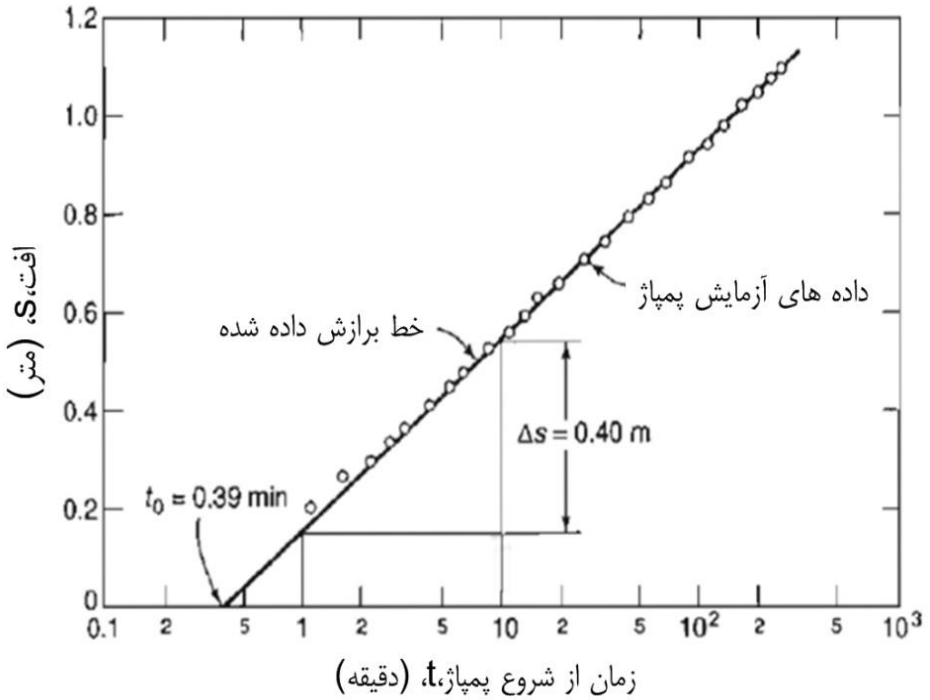
بنابراین این روش ابتدا برای حل T با استفاده از معادله $T = \frac{2.303Q}{4\pi\Delta s}$ و سپس برای حل S با استفاده از معادله $S = \frac{2.25Tt_0}{r^2}$ مورد استفاده قرار می‌گیرد. خط راست تقریبی بدست آمده با استفاده از این روش بایستی به مقادیر کوچک $u(u < 0.01)$ محدود شود تا از بروز خطاهای بزرگ جلوگیری شود.



مثال) چاهی که در یک آبخوان محصور نفوذ کرده با نرخ یکنواخت $2{,}500 m^3/day$ پمپاژ می‌شود. میزان افت حین دوره پمپاژ در یک چاه مشاهده‌ای که در فاصله $60m$ چاه پمپاژ قرار دارد، اندازه‌گیری شده است. مقادیر مشاهده‌ای t و s در جدول مقابل ارائه شده است. با استفاده از روش کوپر و ژاکوب، مقادیر T و S را در این آبخوان محصور تعیین نمائید.

$(r = 60\ \text{m})$

t, min	s, m	r^2/t, m^2/min	t, min	s, m	r^2/t, m^2/min
0	0	∞	18	0.67	200
1	0.20	3,600	24	0.72	150
1.5	0.27	2,400	30	0.76	120
2	0.30	1,800	40	0.81	90
2.5	0.34	1,440	50	0.85	72
3	0.37	1,200	60	0.90	60
4	0.41	900	80	0.93	45
5	0.45	720	100	0.96	36
6	0.48	600	120	1.00	30
8	0.53	450	150	1.04	24
10	0.57	360	180	1.07	20
12	0.60	300	210	1.10	17
14	0.63	257	240	1.12	15



با استفاده از داده‌های آزمایش پمپاژ ارائه شده در جدول فوق، s و t روی یک کاغذ نیمه لگاریتمی ترسیم گردید. یک خط راست از میان نقاط برازش داده می‌شود. با استفاده از این نمودار برازش داده شده، $\Delta s = 0.40m$ و $t_0 = 0.39\,min = 2.70 \times 10^{-4} day$ بدست می‌آید. بنابراین:

$$T = \frac{2.303(2500)}{4\pi(0.4)} = 1144\,m^2/day$$

$$S = \frac{2.25 T t_0}{r^2} = \frac{2.25(1144)(2.70 \times 10^{-4})}{(60)^2} = 0.000193$$

مثال) با استفاده از روش کوپر- ژاکوب، نرخ افت سطح پیزومتریک اطراف یک چاه پمپاژ را نسبت به زمان محاسبه نمائید. اگر چاه با نرخ ثابت $55gpm$ از آبخوان محصور ماسه‌ای با $T = 3{,}600ft^2/day$ و $S = 10^{-4}$ پمپاژ شود، زمان رسیدن به شرایط پایدار در فاصله $200ft$ از اطراف چاه چقدر است؟ فرض کنید زمانی به شرایط پایدار نزدیک می‌شود که نرخ افت به کمتر از $0.5in/hr$ برسد (بر اساس دقت اندازه‌گیری تراز سطح آب زیرزمینی با وسایل و ادوات موجود). اگر ضریب قابلیت انتقال آبخوان $1{,}200ft^2/day$ باشد جواب چند است؟

ابتدا بایستی زمان بحرانی جهت معتبر بودن روش کوپر- ژاکوب در فاصله $200ft$ محاسبه شود (یعنی $u < 0.01$ باشد):

$$t \geq \frac{r^2 S}{4Tu} = \frac{(200ft)^2(1 \times 10^{-4})}{4(3600\, ft^2/day)(0.01)} \rightarrow t \geq 40min$$

مقدار افت به طور تقریبی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$s = \frac{Q}{4\pi T}\left(-0.5772 - ln\frac{r^2 S}{4Tt}\right)$$

رابطه فوق را می‌توان به صورت زیر نیز ارائه نمود:

$$s = \frac{Q}{4\pi T}\left(-0.5772 - ln\frac{r^2 S}{4T} + ln\, t\right)$$

با مشتق‌گیری از رابطه افت نسبت به زمان خواهیم داشت: $\frac{ds}{dt} = \frac{Q}{4\pi T}\frac{1}{t}$

این رابطه به تقریب کوپر- ژاکوب اشاره می‌کند که در آن نرخ افت مستقل از فاصله شعاعی بوده و با زمان نسبت عکس دارد. تغییرات افت نسبت به زمان و همچنین زمان دستیابی به این میزان افت برابر است با:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{Q}{4\pi T}\frac{1}{t} \Rightarrow 0.5\, in/hr = \frac{10587\, ft^3/day}{4\pi(3600\, ft^2/day)}\frac{1}{t} = \frac{0.5}{12} ft/hr \Rightarrow t = 5.6hr$$

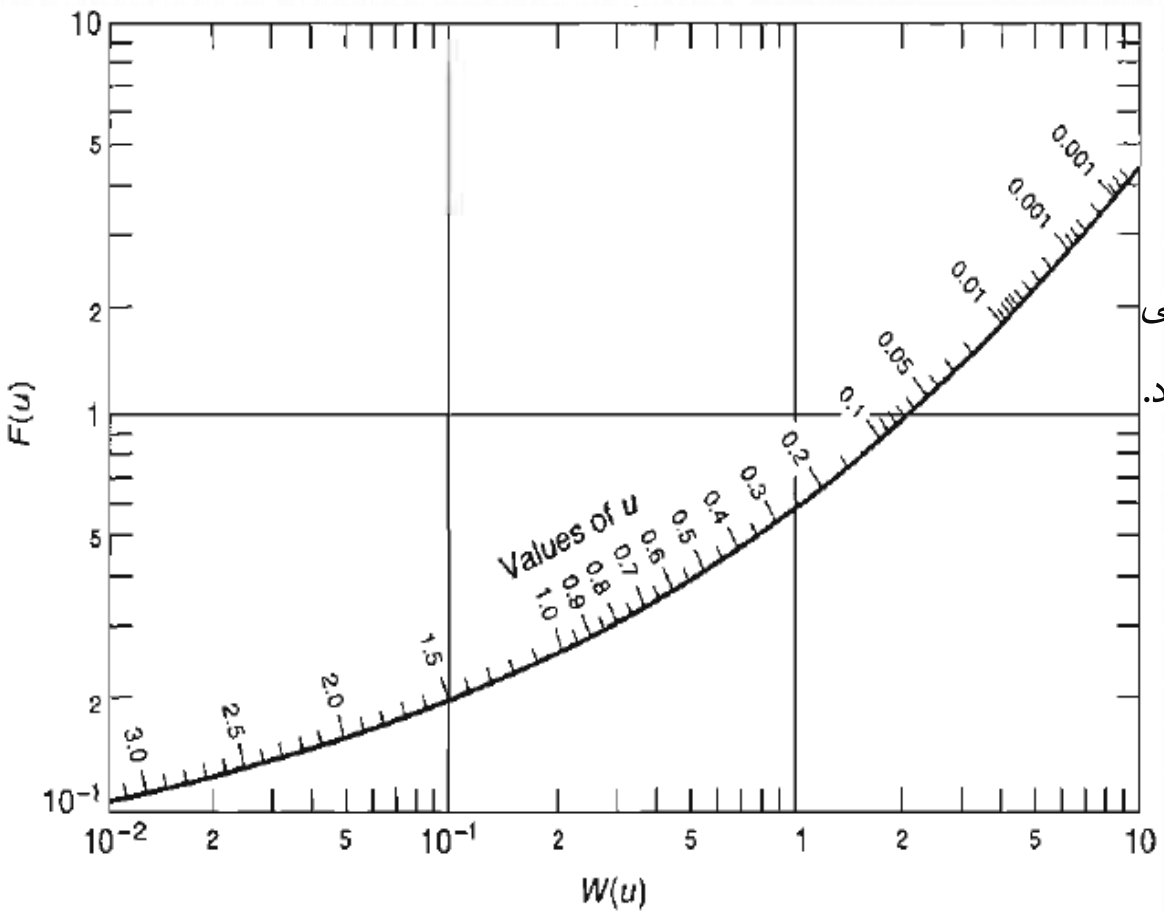
لازم به ذکر است کاربرد روش کوپر- ژاکوب در این مثال معتبر می‌باشد. بنابراین پس از گذشت $5.6hr$ از پمپاژ در فاصله $200ft$ از چاه، به شرایط تقریباً پایدار می‌توان رسید. اگر ضریب قابلیت انتقال $1{,}200ft^2/day$ باشد، روش کوپر- ژاکوب زمانی معتبر است که $t \geq 120min$ باشد و نرخ افت در فاصله $200ft$ از چاه پمپاژ پس از گذشت $16.8hr$ از پمپاژ ناچیز خواهد بود. لذا زمانی که ضریب قابلیت انتقال پایین است زمان رسیدن به شرایط پایدار، طولانی‌تر می‌باشد.

حل با روش چاو (Chow Method)

چاو روشی را برای حل، با توجه به مزایای عدم در نظر گرفتن انطابق منحنی داده‌ها، که باعث نامحدود شدن کاربردش می‌شود، توسعه داد. این روش نیازمند اندازه‌گیری افت در یک چاه مشاهده‌ای نزدیک به چاه پمپاژ می‌باشد. داده‌های مشاهده‌ای روی یک کاغذ نیمه لگاریتمی مشابه روش کوپر- ژاکوب، ترسیم می‌شوند. روی منحنی رسم شده، یک نقطه دلخواه انتخاب و مختصات این نقطه (t و s) یادداشت می‌شود. سپس از نقطه انتخابی خطی بر منحنی برازش مماس می‌شود و اختلاف افت Δs برای یک سیکل لگاریتمی از زمان، در واحد فوت، تعیین می‌شود. مقدار $F(u)$ با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

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

برای مقادیر $F(u)$ محاسبه شده، مقادیر متناظر با $W(u)$ و u با استفاده از نمودار تعیین می شود. در نهایت، با استفاده از معادله $T = \frac{Q}{4\pi s} W(u)$ ضریب قابلیت انتقال T و با استفاده از معادله $S = \frac{4Ttu}{r^2}$ ضریب ذخیره S محاسبه می‌شود.



رابطه بین $\boldsymbol{F(u)}$، $\boldsymbol{W(u)}$ و $\boldsymbol{u}$ در روش چاو

نکته: برای $\boldsymbol{F(u) > 2}$، مقدار $\boldsymbol{W(u)}$ را می توان از رابطه $\boldsymbol{W(u) = 2.3F(u)}$ محاسبه نمود.

مثال) چاهی که در یک آبخوان محصور نفوذ کرده با نرخ یکنواخت $2{,}500m^3/day$ پمپاژ می‌شود. میزان افت حین دوره پمپاژ در یک چاه مشاهده‌ای که در فاصله $60m$ چاه پمپاژ قرار دارد، اندازه‌گیری شده است. مقادیر مشاهده‌ای t و s در جدول مقابل ارائه شده است. با استفاده از روش چاو، مقادیر T و S را در این آبخوان محصور تعیین نمائید.

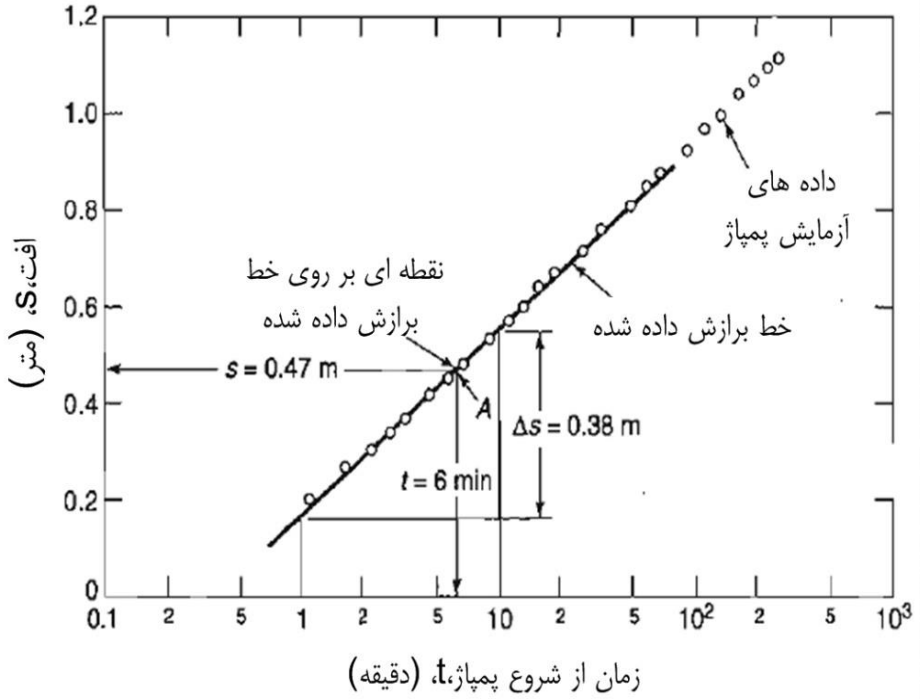
در شکل زیر داده‌های جدول افت–زمان رسم شده و نقطه A روی منحنی جائیکه $t = 6\,min = 4.2 \times 10^{-3} day$ و $s = 0.47m$ می‌باشد، انتخاب گردید. از نقطه انتخابی خطی بر منحنی داده مماس شده و اختلاف افت برای یک سیکل لگاریتمی از زمان برابر با $\Delta s = 0.38m$ تعیین گردید. در نتیجه $F(u) = 0.47/0.38 = 1.24$ و مطابق نمودار چاو، $W(u) = 2.75$ و $u = 0.038$ تعیین شد. لذا:

$$T = \frac{Q}{4\pi s} W(u) = \frac{2500}{4\pi(0.47)}(2.75) = 1160\ m^2/day$$

$$S = \frac{4Ttu}{r^2} = \frac{4(1160)(4.2 \times 10^{-3})(0.038)}{(60)^2} = 0.000206$$

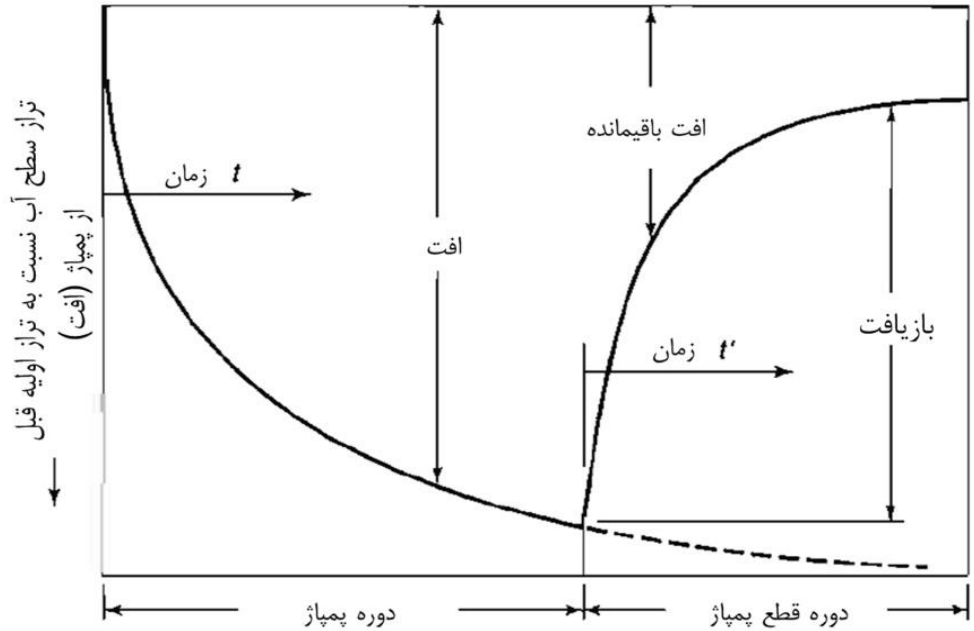
($r = 60$ m)

t, min	s, m	r^2/t, m^2/min	t, min	s, m	r^2/t, m^2/min
0	0	∞	18	0.67	200
1	0.20	3,600	24	0.72	150
1.5	0.27	2,400	30	0.76	120
2	0.30	1,800	40	0.81	90
2.5	0.34	1,440	50	0.85	72
3	0.37	1,200	60	0.90	60
4	0.41	900	80	0.93	45
5	0.45	720	100	0.96	36
6	0.48	600	120	1.00	30
8	0.53	450	150	1.04	24
10	0.57	360	180	1.07	20
12	0.60	300	210	1.10	17
14	0.63	257	240	1.12	15



آزمایش بازیافت (Recovery Test)

در پایان آزمایش پمپاژ پس از توقف پمپاژ، تراز سطح آب در چاه‌های پمپاژ و مشاهده‌ای شروع به بالا رفتن می‌کند. این فرآیند را بازیافت سطح آب زیرزمینی می‌گویند. در حالی که اندازه‌گیری افت سطح آب زیر سطح اولیه آب (قبل از پمپاژ) حین دوره بازیافت به افت باقی‌مانده (Residual Drawdowns) معروف است. نمودار شماتیک تغییر سطح آب زیرزمینی با زمان در دوره پس از پمپاژ در شکل زیر نشان داده شده است. اندازه‌گیری افت باقی‌مانده در این روش مناسب می‌باشد چراکه با ارزیابی این داده‌ها می‌توان قابلیت انتقال را محاسبه و بدین وسیله نتایج آزمایش پمپاژ را کنترل نمود. همچنین هزینه آزمایش بازیافت در مقایسه با آزمایش پمپاژ کمتر است. بعلاوه فرض می‌شود که نرخ تغذیه Q چاه حین دوره بازیافت ثابت و با نرخ پمپاژ برابر است. در حالیکه نرخ پمپاژ غالباً متغیر بوده و کنترل دقت نرخ پمپاژ در صحرا مشکل می‌باشد. لازم به ذکر است با اندازه‌گیری میزان بازیافت سطح آب در یک چاه پمپاژ می‌توان حتی بدون نیاز چاه مشاهده‌ای، قابلیت انتقال را تخمین زد.



اگر یک چاه برای یک دوره زمانی مشخص پمپاژ شود و سپس پمپاژ قطع شود، پس از آن افت در صورت ادامه پمپاژ عیناً مشابه وضعیتی است که پمپاژ صورت می‌گیرد و یک چاه تغذیه فرضی با جریان مشابه با جریان چاه در لحظه قطع پمپاژ، وجود دارد. بر پایه این اصول، تایس نشان داد که افت باقی‌مانده s' را می‌توان بصورت زیر ارائه نمود:

$$s' = \frac{Q}{4\pi T}[W(u) - W(u')]$$

برای r کوچک و t' بزرگ، تابع چاه را می‌توان از طریق یکی دو پارامتر معادله تابع چاه بدست آورد.

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

$$W(u) = -0.5772 - ln\,u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \ldots$$

بنابراین معادله فوق را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$s' = \frac{2.303Q}{4\pi T} log\left(\frac{t}{t'}\right)$$

بنابراین، با ترسیم افت باقی‌مانده s' در مقابل لگاریتم t/t' یک خط راست تشکیل می‌شود. شیب این خط برابر است با $2.303Q/4\pi T$. بنابراین برای $\Delta s'$ افت باقی‌مانده در سیکل لگاریتمی t/t'، قابلیت انتقال به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi \Delta s'}$$

نکته: مقادیر S را نمی‌توان با استفاده از روش آزمایش بازیافت تعیین نمود.

مثال) چاهی که با نرخ یکنواخت $2{,}500m^3/day$ در حال پمپاژ بوده، پس از $240min$ خاموش شده است. در این حالت مقادیر s' و t' که در چاه مشاهده‌ای اندازه‌گیری شده مطابق جدول زیر می‌باشد. قابلیت انتقال آبخوان را تعیین نمائید.

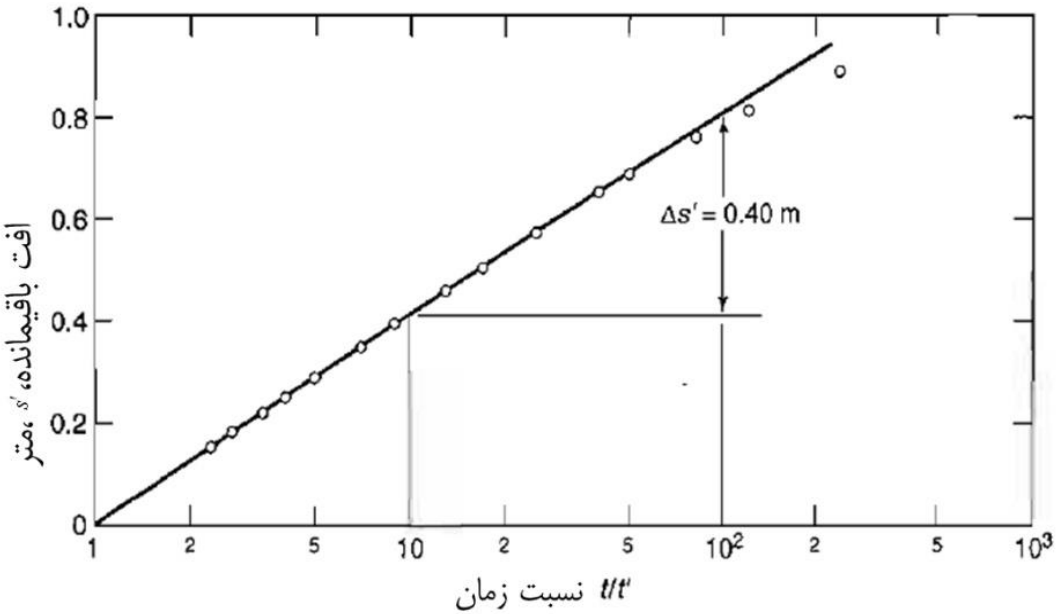
حل)

داده آزمون بازیافت (پمپ در زمان $t = 240min$ خاموش شده است)

t', min	t, min	t/t'	s', m
1	241	241	0.89
2	242	121	0.81
3	243	81	0.76
5	245	49	0.68
7	247	35	0.64
10	250	25	0.56
15	255	17	0.49
20	260	13	0.55
30	270	9	0.38
40	280	7	0.34
60	300	5	0.28
80	320	4	0.24
100	340	3.4	0.21
140	380	2.7	0.17
180	420	2.3	0.14

مقادیر t/t' محاسبه شده، که در شکل زیر نشان داده شده است، در مقابل s' روی یک کاغذ نیمه لگاریتمی ترسیم می‌شود. یک خط راست بر نقاط اندازه‌گیری شده برازش داده شده و بر اساس آن $\Delta s' = 0.40m$ تعیین گردید. بنابراین:

$$T = \frac{2.303Q}{4\pi\Delta s'} = \frac{2.303(2500)}{4\pi(0.40)} = 1140\,m^2/day$$

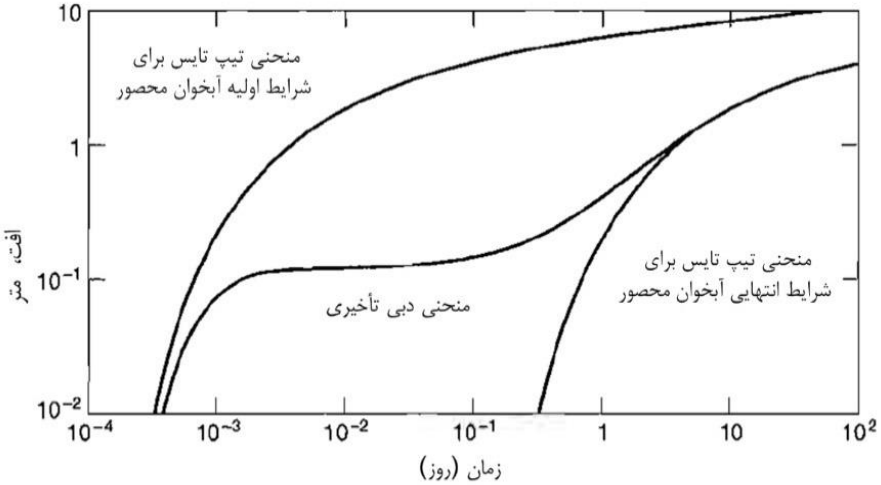


جریان شعاعی ناپایدار در آبخوان آزاد

راه‌حل‌های قبلی ارائه شده برای معادله غیرتعادلی اعمال شده در آزمایشات پمپاژ در آبخوان‌های محصور را می‌توان همچنین برای آبخوان‌های آزاد، که فرضیات اساسی آن را ارضاء می‌نماید، استفاده نمود. در حالت کلی اگر افت در مقایسه با ضخامت اشباع آبخوان کوچک باشد، با تقریب قابل قبولی می‌توان از راه‌حل ارائه شده برای معادلات غیرتعادلی استفاده نمود.

زمانی که افت قابل ملاحظه باشد، فرض اینکه آب از ذخیره آبخوان به صورت آنی در نتیجه کاهش بار آبی آزاد می‌شود، در آبخوان‌های آزاد صحیح نمی‌باشد.

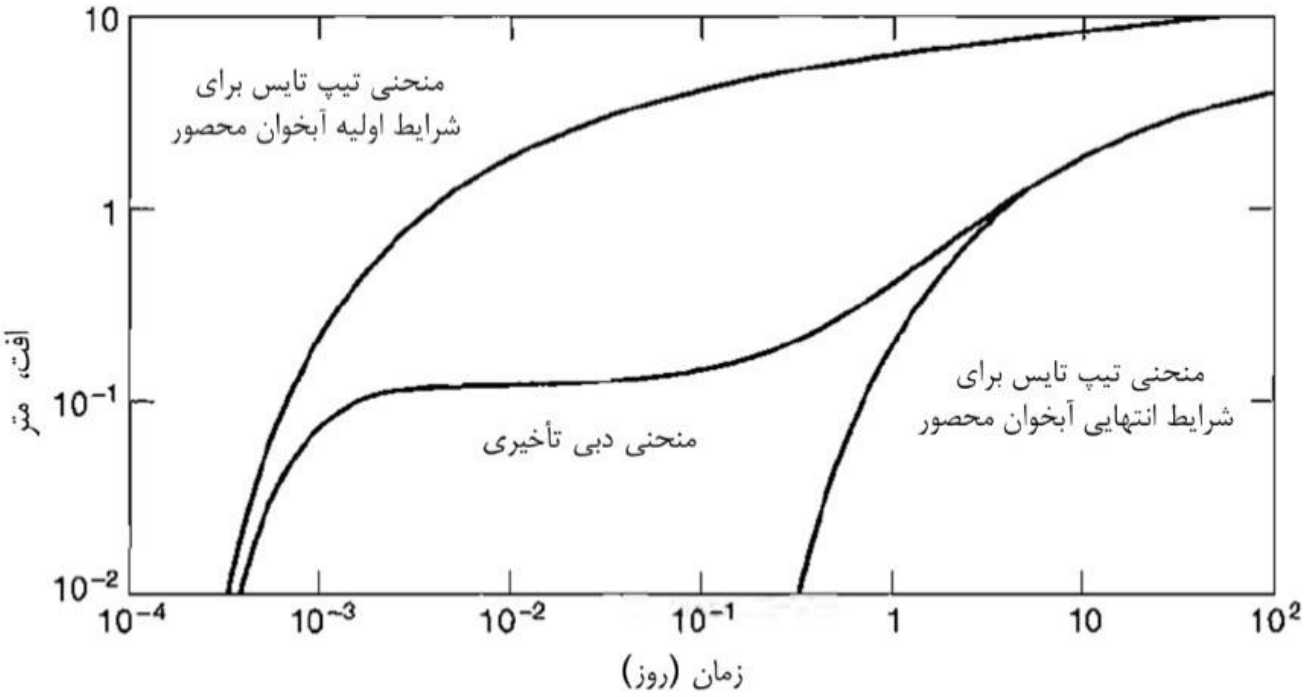
داده‌های آزمایش پمپاژ مشخص می‌نماید که پایین افتادن تراز سطح آب ناشی از زهکشی ثقلی آب از منطقه غیراشباع با نرخ متغیر می‌باشد که به عنوان آبدهی تأخیری (Delayed Yield) در نظر گرفته می‌شود. در یک سری از تحقیقات، Boulton منحنی‌های تیپ خاصی را برای تحلیل داده‌های آزمایش پمپاژ آبخوان‌های آزاد جهت تعیین میزان آبدهی تأخیری، ارائه کرده است. در این منحنی‌های افت- زمان، آبدهی تأخیری مطابق شکل زیر نشان داده شده است.



هر یک از این منحنی‌ها را می‌توان در سه مقطع زمانی تشریح نمود. در اولین مقطع، که پس از چند ثانیه تا کمتر از چند دقیقه اندازه‌گیری می‌شود، آب بلافاصله بعد از شروع پمپاژ به علت تراکم آبخوان و انبساط آب و هوای حبس شده، از ذخیره آبخوان رها می‌شود. این قسمت از منحنی را می‌توان با منحنی تیپ مرتبط با ضریب ذخیره معادل در آبخوان محصور، تطبیق داد.

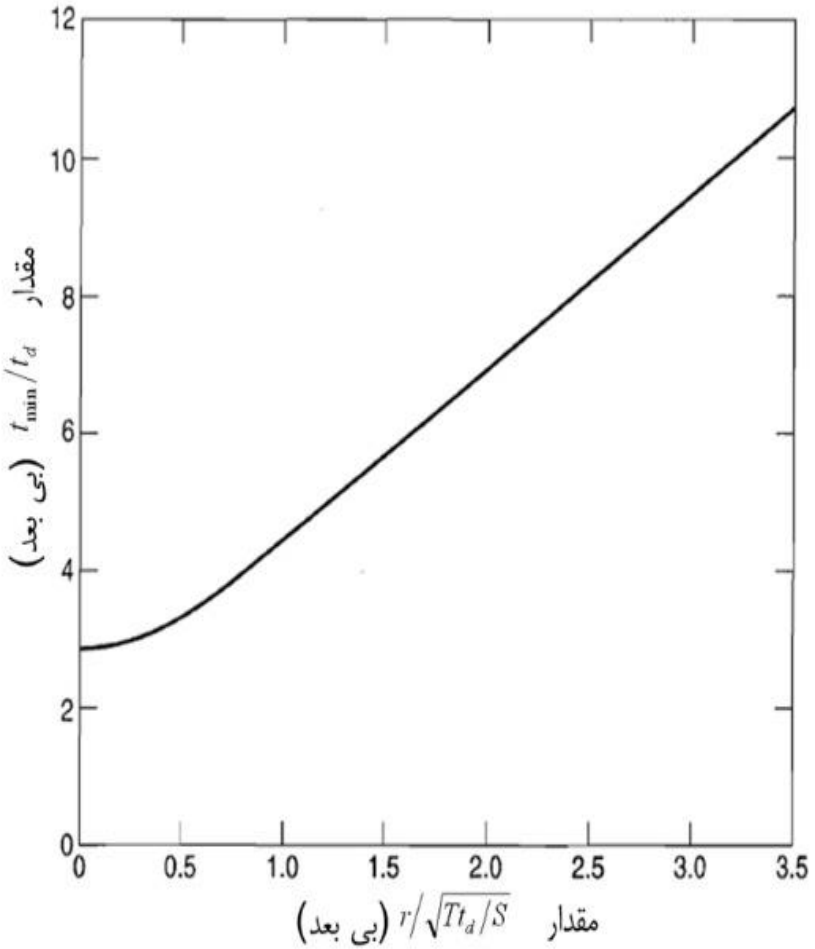
دومین بخش منحنی، شیب مسطحی داشته که ناشی از جایگزینی حفرات خالی با آب‌های ثقلی زهکشی شده از منطقه‌ای که در آن سطح آب زیرزمینی پایین افتاده است (حفرات بالای مخروط افت)، می‌باشد. در نهایت، در سومین بخش، یک حالت تعادل بین نرخ تخلیه ثقلی و نرخ فروکش سطح آب زیرزمینی برقرار می‌شود. این شرایط که ممکن است بعد از چند دقیقه تا چند روز از شروع پمپاژ آغاز شود را می‌توان با منحنی تیپ مرتبط با ضریب ذخیره در آبخوان محصور، تطبیق داد.

از نقطه نظر تولید آب، ضریب ذخیره بدست آمده از سومین بخش منحنی شکل مقابل، که به عنوان آبدهی ویژه مطرح می‌باشد، از اعتبار بیشتری برخوردار بوده و در نتیجه دارای اهمیت بالاتری است. برای سادگی کار، لازم است آزمایش پمپاژ برای یک دوره زمانی طولانی ادامه پیدا کند تا سومین بخش منحنی تعریف گردد. لذا، با کاربرد یکی از روش‌های تحلیلی قبلی که برای معادله غیرتعادلی توضیح داده شد، می‌توان مقدار S را بدست آورد.

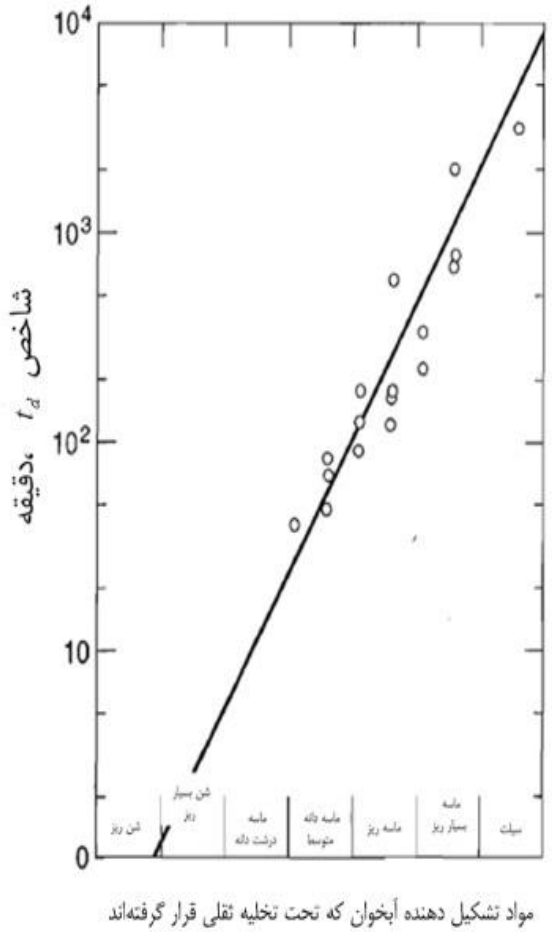


حداقل طول دوره آزمایش پمپاژ جهت تخمین دقیق S در یک آبخوان آزاد، به قابلیت انتقال آبخوان بستگی دارد. یک رویکرد بر اساس مطالعات تجربی صورت گرفته در مواد مختلف آبخوان‌های آبرفتی می‌باشد که بر اساس نوع مواد تشکیل‌دهنده آبخوان می‌توان مطابق شکل (الف) زیر مقدار شاخص تأخیر (t_d) (Delay Index) را تخمین زد. سپس با دانستن فاصله r بین چاه پمپاژ و چاه‌های مشاهده‌ای و تخمین S و T، می‌توان به صورت تقریبی حداقل زمان پمپاژ (t_{min}) را با استفاده از شکل (ب) محاسبه نمود.

روش تجربی جهت تخمین حداقل مدت زمان لازم برای آزمایش پمپاژ در آبخوان آزاد



ب)



الف)

برای اطمینان، روش ساده‌تر دیگری نیز وجود دارد به این ترتیب که زمان پمپاژ بیشتر از زمان پیشنهادی توسط جدول زیر باشد.

مواد غالب تشکیل‌دهنده آبخوان	حداقل زمان پمپاژ (ساعت)
سیلت و رس	۱۷۰
ماسه ریزدانه	۳۰
ماسه دانه‌متوسط و مواد درشت‌دانه	۴

Prickett بر اساس راه‌حل Boulton، راه‌حلی را بر مبنای منحنی تیپ بر اساس شرایط سطح آب زیرزمینی ارائه نمود. معادله زیر نیز جهت تعیین افت در آبخوان آزاد با استفاده از چاه‌هایی که بطور کامل در آبخوان نفوذ کرده و با نرخ ثابت تخلیه می‌شوند قبلاً توسط Neuman ارائه شده بود که به صورت زیر می‌باشد:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_a, u_y, \eta)$$

$W(u_a,u_y,\eta)$ تابع چاه آبخوان آزاد (شکل صفحه بعد) می‌باشد.

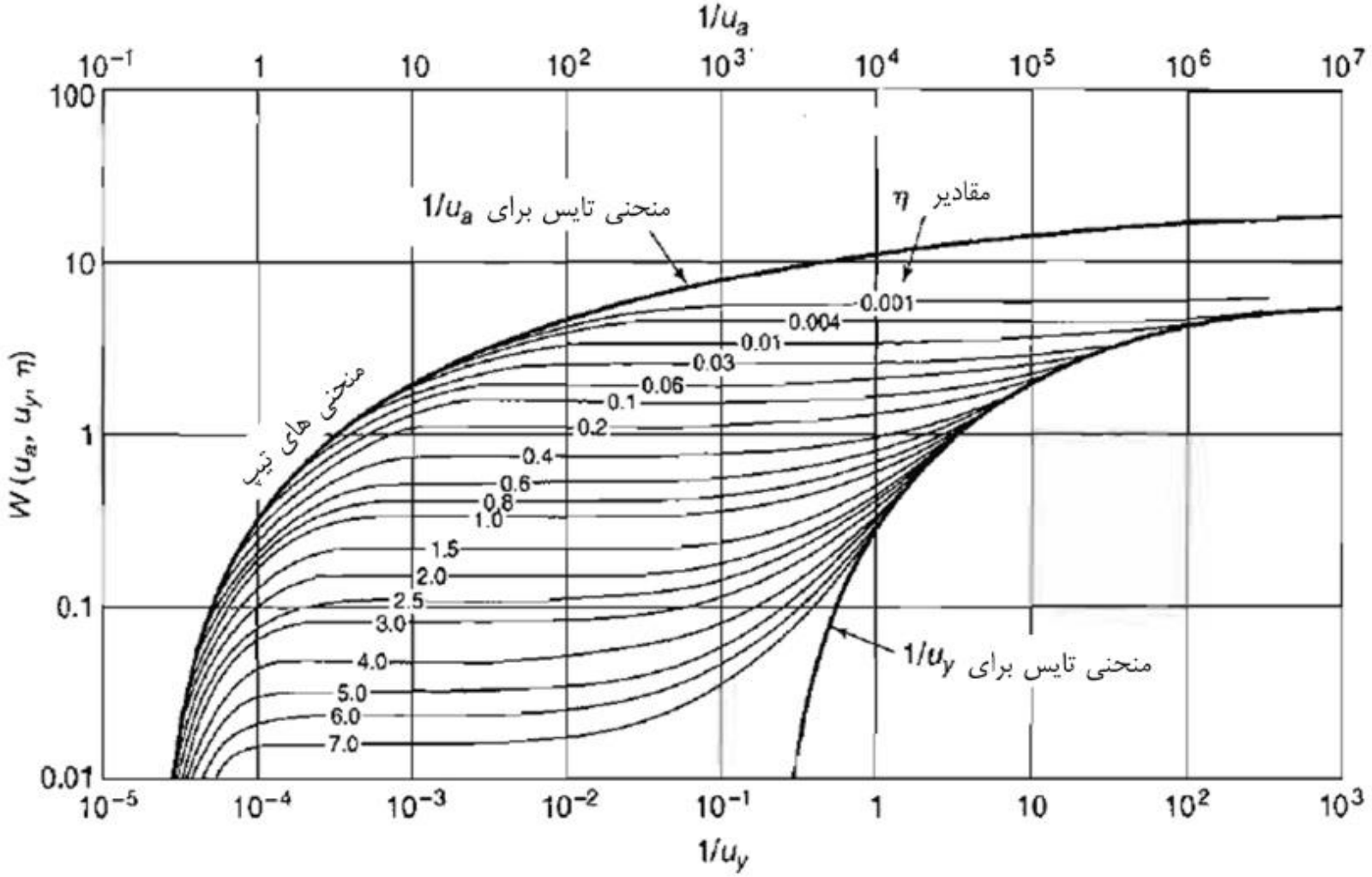
K_h و K_z هدایت هیدرولیکی افقی و قائم، در یک آبخوان همسان ($K_h = K_z$ و $\eta = r^2/b^2$) می‌باشد.

b، ضخامت اشباع اولیه آبخوان آزاد می‌باشد.

$u_a = \frac{r^2 S}{4Tt}$ (برای افت اولیه آبخوان)

$u_y = \frac{r^2 S_y}{4Tt}$ (برای افت انتهایی آبخوان)

$$\eta = \frac{r^2 K_z}{b^2 K_h}$$



نمودارهای تئوری $W(u_a,u_y,\eta)$ در برابر $1/u_a$ و $1/u_y$ در یک آبخوان آزاد

مثال) از یک چاه که بطور کامل در یک آبخوان نامحصور با ضخامت اشباع $25ft$ نفوذ کرده، پمپاژی به میزان $144.4ft^3/min$ صورت می‌گیرد. قابلیت انتقال، ذخیره، آبدهی ویژه و هدایت هیدرولیکی افقی و قائم آبخوان را با استفاده از داده‌های افت- زمان ارائه شده در جدول زیر، که مرتبط به یک چاه مشاهده‌ای واقع در فاصله $73ft$ از چاه پمپاژ است، را تعیین نمائید.

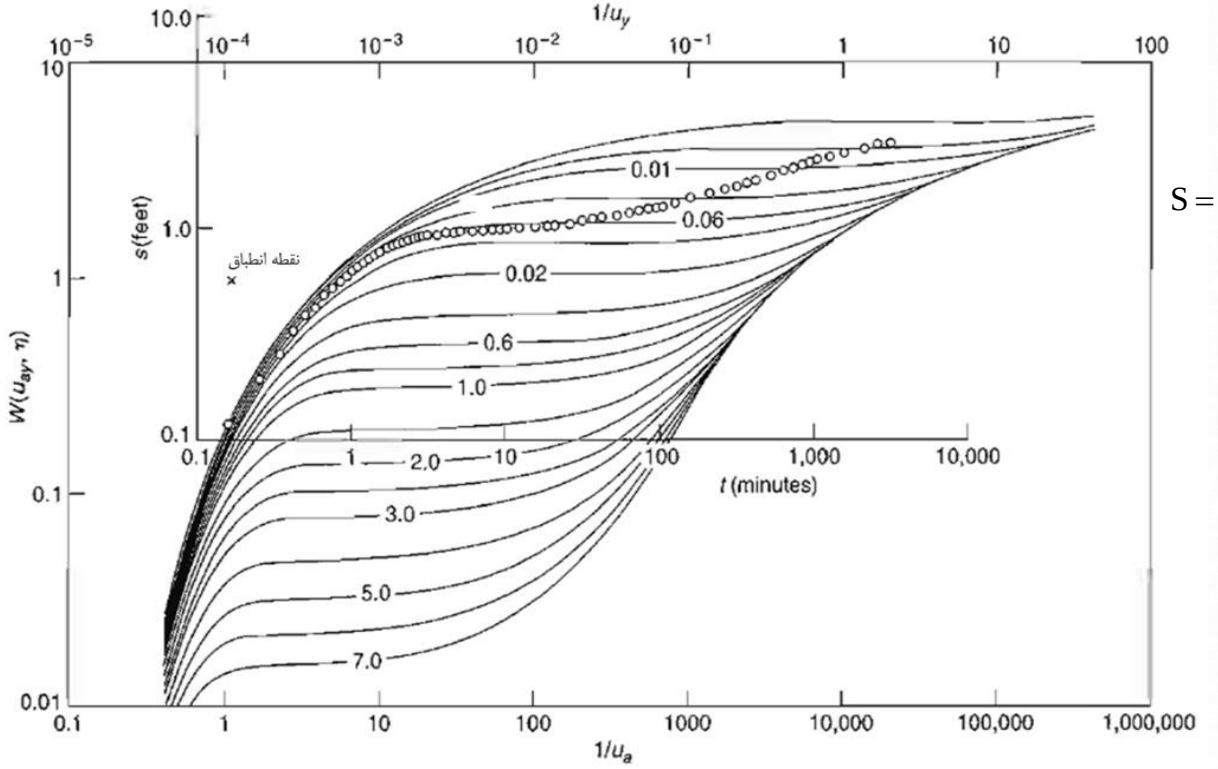
t (min)	s, feet	t (min)	s, feet	t (min)	s, feet	t (min)	s, feet
0.165	0.12	1.68	0.82	10	1.02	200	1.52
0.25	0.195	1.85	0.84	12	1.03	250	1.59
0.34	0.255	2	0.86	15	1.04	300	1.65
0.42	0.33	2.15	0.87	18	1.05	350	1.7
0.5	0.39	2.35	0.9	20	1.06	400	1.75
0.58	0.43	2.5	0.91	25	1.08	500	1.85
0.66	0.49	2.65	0.92	30	1.13	600	1.95
0.75	0.53	2.8	0.93	35	1.15	700	2.01
0.83	0.57	3	0.94	40	1.17	800	2.09
0.92	0.61	3.5	0.95	50	1.19	900	2.15
1	0.64	4	0.97	60	1.22	1,000	2.2
1.08	0.67	4.5	0.975	70	1.25	1,200	2.27
1.16	0.7	5	0.98	80	1.28	1,500	2.35
1.24	0.72	6	0.99	90	1.29	2,000	2.49
1.33	0.74	7	1	100	1.31	2,500	2.59
1.42	0.76	8	1.01	120	1.36	3,000	2.66
1.5	0.78	9	1.015	150	1.45		

حل) داده‌های افت- زمان ترسیم شده در شکل زیر، سه مرحله معمول از افت را برای آبخوان‌های آزاد نشان می‌دهد. بر اساس منحنی داده‌های افت اولیه آبخوان در مقابل زمان می‌توان دریافت خطی که بهترین انطباق را بر روی منحنی‌های تیپ a دارد مرتبط با $\eta = 0.06$ می‌باشد. بر اساس این شکل یک نقطه انطباق با مشخصات $\left(1/u_a = 1, W\left(u_a, u_y, \eta\right) = 1\right)$ انتخاب می‌شود. با استفاده از معادله زیر و با توجه به میزان تخلیه $Q = 144.4 ft^3/min$ می‌توان قابلیت انتقال را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$T = \frac{Q}{4\pi s} W\left(u_a, u_y, \eta\right) = \frac{\left(144.4\,\mathrm{ft}^3/\mathrm{min}\right)}{4\pi\left(0.57\,\mathrm{ft}\right)}(1) = 20.16\,\mathrm{ft}^2/\mathrm{min}$$

$$\cong 29{,}900\,\mathrm{ft}^2/\mathrm{day}$$

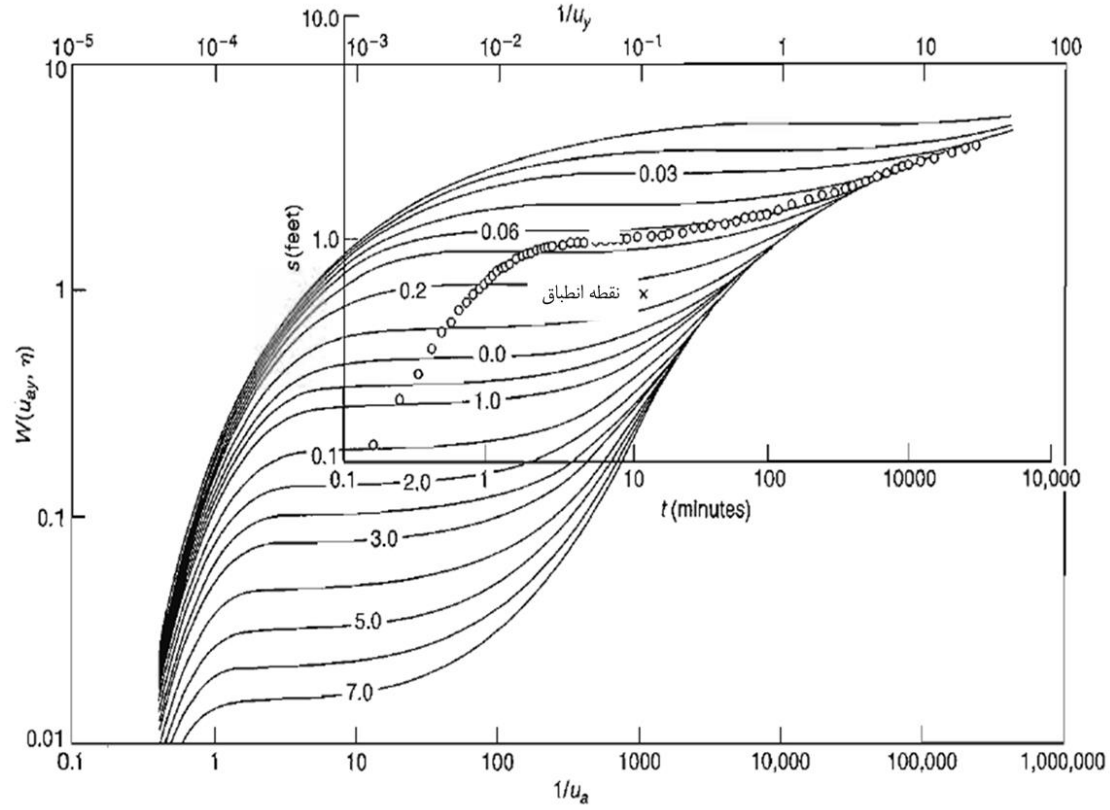
سپس، مقدار ضریب ذخیره آبخوان را می‌توان با استفاده از معادله زیر محاسبه نمود:



$$S = \frac{4Tu_a t}{r^2} = \frac{4\left(20.16\,\mathrm{ft}^2/\mathrm{min}\right)(1)(0.17\,\mathrm{min})}{(73\,\mathrm{ft})^2} = 0.00257$$

منحنی داده‌ها بر روی منحنی تیپ به سمت راست حرکت داده می‌شود که بهترین شکل انطباق در زمان‌های پایانی در $\eta = 0.06$ حاصل می‌شود. در این نقطه $s = 0.57ft$ و $t = 13min$ و همچنین $w(u_y,\mu) = 1$ و $1/u_y = 0.1$می‌باشد. وارد کردن مقادیر متناسب (مقادیر معادل با نقطه دیگری در صفحه انطباق دو منحنی به غیر از نقطه انطباق تعیین شده)، تغییری در تخمین قابلیت انتقال ایجاد نخواهد کرد، اما با استفاده از معادله زیر مقدار آبدهی ویژه برابر خواهد شد با:

$$S_y = \frac{4Ttu_y}{r^2} = \frac{4(20.16\,ft^2/min)(13\,min)(10)}{(73\,ft)^2} = 1.96$$



ضریب هدایت هیدرولیکی افقی، K_r یا K_h بصورت زیر محاسبه می‌شود:

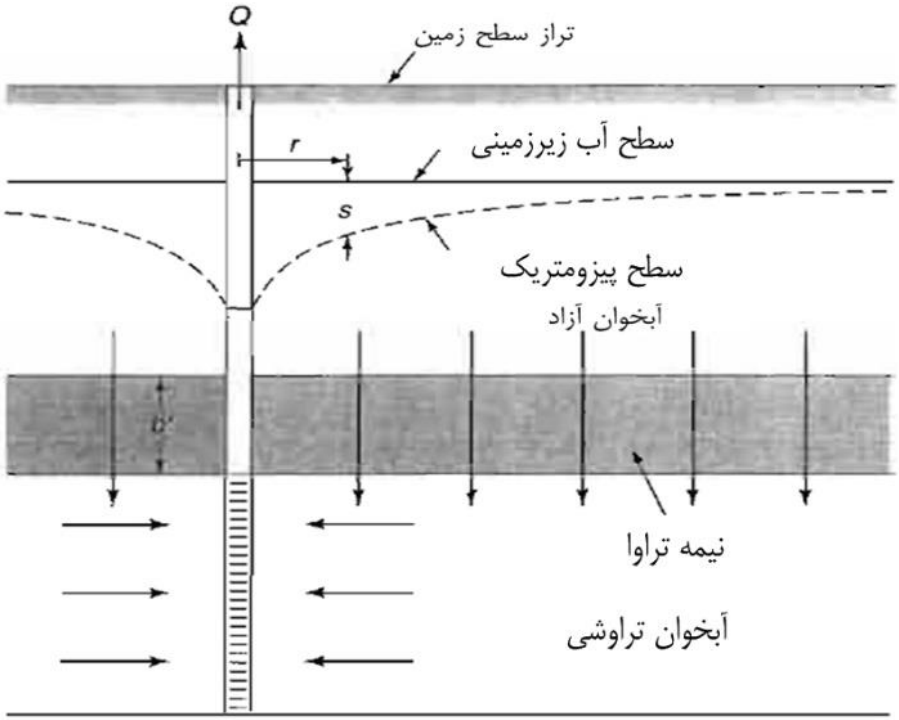
$$K_h = \frac{T}{b} = \frac{20.16\,ft^2/min}{25ft} = 1160\,ft/day$$

و ضریب هدایت هیدرولیکی قائم، K_z یا K_v با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$K_Z = \frac{\eta b^2 K_h}{r^2} = \frac{(0.06)(25ft)^2(1160\,ft/day)}{(73ft)^2} = 8.2\,ft/day$$

جریان شعاعی ناپایدار در یک آبخوان نشتی

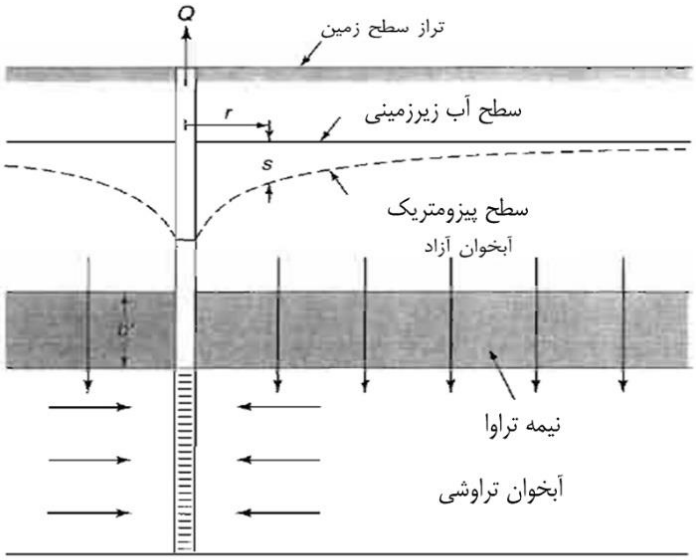
همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است، زمانی که از یک آبخوان نشتی پمپاژ می‌شود، آب هم از آبخوان و هم از بخش اشباع لایه نیمه‌تراوا رویی یا از لایه نیمه‌نفوذپذیر، تخلیه می‌شود. پایین افتادن سطح پیزومتری در آبخوان در حال پمپاژ باعث ایجاد گرادیان هیدرولیکی درون لایه نیمه‌تراوا می‌شود. در نتیجه، آب زیرزمینی رو به پایین و بصورت قائم وارد آبخوان تراوشی می‌شود. مقدار آب منتقل شده به سمت پایین با اختلاف بین سطح آب زیرزمینی و بار پیزومتریک متناسب می‌باشد.



به علت تراوش از لایه نیمه‌تراوا به طرف چاه در آبخوان تراوشی جریان حالت پایدار ممکن است رخ دهد. زمانی که نرخ پمپاژ آب از چاه با نرخ تغذیه جریان عمودی رو به پایین از لایه نیمه‌تراوا برابر باشد، حالت تعادل و در نتیجه جریان پایدار برقرار می‌شود. در این حالت سطح آب زیرزمینی ثابت باقی می‌ماند. راه‌حل‌هایی برای این حالت خاص از شرایط پایدار ارائه شده است اما اغلب راه‌حل‌های موجود برای شرایط جریان ناپایدار می باشد.

زمانی که پمپاژ از یک چاه واقع در آبخوان تراوشی شروع می‌شود، افت سطح پیزومتریک را می‌توان بصورت زیر محاسبه نمود:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u, r/B)$$



در این رابطه s، Q و r در شکل تعریف شده‌اند. همچنین:

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

مقدار r/B از رابطه زیر بدست می‌آید:

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

T: قابلیت انتقال آبخوان تراوشی

K': هدایت هیدرولیکی عمودی لایه نیمه‌تراوا

b': ضخامت اشباع لایه نیمه‌تراوا (نیمه‌نفوذپذیر)

مقادیر تابع چاه $W(u,r/B)$ به صورت جدول توسط Hantush ارائه شده است. لازم به ذکر است که معادله فوق شکلی از معادله تایس است. در حقیقت برای یک آبخوان محصور، $K' \to 0$ بنابراین $B \to \infty$ و $r/B \to 0$ خواهد شد، در نتیجه رابطه فوق به رابطه تایس خلاصه می‌گردد.

راه حل Walton جهت تعیین ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان های نشتی

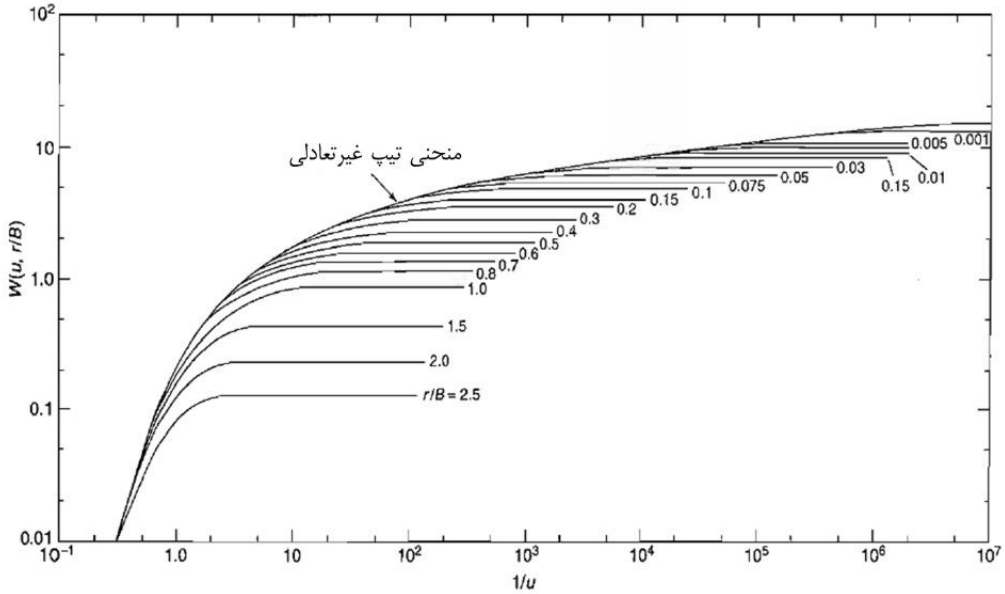
با توجه به شباهت‌های رابطه افت در آبخوان نشتی به راه‌حل تایس، Walton مجموعه منحنی‌های تیپ را برای $W(u,r/B)$، مطابق شکل زیر ارائه نمود.

۱- در این منحنی‌ها، مقادیر $W(u,r/B)$ در مقابل مقادیر $1/u$ برای مقادیر مختلف r/B ترسیم شده است.

۲- بر روی کاغذ لگاریتمی دیگری دقیقاً با همان تقسیمات کاغذ لگاریتمی منحنی نمونه، s در مقابل t ترسیم شده است.

۳- با روی‌هم گذاری دو کاغذ و با رعایت موازی بودن محورهای دو شکل با هم، منحنی داده‌ها را آنقدر جابجا نمائید تا منحنی داده‌ها بر روی یکی از منحنی‌های نمونه به بهترین وجه ممکن منطبق گردد.

۴- در چنین موقعیتی یک نقطه انطباق انتخاب نمائید و مختصات این نقطه نسبت به منحنی نمونه و منحنی داده‌ها یعنی مقادیر $W(u,r/B),1/u,s,t$ یادداشت می‌شود.



۵- مقدار T با استفاده از رابطه $s = \frac{Q}{4\pi T} W(u, r/B)$

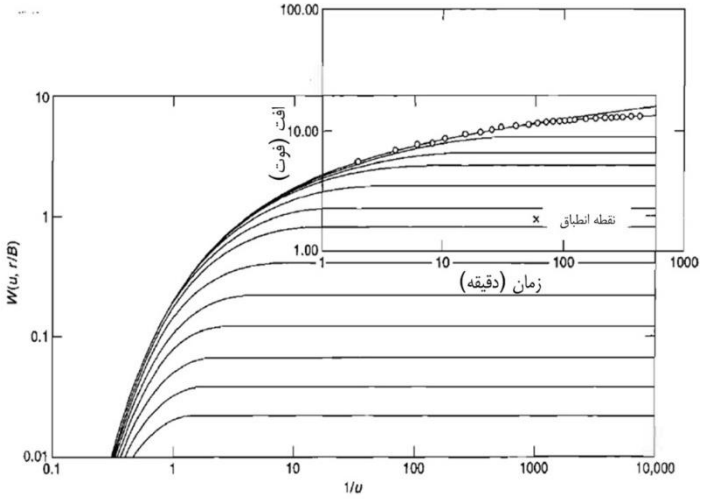
و S با استفاده از معادله $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$ تعیین می‌شود.

۶- با توجه به مقادیر r/B متعلق به بهترین منحنی تیپ منطبق شده، امکان محاسبه K'/b' با استفاده از رابطه

$\frac{r}{B} = \frac{r}{\sqrt{T/(K'/b')}}$ امکان‌پذیر است و اگر b' بر اساس شرایط صحرایی مشخص باشد، K' را می‌توان ارزیابی نمود.

مثال) چاهی با نرخ $600ft^3/min$ که بطور کامل در یک آبخوان محصور نفوذ کرده پمپاژ می‌شود. بالای این آبخوان محصور یک لایه محصورکننده تراوشی با ضخامت $14ft$ قرار دارد. با استفاده از داده‌های افت- زمان ارائه شده برای یک چاه مشاهده‌ای که در فاصله $40ft$ از چاه پمپاژ قرار گرفته، **ضریب قابلیت انتقال** و **ضریب ذخیره آبخوان محصور** و **نفوذپذیری لایه نیمه‌تراوا** را تخمین بزنید. فرض کنید لایه محصورکننده آب را از ذخیره خود آزاد نمی‌کند.

زمان (دقیقه)	افت (فوت)	زمان (دقیقه)	افت (فوت)
0	0.00	80	12.02
2	5.65	90	12.26
4	6.96	100	12.33
6	7.72	110	12.37
8	8.00	120	12.41
10	8.71	150	12.69
15	9.47	180	12.85
20	9.99	210	13.09
25	10.35	240	13.13
30	10.70	270	13.25
40	11.14	300	13.33
50	11.46	360	13.37
60	11.62	420	13.41
70	11.86		



حل) داده‌های صحرایی افت- زمان بر روی مجموعه منحنی‌های تیپ برای آبخوان‌های تراوشی قرار داده می‌شود. مقایسه این دو منحنی نشان می‌دهد که بهترین انطباق در رخ $r/B = 0.03$ می‌دهد. مختصات نقطه انطباق عبارت است از:

$$\frac{1}{u} = 1000, W\left(u, \frac{r}{B}\right) = 1$$

$$t = 59\,min, s = 1.93ft$$

جهت بدست آوردن قابلیت انتقال در واحد ft^2/day و هدایت هیدرولیکی لایه نیمه‌تراوا در واحد ft/day، لازم است تبدیل واحد به صورت زیر انجام شود:

$$Q = 600ft^3/min = 864{,}000ft^3/day$$

$$t = 59\,min = 0.041days$$

بر این اساس قابلیت انتقال و ضریب ذخیره با استفاده از روابط زیر بدست می‌آیند.

$$T = \frac{Q}{4\pi s} W\left(u, \frac{r}{B}\right) = \frac{864{,}000\, ft^3/day}{4\pi(1.93ft)}(1) = 35{,}624\, ft^2/day$$

$$S = \frac{4Ttu}{r^2} = \frac{4(35{,}624\, ft^2/day)(0.041days)(0.001)}{(40ft)^2} = 0.00365$$

هدایت هیدرولیکی لایه نیمه‌تراوا با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$K' = \frac{Tb'(r/B)^2}{r^2} = \frac{(35{,}624\, ft^2/day)(14ft)(0.03)^2}{(40ft)^2} = 0.28\, ft/day$$

جریان چاه در نزدیک مرزهای آبخوان

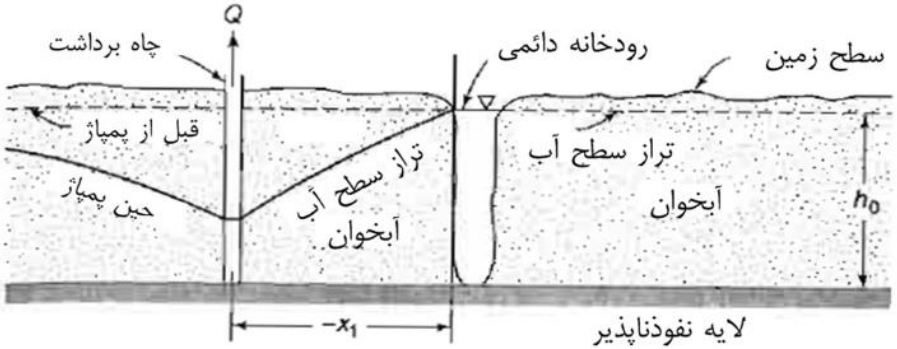
هنگامی که چاهی در نزدیک مرزهای یک آبخوان پمپاژ می‌شود، فرض نامحدود بودن گسترش جانبی اطراف چاه اعتباری ندارد. جهت ارزیابی مسائل جریان در این قبیل موارد از اصل برهم‌نهی (Principle of Superposition) که افت در دو یا چند چاه برابر با مجموع افت در هر چاه می‌باشد، استفاده می‌شود. با استفاده از چاه‌های مجازی (Imaginary Wells)، یک آبخوان با گسترش جانبی محدود را می‌توان به آبخوان نامحدودی تبدیل کرد. در این صورت می‌توان از روش‌های تحلیلی که قبلاً توضیح داده شده است، استفاده نمود.

الف) جریان چاه در نزدیکی یک رودخانه

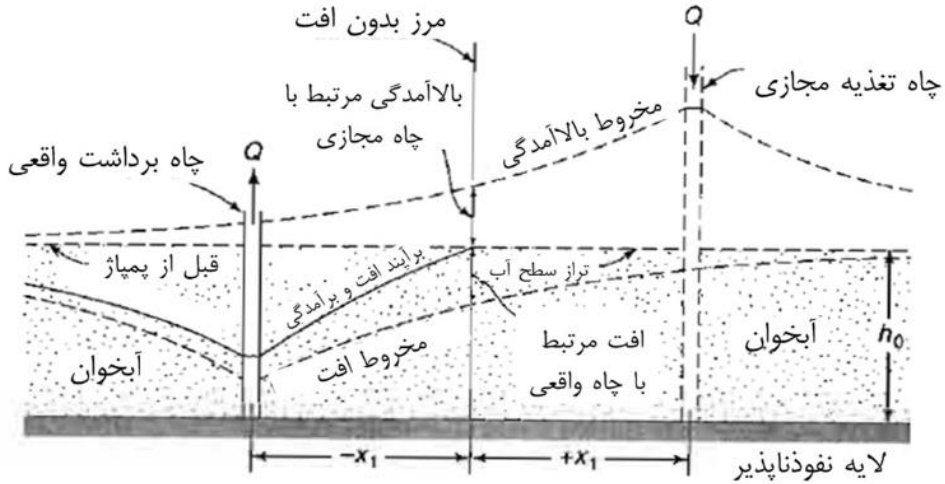
یک نمونه از کاربرد مؤثر روش چاه‌های مجازی، قرار گرفتن محل یک چاه در نزدیکی یک رودخانه دائمی است. در این حالت تعیین بار هیدرولیکی در هر نقطه از حوزه تأثیر پمپاژ با نرخ ثابت Q و تعیین اینکه چه کسری از آب مورد نیاز پمپاژ از رودخانه تأمین می‌شود، مدنظر می‌باشد.

مقطع عرضی از سیستم واقعی و یک سیستم تصویر شده در شکل زیر نشان داده شده است. توجه شود که در شکل ب یک چاه تغذیه‌ای مجازی با فاصله‌ای یکسان از رودخانه، درست مقابل چاه واقعی قرار داده شده است. این چاه مجازی مشابه با چاه واقعی بوده و با نرخ مشابه چاه واقعی بهره‌برداری می‌شود (این چاه باعث افزایش بارآبی اطراف چاه تغذیه می‌گردد). در واقع در امتداد خط محل رودخانه بالاآمدگی و پایین‌رفتگی تراز سطح آب زیرزمینی اثر همدیگر را کاملاً خنثی می‌کنند.

این آرایش ثابت بار آبی در طول رودخانه معادل است با بار آبی ثابت رودخانه تشکیل‌دهنده مرز آبخوان می‌باشد.



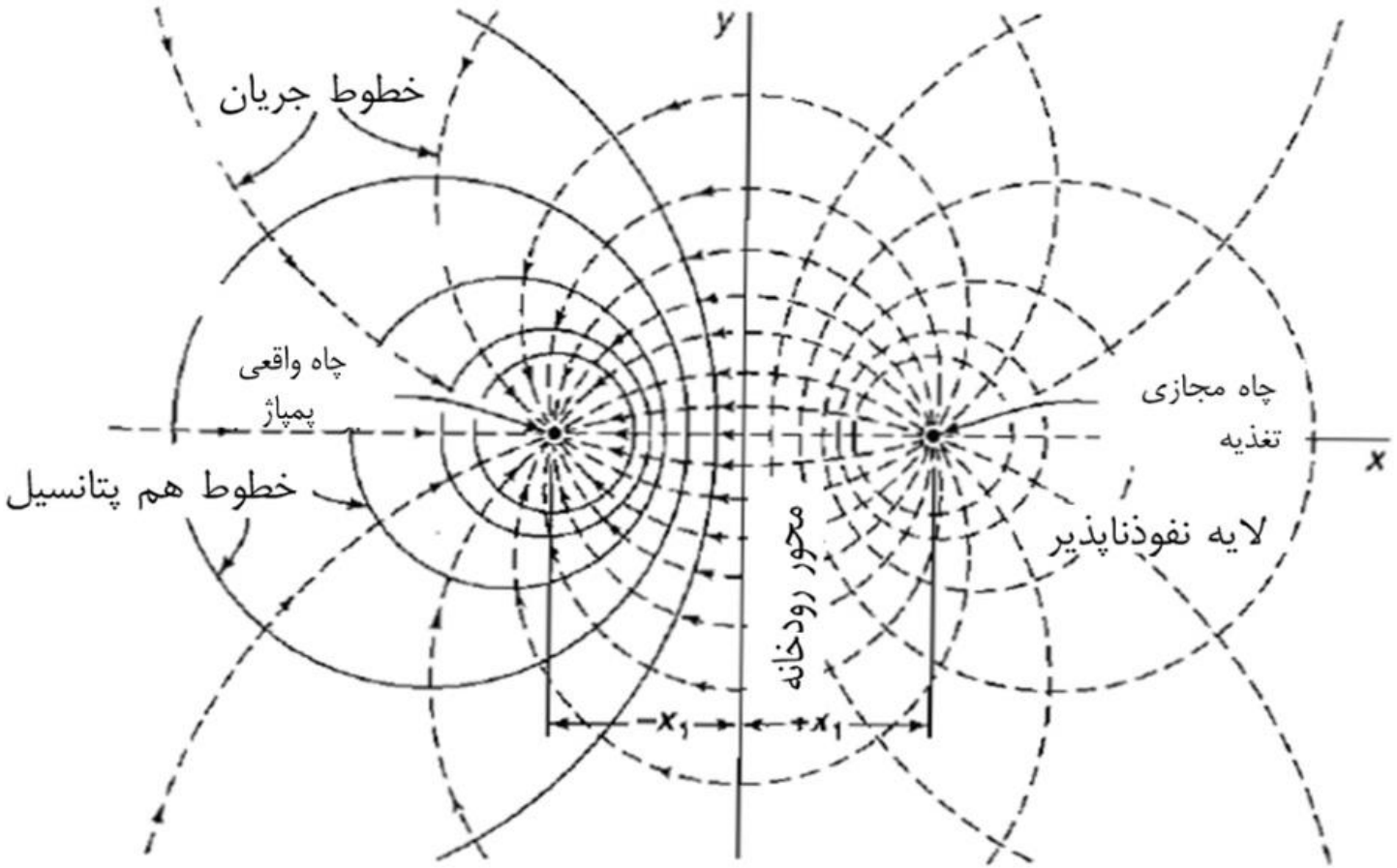
الف)



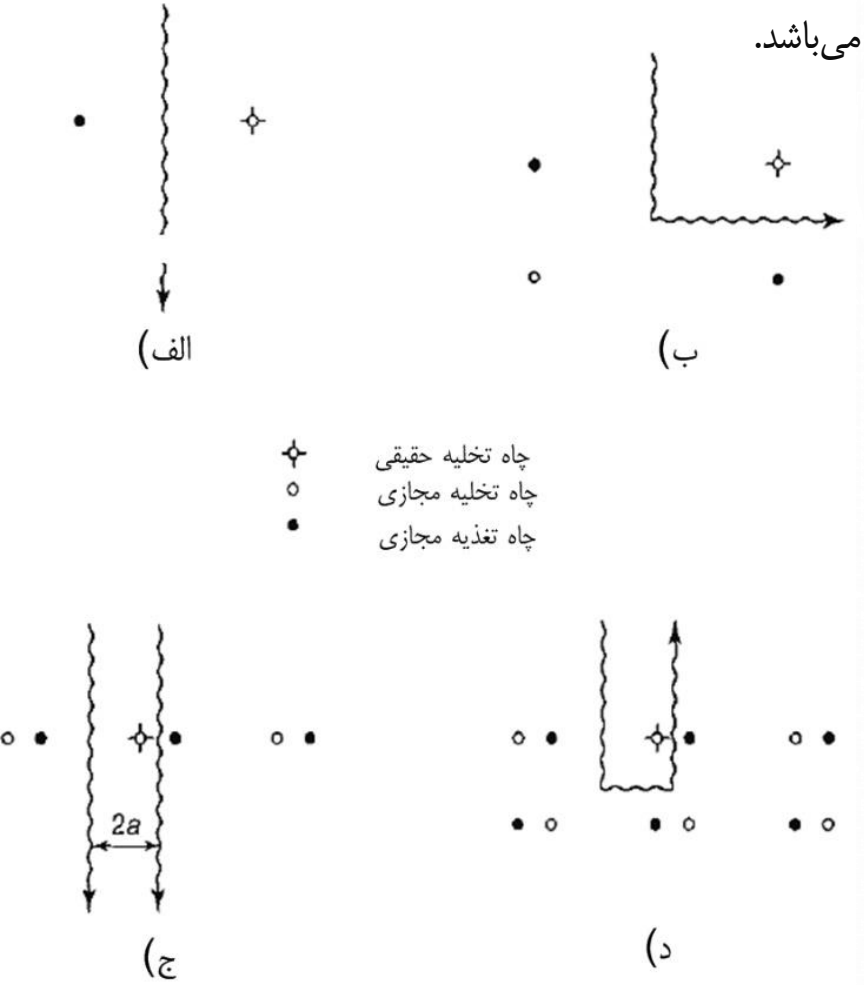
ب)

ضخامت آبخوان در مقایسه با افت برآیند در نزدیک چاه واقعی باید خیلی بزرگ باشد

نمای افقی شبکه جریان را می‌توان در شکل زیر مشاهده نمود. در این شکل یک خط هم‌پتانسیل منفرد بر محور رودخانه منطبق است. جمع برداری افت نامتقارن در چاه واقعی در هر نقطه از جمع جبری افت در چاه واقعی و بالاآمدگی در چاه تغذیه‌ای مجازی، در صورتی که این چاه‌ها در یک آبخوان نامحدود واقع شده باشند، بدست می‌آید. چاه تغذیه‌ای، چاهی است که توسط آن آب به آبخوان اضافه می‌شود. از این رو این چاه عکس یک چاه پمپاژ می‌باشد.



مثال‌هایی از معادل‌سازی هیدرولیکی سیستم‌های آبخوان محدود شده توسط رودخانه‌ها با ترکیبات مختلف در شکل زیر نشان داده شده است.



لازم به ذکر است که ترکیب هر دو چاه تغذیه مجازی و چاه‌های پمپاژ مورد نیاز می‌باشد.

برای رودخانه منفرد، مطابق شکل الف، افت در هر نقطه در شرایط پایدار بصورت زیر بدست می‌آید:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} ln \frac{(x + x_w)^2 + (y - y_w)^2}{(x - x_w)^2 + (y - y_w)^2}$$

که (x_w, y_w) مختصات چاه پمپاژ می‌باشد. به طور مشابه برای مرزهایی به شکل زاویه قائم (شکل ب) داریم:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} ln \frac{\left[(x - x_w)^2 + (y + y_w)^2\right] + \left[(x + x_w)^2 + (y - y_w)^2\right]}{\left[(x - x_w)^2 + (y - y_w)^2\right] + \left[(x + x_w)^2 + (y + y_w)^2\right]}$$

و برای آبخوان نواری محدود شده توسط دو رودخانه موازی هم (شکل ج) داریم:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} ln \frac{cosh\left(\frac{\pi(y - y_w)}{2a}\right) + cosh\left(\frac{\pi(x + x_w)}{2a}\right)}{cosh\left(\frac{\pi(y - y_w)}{2a}\right) - cosh\left(\frac{\pi(x + x_w)}{2a}\right)}$$

زوایا بر حسب رادیان در نظر گرفته شده‌اند. در واقع، در شکل ج، چاه‌های مجازی تا بی‌نهایت گسترش می‌یابند، هر چند که در عمل لازم است تنها یک جفت از نزدیک‌ترین چاه مجازی به چاه واقعی در نظر گرفته شود، زیرا سایر چاه‌ها تأثیر ناچیزی روی افت دارند.

تراز سطح آب زیرزمینی در چاه‌ها ابتدا تحت تأثیر چاه پمپاژ افت می‌کند. پس از مدتی تحت تأثیر مرز تغذیه باعث می‌شود که نرخ زمان افت کاهش یابد و نهایتاً به شرایط پایدار می‌رسد. مطابق شکل زیر، این شرایط تعادلی زمانی رخ می‌دهد که میزان تغذیه با نرخ پمپاژ برابر باشد. در این حالت کل افت برای شرایط تعادل را می‌توان بصورت زیر بیان نمود: $s_r = s_p - s_i$

که s_r افت در یک چاه مشاهده‌ای نزدیک مرز تغذیه، s_p افت ناشی از چاه پمپاژ و s_i بالاآمدگی ناشی از چاه مجازی (مرز تغذیه) می‌باشد.

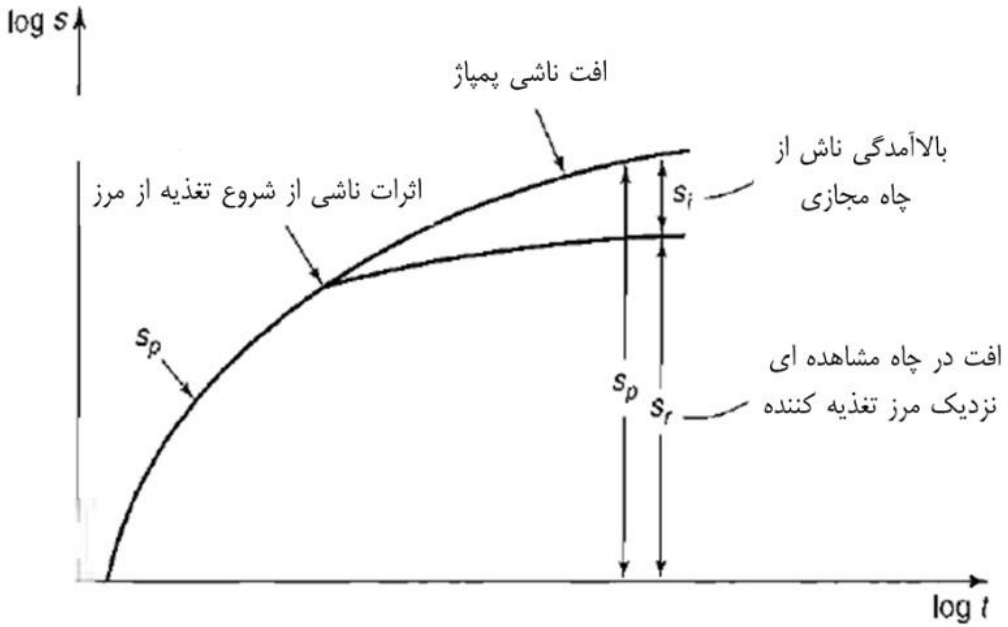
معادله افت را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$s_r = \frac{Q}{4\pi T}\left[W(u_p) - W(u_i)\right]$$

در این رابطه $Q(L^3/T)$ نرخ ثابت پمپاژ، $T(L^3/T)$ ضریب انتقال، $W(u_p)$ و $W(u_i)$ مقادیر بی‌بعد بوده و u_i و u_p از رابطه زیر بدست می‌آیند:

$$u_p = \frac{r_p^2 S}{4Tt_p} \qquad u_i = \frac{r_i^2 S}{4Tt_i}$$

در این رابطه r_i و r_p دارای بعد $[L]$ و t دارای بعد $[T]$ می‌باشد.



افت در سیستم مختصات متداول آمریکایی (سیستم گالن- روز- فوت) بصورت زیر ارائه می‌شود:

$$s_r = \frac{114.6Q}{T}\left[W(u_p) - W(u_i)\right]$$

که $u_p = \frac{1.87r_p^2 S}{Tt_p}$ و $u_i = \frac{1.87r_i^2 S}{Tt_i}$ می‌باشد.

برای مدت زمان طولانی پمپاژ، معادلات چاه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$W(u_p) = -0.5772 - ln(u_p)$$

$$W(u_i) = -0.5772 - ln(u_i)$$

بر اساس روابط فوق می‌توان نوشت:

$$s_r = \frac{Q}{4\pi T}[W(u_p) - W(u_i)] \Rightarrow s_r = \frac{Q}{4\pi T}[-ln(u_p) + ln(u_i)]$$

$$s_r = \frac{114.6Q}{T}[W(u_p) - W(u_i)] \Rightarrow s_r = \frac{114.6Q}{T}[-ln(u_p) + ln(u_i)]$$

چنانچه معادلات در سیستم گالن–روز–فوت و زمان بر حسب دقیقه ارائه شود:

$$u_p = \frac{2693r_p^2S}{Tt} \qquad u_i = \frac{2693r_i^2S}{Tt}$$

$$s_r = \frac{114.6Q}{T}[W(u_p) - W(u_i)] \Rightarrow s_r = \frac{114.6Q}{T}\left[-ln\left(\frac{2693r_p^2S}{Tt}\right) + ln\left(\frac{2693r_i^2S}{Tt}\right)\right]$$

با ساده نمودن رابطه فوق:

$$s_r = \frac{528}{T}Q\,log\left(\frac{r_i}{r_p}\right)$$

Rorabaugh رابطه‌ای را بر اساس پارامترهای فاصله بین چاه تخلیه و خط تغذیه به صورت زیر ارائه نمود:

$$s_r = \frac{528Q\,log\left(\sqrt{(4a^2 + r_p^2 - 4ar_p\,cos\,B_r)}/r_p\right)}{T}$$

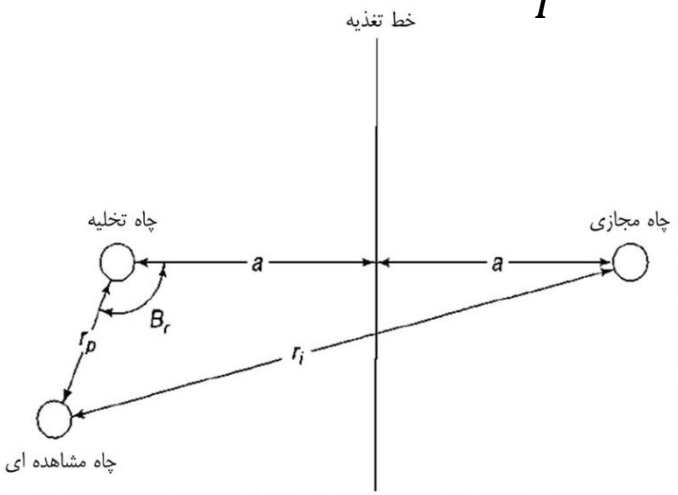
در این رابطه:

$$s_r = \frac{528Q\ log\left(\sqrt{\left(4a^2 + r_p^2 - 4ar_p\ cos\ B_r\right)}/r_p\right)}{T}$$

a: فاصله چاه تخلیه تا مرز تغذیه بر حسب ft

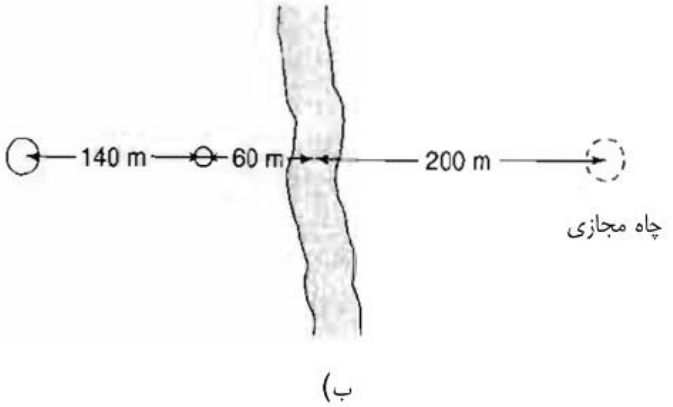
B_r: زوایه بین خطی که چاه تخلیه را به چاه مجازی متصل می‌نماید و خطی که متصل‌کننده چاه تخلیه و چاه مشاهده‌ای است.

توضیح این پارامترها در شکل مقابل ارائه شده است.

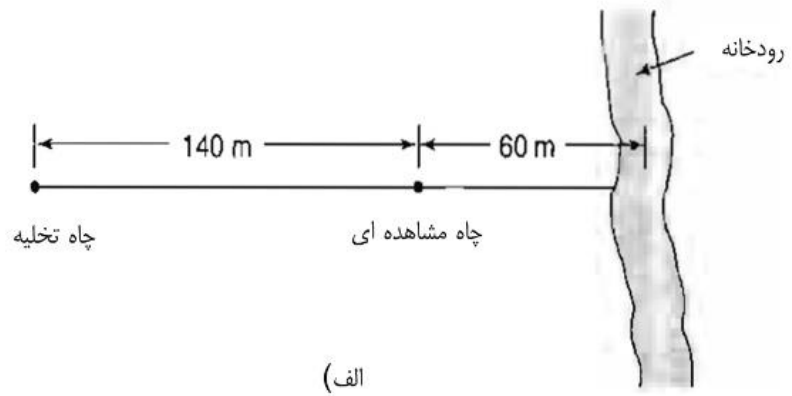


مثال)

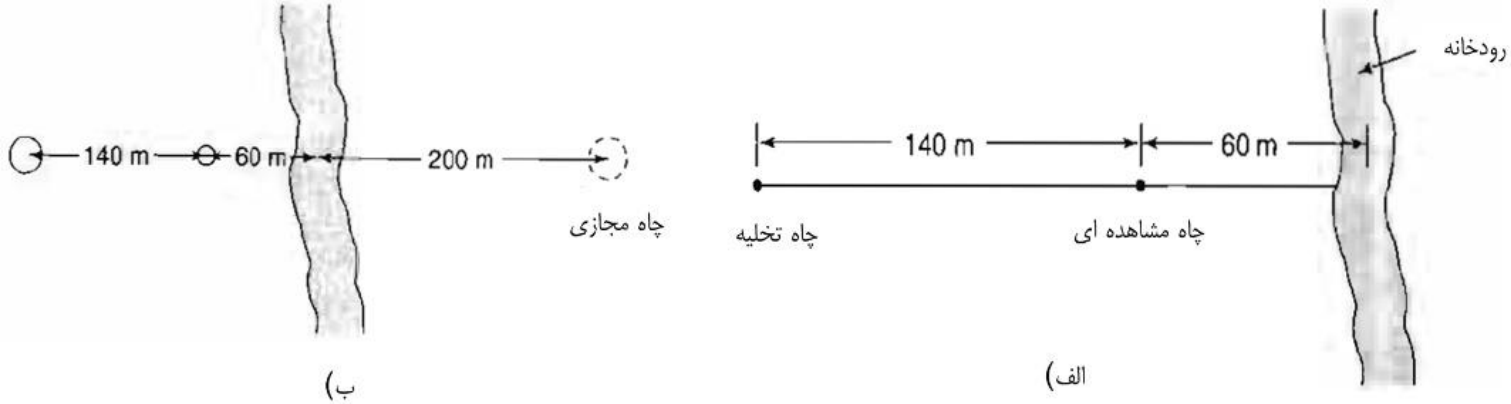
چاهی با قطر $0.5m$ (که در فاصله $200m$ از رودخانه قراردارد) با نرخ نامعلومی از یک آبخوان محصور در حال پمپاژ می‌باشد. ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان به صورت $T = 432m^2/day$ و $S = 4 \times 10^{-5}$ می‌باشد. بعد از $8hr$ از پمپاژ، افت در چاه مشاهده‌ای ($60m$ دورتر از رودخانه)، $0.8m$ می‌باشد. نرخ پمپاژ و افت در چاه پمپاژ را محاسبه نمائید. اثر رودخانه در افت چاه پمپاژ و چاه مشاهده‌ای چقدر است؟



ب)



الف)



حل)

اطلاعاتی که از این مثال بدست آمده است را می‌توان بصورت زیر خلاصه نمود:

$$S = 4 \times 10^{-5} \text{ و } T = 432 m^2/day = 5 \times 10^{-3} m^2/s$$

$$r_w = 0.25m, t = 8hr = 28{,}800s, s = 0.8m$$

همانطور که در شکل ب نشان داده شده است، یک چاه تغذیه‌ای مجازی در فاصله یکسان از رودخانه مشابه با فاصله چاه پمپاژ از رودخانه در نظر گرفته می‌شود. رابطه زیر با توجه به اطلاعات فوق جهت محاسبه حجم پمپاژ آب از چاه مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$s = \frac{Q}{4\pi T}[W(u_p) - W(u_i)]$$

$$u_p = \frac{r_p^2 S}{4Tt} = \frac{(140)^2(4 \times 10^{-4})}{4(5 \times 10^{-3})(28800)} = 1.36 \times 10^{-2}$$

$$u_i = \frac{r_i^2 S}{4Tt} = \frac{(260)^2(4\times10^{-4})}{4(5\times10^{-3})(28800)} = 4.69\times10^{-2}$$

$$\forall\, u_p = 1.36\times10^{-2} \Rightarrow W(u_p) = 3.79 \quad , \qquad \forall\, u_i = 4.69\times10^{-2} \Rightarrow W(u_i) = 2.54$$

بنابراین میزان تخلیه از چاه به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$0.8 = \frac{Q}{4\pi(5\times10^{-3})}(3.79) - \frac{Q}{4\pi(5\times10^{-3})}(2.54)$$

لذا $Q = 0.04 m^3/s$. میزان افت در چاه تخلیه را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$u_w = \frac{r_w^2 S}{4Tt} = \frac{(0.25)^2(4\times10^{-4})}{4(5\times10^{-3})(28800)} = 4.34\times10^{-8}$$

$$u_i = \frac{(400)^2(4\times10^{-4})}{4(5\times10^{-3})(28800)} = 0.111$$

$$\forall\, u_w = 4.39\times10^{-8} \Rightarrow W(u_w) = 16.38 \ , \qquad \forall\, u_i = 0.111 \Rightarrow W(u_i) = 1.75$$

لذا میزان افت برابر است با: $s_w = \frac{0.04}{4\pi(5\times10^{-3})}(16.38) - \frac{0.04}{4\pi(5\times10^{-3})}(1.75) = 9.31m$

به دلیل تأثیر رودخانه روی چاه، افت کاهش می‌یابد.

به دلیل تأثیر رودخانه روی چاه، افت کاهش می‌یابد. بنابراین کاهش افت در چاه مشاهده‌ای برابر است با:

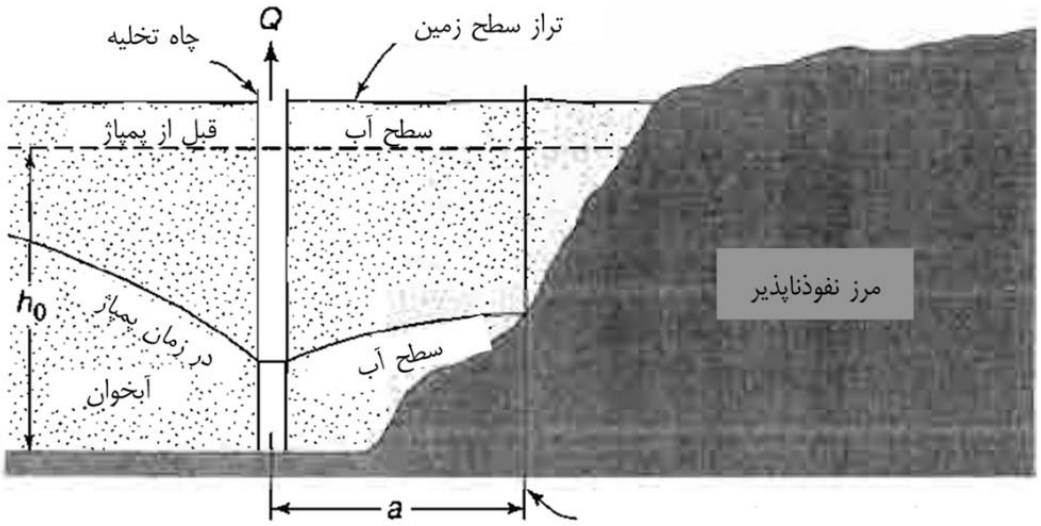
$$s_{river} = -\frac{Q}{4\pi T} W(u_i) = -\frac{0.04}{4\pi(5 \times 10^{-3})}(2.54) = -1m$$

و به طور مشابه میزان کاهش افت در چاه تخلیه برابر است با:

$$s_{river} = -\frac{0.04}{4\pi(5 \times 10^{-3})}(1.75) = -1.11m$$

ب) جریان چاه در نزدیکی مرز نفوذناپذیر

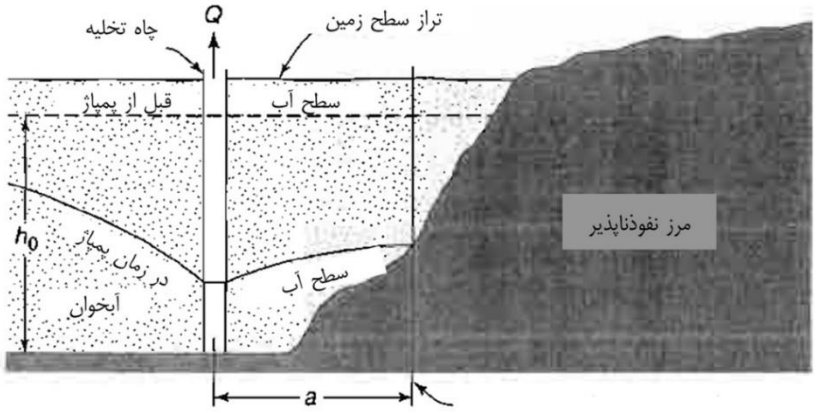
در مواردی که یک مرز نفوذناپذیر یا مرز مانع (Barrier Boundary) وجود دارد، چون از سرتاسر مرز مانع جریان عبور نمی‌کند، بنابراین هیچ گونه آبی از سازند غیرقابل نفوذ در آبدهی چاه مشارکت ندارد. مخروط افت که در آبخوان با گسترش جانبی نامحدود در اطراف یک چاه پمپاژ ایجاد می‌شود، در شکل زیر نشان داده شده است.



موقعیت متوسط یا مؤثر مرز غیرقابل نفوذ

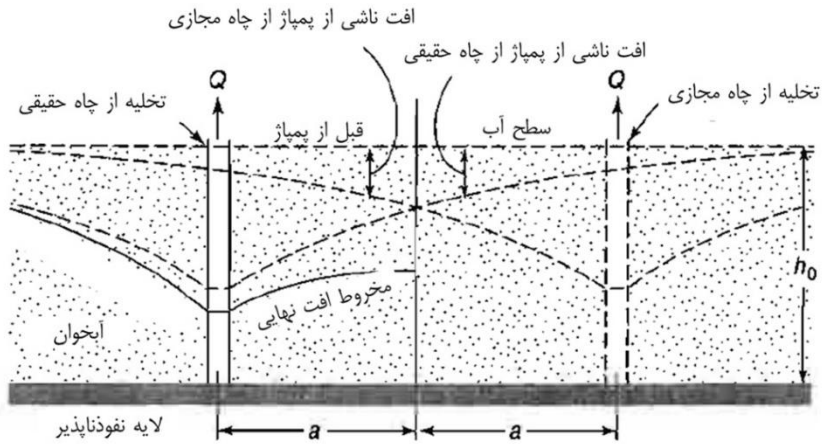
بدلیل وجود مرز مانع، مخروط افت نشان داده شده به دلیل اینکه هیچ جریانی از مرز عبور نمی‌کند، از اعتبار بالایی برخوردار نمی‌باشد. با جایگذاری یک چاه مجازی، به عنوان یک چاه تخلیه در سرتاسر مرز مانع، اثری همانند مرزی که جریانی از آن عبور نمی‌کند ایجاد می‌نماید. این چاه مجازی بایستی بصورت عمود بر مرز نفوذناپذیر قرار داده شود و فاصله‌اش با این مرز مشابه به فاصله چاه واقعی از مرز باشد.

مطابق شکل ب، مخروط افت واقعی از **مجموع مؤلفه‌های مخروط افت در چاه واقعی و چاه مجازی** بدست می‌آید. در ابتدا افت تراز سطح آب در چاه‌ها تنها ناشی از اثر پمپاژ می‌باشد. با ادامه پمپاژ، اثرات مرز مانع نیز که توسط چاه مجازی شبیه‌سازی می‌شود، بر روی چاه واقعی تأثر خواهد گذاشت. زمانی که اثرات مرز مانع به چاه واقعی برسد، نرخ زمانی افت افزایش خواهد یافت (شکل زیر).



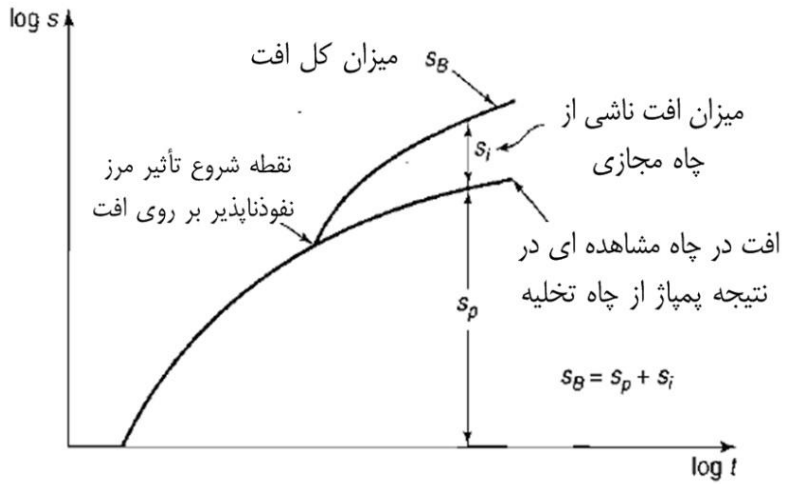
موقعیت متوسط یا مؤثر مرز غیرقابل نفوذ

الف)



ضخامت آبخوان در مقایسه با افت برآیند در نزدیک چاه واقعی باید خیلی بزرگ باشد

ب)



در این شرایط، نرخ کل برداشت از آبخوان برابر است با **مجموع میزان آب پمپاژی از چاه واقعی و تخلیه از چاه مجازی** که باعث ایجاد مخروط افت در چاه واقعی می‌شود و منجر به انحراف مخروط افت به سمت پایین می‌شود. لذا کل افت در چاه واقعی بصورت زیر بیان می‌شود:

$$s_b = s_p + s_i$$

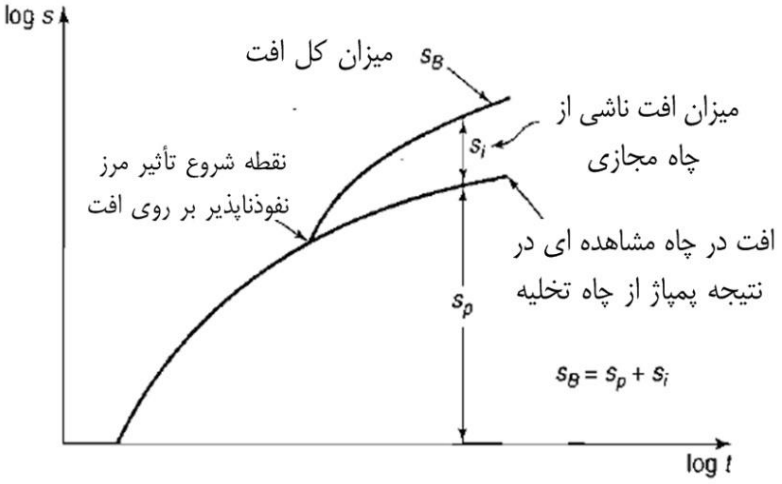
بطوری که s_b کل افت، s_p افت در چاه مشاهده‌ای ناشی از پمپاژ چاه بهره‌برداری و s_i افت ناشی از تخلیه چاه مجازی (مرز مانع). لذا کل افت را می‌توان بصورت زیر بیان نمود:

$$s_b = \frac{Q}{4\pi T} W(u_p) + \frac{Q}{4\pi T} W(u_i)$$

در این رابطه:

$Q\,(L^3/T)$: میزان پمپاژ با نرخ ثابت

$T\,(L^3/T)$: ضریب انتقال



$W(u_p)$ و $W(u_i)$ مقادیر بی‌بعد بوده و u_i و u_p از رابطه زیر بدست می‌آیند:

$$u_i = \frac{r_i^2 S}{4Tt_i} \quad \text{و} \quad u_p = \frac{r_p^2 S}{4Tt_p}$$

در این رابطه r_i و r_p دارای بعد $[L]$ و t دارای بعد $[T]$ است.

افت در معادله $s_b = s_p + s_i$ را می‌توان در واحدهای متداول آمریکایی (گالن- روز- فوت) که در آن S بر حسب فوت، Q بر حسب gpm، T بر حسب gpd/ft، r بر حسب فوت و t بر حسب روز می‌باشد، نیز بصورت زیر ارائه نمود:

$$s_b = \frac{114.6Q}{T}W(u_p) + \frac{114.6Q}{T}W(u_i) = \frac{114.6Q}{T}[W(u_p) + W(u_i)]$$

در این رابطه $u_p = \frac{1.87r_p^2S}{Tt_p}$ و $u_i = \frac{1.87r_i^2S}{Tt_i}$ می‌باشد.

با فرض اینکه میزان افت در زمان‌های t_p و t_i با هم برابر باشد ($s_p = s_i$)، در این صورت $W(u_p) = W(u_i)$ و $u_p = u_i$ خواهد بود. لذا:

$$\frac{r_i^2S}{4Tt_i} = \frac{r_p^2S}{4Tt_p} \Rightarrow \frac{r_i^2S}{Tt_i} = \frac{r_p^2S}{Tt_p}$$

با خلاصه نمودن رابطه فوق داریم: $\frac{r_i^2}{t_i} = \frac{r_p^2}{t_p}$

معادله $\frac{r_i^2}{t_i} = \frac{r_p^2}{t_p}$، قانون زمان‌ها (Law of Times) را برای یک آبخوان با مشخصات معلوم تعریف می‌نماید. مطابق این قانون زمان‌های ایجاد افت برابر مستقیماً با مربع فاصله یک چاه مشاهده‌ای تا یک چاه بهره‌برداری و چاه مجازی با میزان تخلیه برابر، تغییر می‌نماید.

قانون زمان‌ها را می‌توان برای تعیین فاصله یک چاه مجازی از چاه مشاهده‌ای، بصورت زیر استفاده نمود:

$$r_i = r_p \sqrt{\frac{t_i}{t_p}}$$

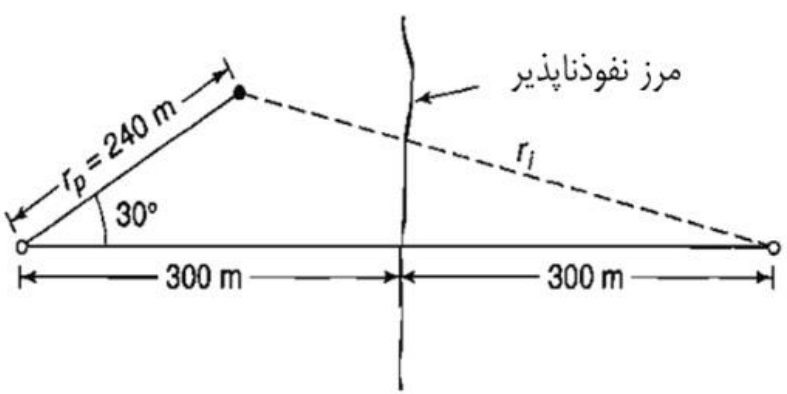
r_i: فاصله چاه مجازی از چاه مشاهده‌ای بر حسب ft

r_p: فاصله چاه پمپاژ تا چاه مشاهده‌ای بر حسب ft

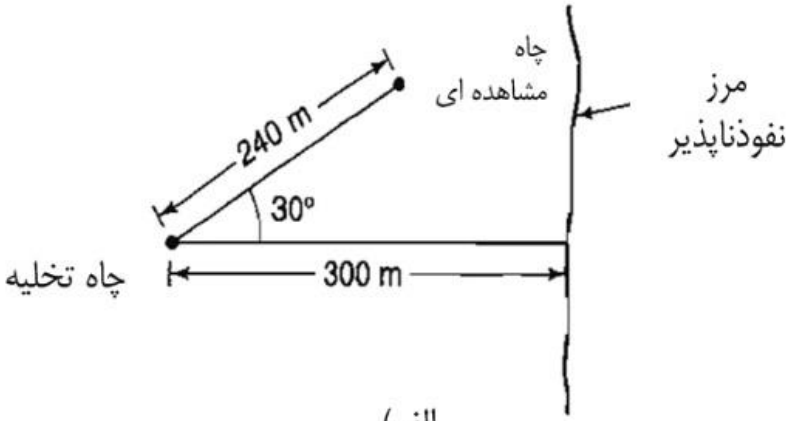
t_p: زمان بعد از شروع پمپاژ و قبل از اینکه مرز نفوذناپذیر تأثیرگذار باشد

t_i: زمان (بعد از شروع پمپاژ و بعد از اثرگذاری مرز نفوذناپذیر بر روی میزان افت در چاه پمپاژی) جائی که $s_p = s_i$

مثال) چاهی در آبخوان محصور با ضخامت $20m$، که در نزدیکی یک مرز نفوذناپذیر (شکل زیر) قرار دارد با نرخ $0.03m^3/s$ در حال پمپاژ است. هدایت هیدرولیکی آبخوان $27.65m/day$ و ضریب ذخیره آبخوان 3×10^{-5} می‌باشد. میزان افت در چاه مشاهده‌ای را پس از $10hr$ پمپاژ پیوسته تعیین نمائید. همچنین چه کسری از افت مرتبط با مرز نفوذناپذیر می‌باشد.



ب)



الف)

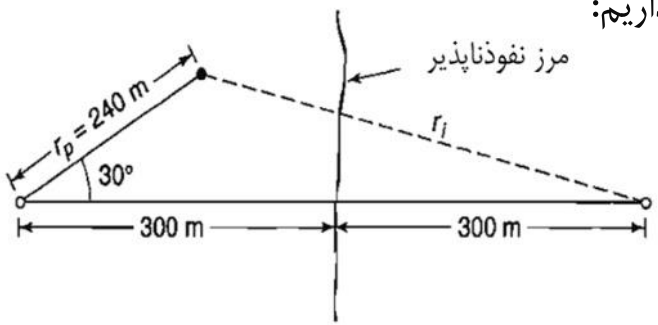
حل)

اطلاعاتی که از این مثال بدست آمده است را می‌توان بصورت زیر خلاصه نمود:

$$Q = 0.03\,m^3/s\,, b = 20m, K = 27.65\,m/day = 3.2 \times 10^{-4}\,m/s\,,$$

$$S = 3 \times 10^{-5}, t = 10hrs = 36{,}000s$$

یک چاه مجازی در طرف دیگر مرز نفوذناپذیر و در فاصله مشابه چاه پمپاژ با مرز نفوذناپذیر در نظر گرفته می‌شود (شکل زیر). افت در چاه مشاهده‌ای ناشی از چاه واقعی و چاه مجازی می‌باشد (که برای مرز نفوذناپذیر محاسبه می‌شود). از این رو، با استفاده از معادله زیر داریم:



$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_p) + \frac{Q}{4\pi T} W(u_i)$$

$$u_p = \frac{r_p^2 S}{4Tt} = \frac{(240)^2(3 \times 10^{-5})}{4(20)(3.2 \times 10^{-4})(36{,}000)} = 1.88 \times 10^{-3}$$

محاسبه بعدی، فاصله چاه مشاهده‌ای تا چاه مجازی می‌باشد:

$$\mathrm{r_i^2} = 600^2 + 240^2 - 2(600)(240)\cos(30°) = 16{,}8185\mathrm{m}^2 \Rightarrow \mathrm{r_i} = 410\mathrm{m}$$

با استفاده از $\mathrm{r_i}$ می‌توان مقدار $\mathrm{u_i}$ را محاسبه نمود:

$$\mathrm{u_i} = \frac{16{,}8185(3 \times 10^{-5})}{4(20)(3.2 \times 10^{-4})(36{,}000)} = 5.47 \times 10^{-3}$$

تابع چاه با استفاده از جدول $u - W(u)$ بدست آمده است بطوریکه:

$$u_p = 1.88 \times 10^{-3} \Rightarrow W(u_p) = 5.72$$
$$u_i = 5.47 \times 10^{-3} \Rightarrow W(u_i) = 4.64$$

مقدار افت در چاه مشاهده‌ای برابر است با:

$$s = \frac{0.03}{4\pi(20)(3.2 \times 10^{-4})} = (5.72 + 4.64) = 3.86m$$

میزان افت ناشی از وجود مرز نفوذناپذیر برابر است با:

$$s_i = \frac{Q}{4\pi T} W(u_i) = \frac{0.03}{4\pi(20)(3.2 \times 10^{-4})} \times 4.64 = 1.73m$$

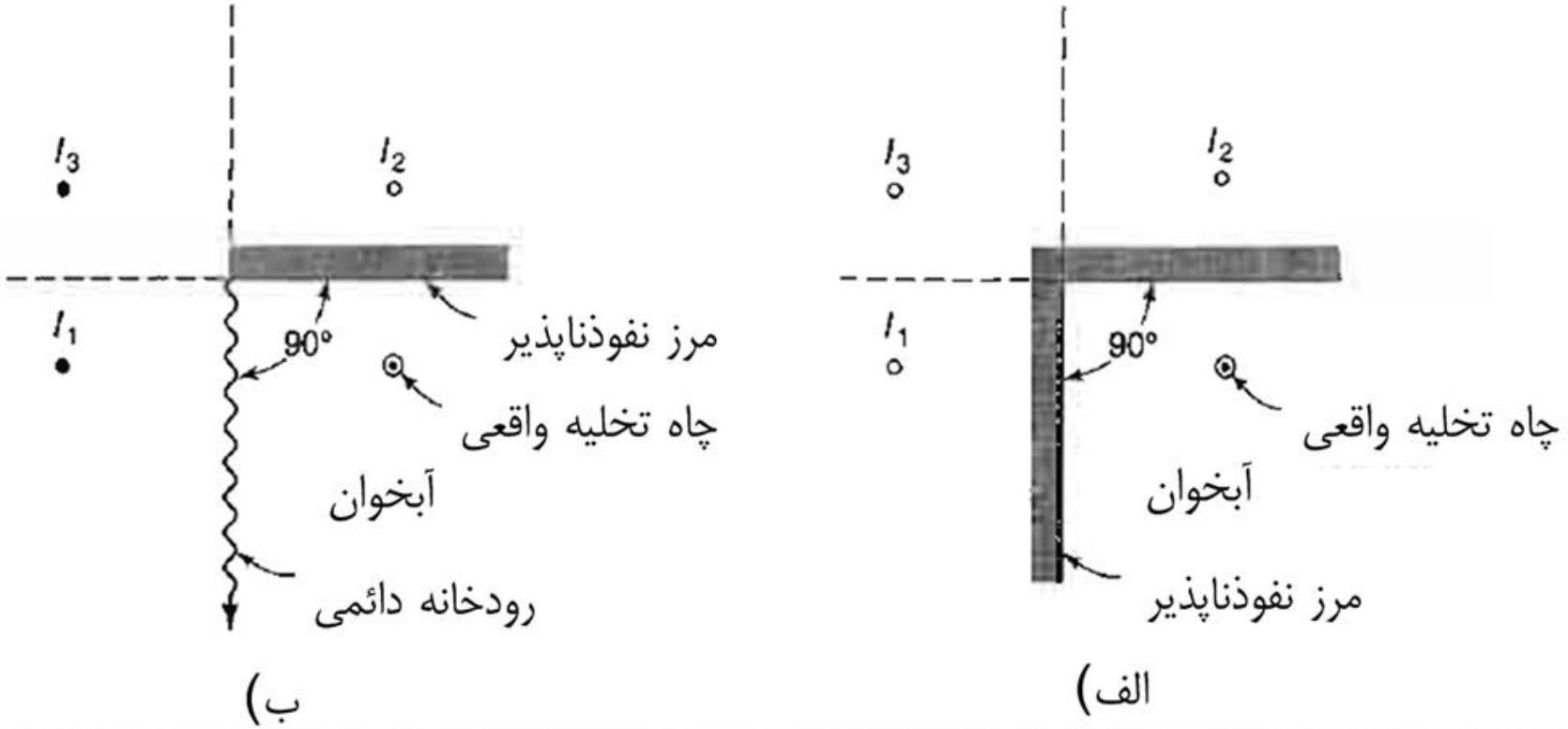
درصد افت متناسب با مرز نفوذناپذیر برابر خواهد بود با:

$$\Rightarrow \frac{s_i}{s} = \frac{1.73}{3.86} = 0.45(45\%)$$

ج) جریان چاه در نزدیکی سایر مرزها

علاوه بر دو مرز ارائه شده قبلی، روش تصویرسازی را می‌توان در بسیاری از مسائل مربوط به مرز آب زیرزمینی بکار برد. مشابه قبل، یک سیستم هیدرولیکی معادل جایگزین مرزهای واقعی می‌شود، که این سیستم شامل چاه‌های مجازی و راه‌حل‌های مجاز مرتبط با آن است که از معادلات بکارگرفته شده در آبخوان‌های وسیع و نامحدود بدست می‌آیند.

در شکل زیر، دو شرایط مرزی پیشنهادی که سازگار با این روش می‌باشند نشان داده شده است.



سیستم چاه مجازی برای یک چاه تخلیه در نزدیکی مرزهای آبخوان

الف) آبخوان توسط دو مرز نفوذناپذیر محصور شده است و ب) آبخوان با یک مرز نفوذناپذیر و یک رودخانه دائمی محصور شده است.

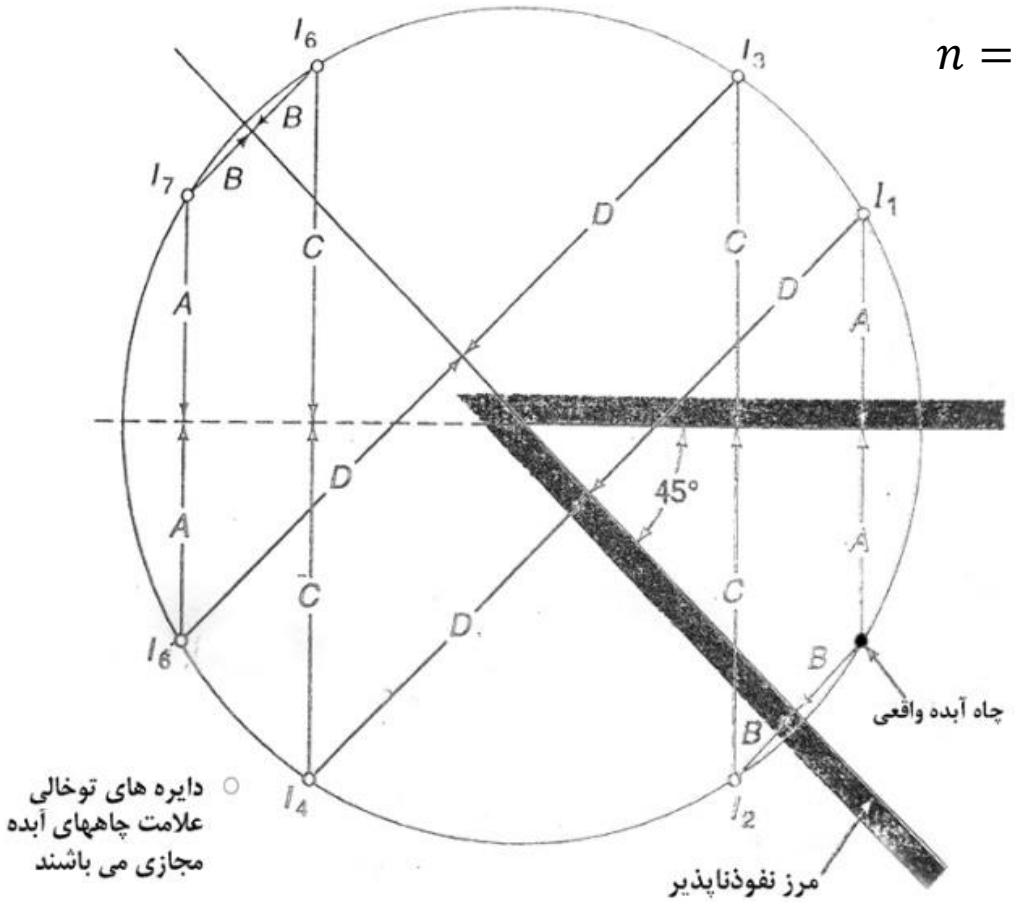
دایره توپر نشان‌دهنده چاه تغذیه مجازی و دایره توخالی چاه تخلیه مجازی می‌باشند.

چاه‌های تخلیه‌ای مجازی I_1 و I_2 فراهم‌کننده شرایط هیدرولیکی لازم بوده اما چاه مجازی سوم I_3 برای ایجاد تعادل افت‌ها در طول مرزهای غیرقابل نفوذ، لازم می‌باشد. برآیند سیستم چهار چاه تخلیه در یک آبخوان وسیع، هیدرولیک سیستم جریان برای این شرایط مرزهای فیزیکی را نشان می‌دهد.

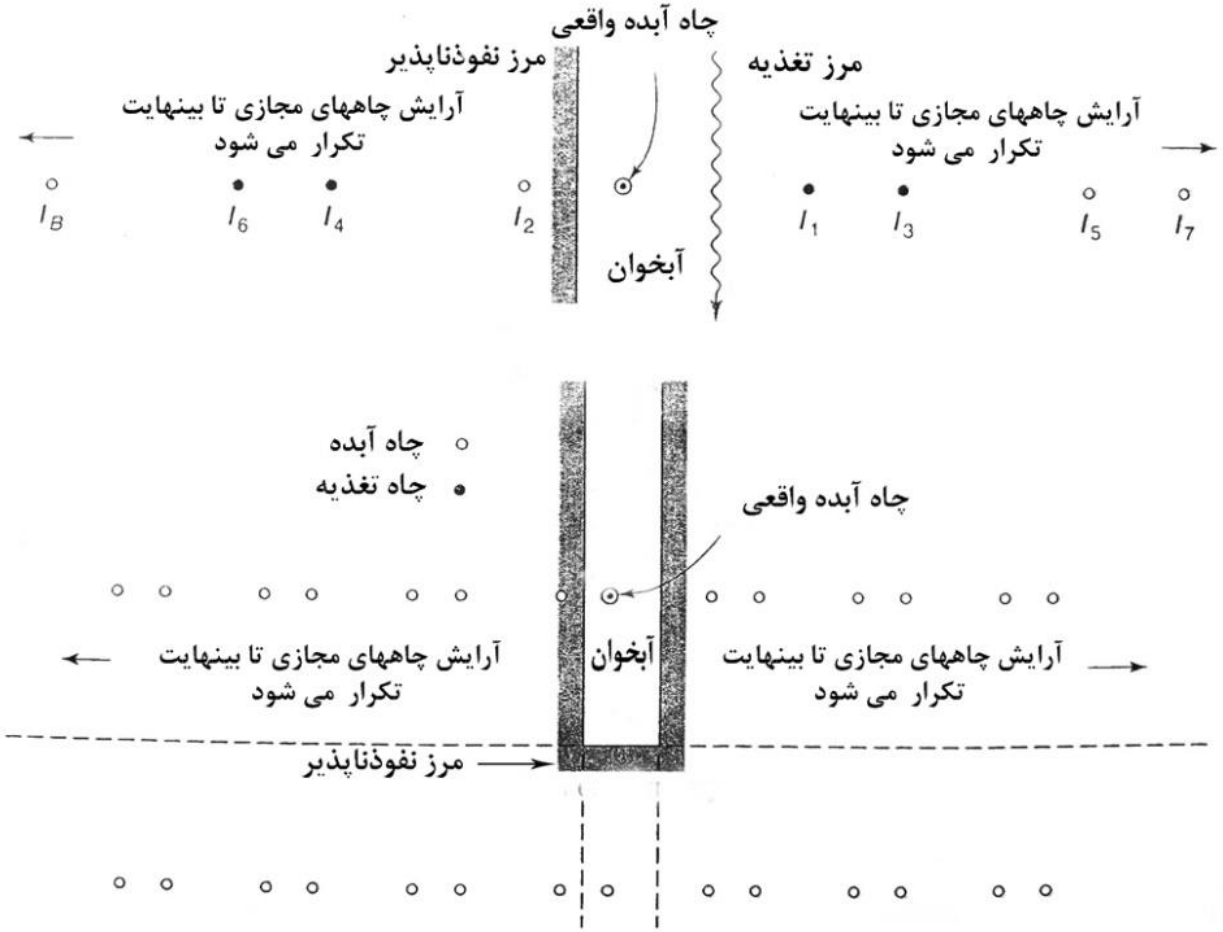
برای **آبخوانی گوه‌ای** شکل (Wedge-Shaped)، مانند دره‌ای واقع بین دو مرز نفوذناپذیر، افت بار هیدرولیکی در هر نقطه از درون آبخوان را می‌توان با روش مشابه چاه‌های مجازی، محاسبه نمود. مطابق شکل زیر، آبخوان در منطقه‌ای بین دو مرز غیرقابل نفوذ متقاطع که با هم زاویه ۴۵ تشکیل می‌دهند، قرار دارد. ۷ چاه پمپاژ مجازی و یک چاه پمپاژ واقعی بر روی محیط دایره‌ای به مرکز محل تقاطع دو مرز و شعاع فاصله مرکز تا محل استقرار چاه پمپاژ واقعی، قرار دارند. افت در هر نقطه واقع در بین دو مرز از جمع افت‌های هر یک از چاه‌های مجازی و حقیقی بدست می‌آید. بطور کلی می‌توان نشان داد که تعداد چاه‌های مجازی (n) لازم برای دو مرز متقاطع با زاویه θ از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$n = \frac{360^\circ}{\theta} - 1$$

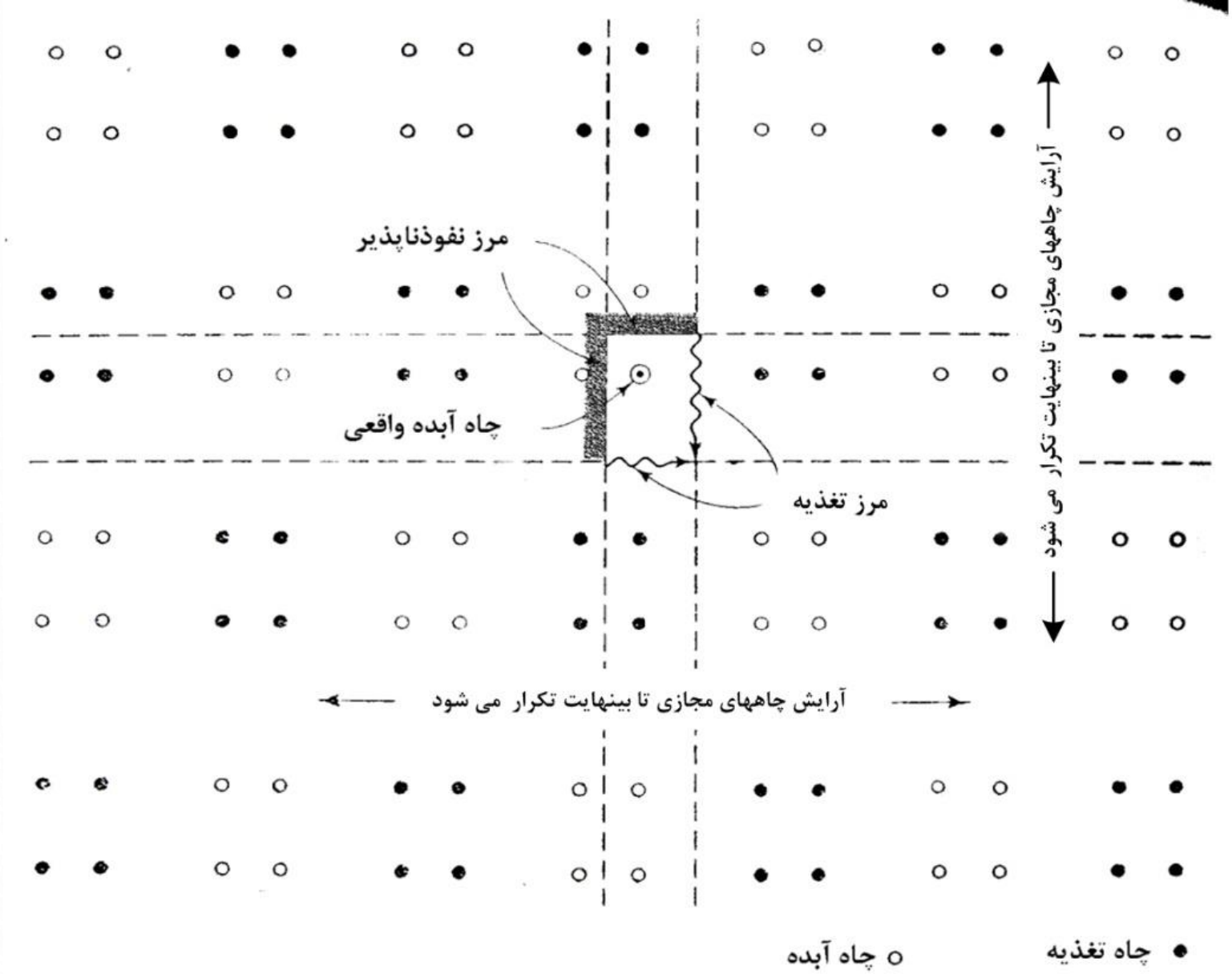
که θ کسری از ۳۶۰ درجه می‌باشد.



در صورتی که دو مرز به صورت موازی با یکدیگر باشند، جهت تحلیل آبخوان با استفاده از نظریه چاه‌های مجازی لازم است تعداد بی‌شماری از این چاه‌ها در نظر گرفته شود. هر یک از این چاه‌های مجازی نسبت به یک مرز، بر مرز دیگر اثر نموده و چاه مجازی دیگری را ایجاد می‌کند. اضافه نمودن جفت چاه‌های مجازی تا جایی ادامه می‌یابد که اثرات اضافه نمودن آن‌ها تأثیری ناچیزی بر مجموع اثراتی که چاه‌های مجازی می‌گذارند، داشته باشد. استفاده از این سیستم به صورت گسترده باعث می‌شود که محاسبات بسیار ساده گردد.



معادلات ارائه شده جهت محاسبه افت، برای آبخوان محصور می‌باشند. برای اینکه این معادلات در آبخوان‌های آزاد (نامحصور) مورد استفاده قرار بگیرد، بایستی s را با $s'' = s - s^2/2h_0$ که h_0 ضخامت اشباع اولیه می‌باشد، جایگزین شود.

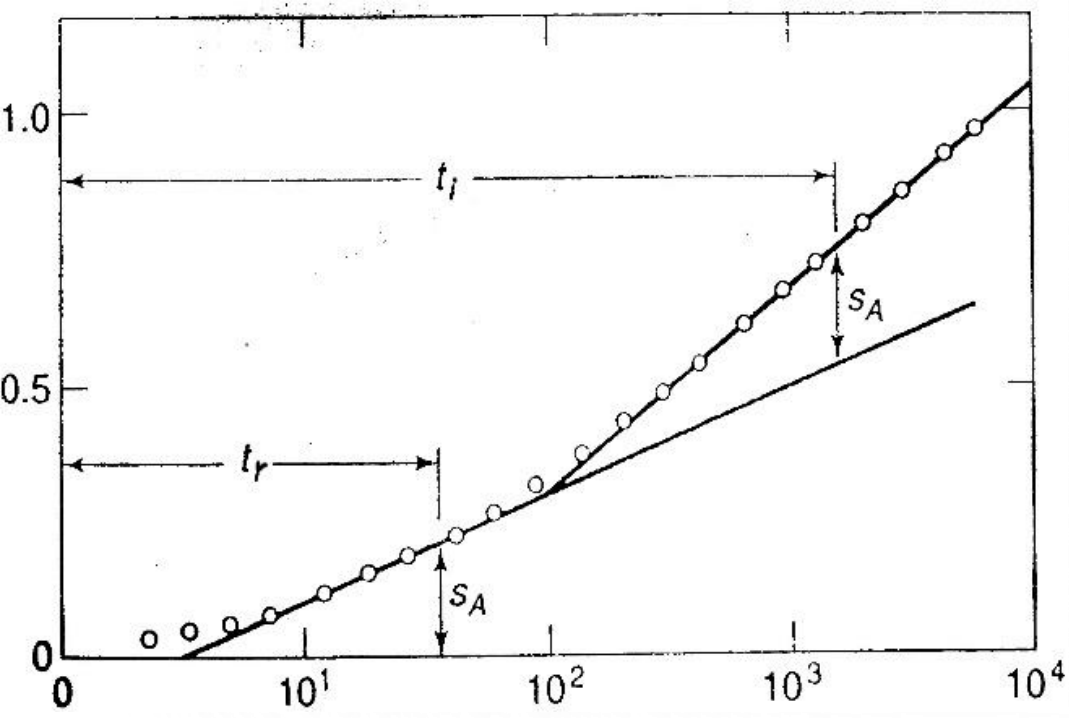


طرح‌های مرتبط با سیستم‌های چاه مجازی برای آبخوان مستطیلی

نحوه تعیین موقعیت مرزهای آبخوان

مرزهای نفوذپذیر آبخوان از قبیل رودخانه‌ها طبیعتاً نزدیک چاه پمپاژ قابل مشاهده می‌باشند. در حالی که **مرزهای زیرسطحی نفوذناپذیر** از قبیل گسل‌ها یا دایک‌ها امکان مشاهده آن‌ها وجود ندارد. در مواقعی که به این مرزها برخورد می‌شود، موقعیت و جهت این قبیل مرزها را می‌توان توسط آنالیز داده‌های آزمایش پمپاژ مشخص نمود.

در روش کوپر- ژاکوپ (مطابق رابطه $s = \frac{2.303Q}{4\pi T} log \frac{2.25Tt}{r^2 S}$) شیب خط راست روی کاغذ نیمه لگاریتمی تنها به نرخ پمپاژ و ضریب قابلیت آبخوان بستگی دارد. در صورت وجود یک مرز نفوذناپذیر، نرخ افت در یک چاه مشاهده‌ای تحت تأثیر چاه پمپاژ مجازی تصویر شده دو برابر خواهد شد.



جهت تعیین موقعیت چاه مجازی مراحل زیر صورت می گیرد:

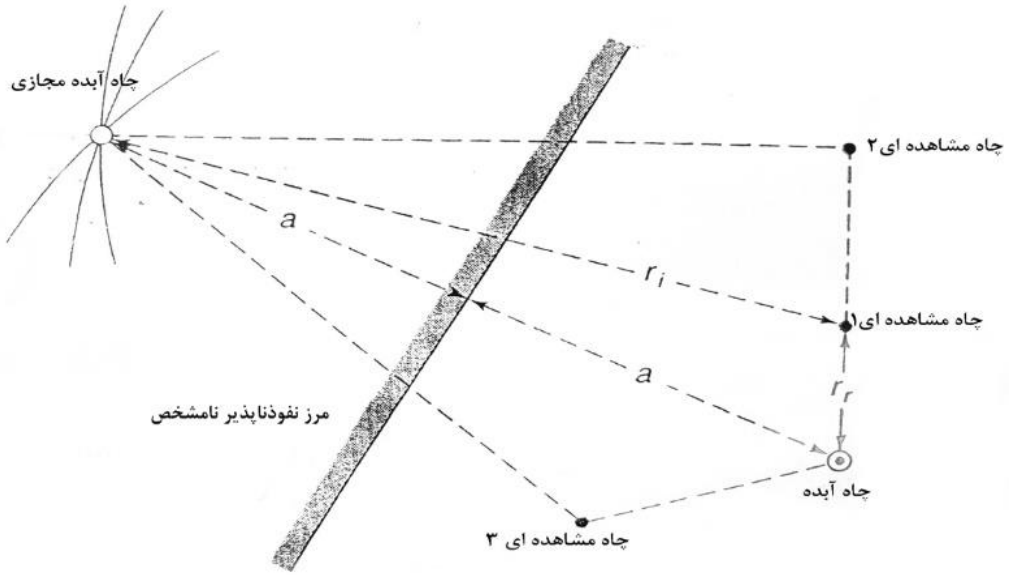
۱- خطوط راست از میان دو مجموعه داده برازش داده می‌شود.

۲- برای یک نقطه دلخواه بر روی منحنی مرتبط با افت چاه واقعی، میزان افت s_A و زمان t_r اندازه‌گیری می‌شود.

۳- به طور مشابه، زمان t_i لازم برای ایجاد این میزان افت توسط چاه مجازی نیز از روی منحنی مرتبط با افت چاه مجازی تعیین می‌گردد.

۴- سپس، با دانستن فاصله بین چاه واقعی و چاه مشاهده‌ای، r_r می‌توان فاصله تا چاه مجازی، r_i، (شکل زیر) را با استفاده از قانون زمان‌ها مشخص نمود (معادله $r_i = r_r\sqrt{\frac{t_i}{t_r}}$). این فاصله، r_i، بصورت شعاعی از یک دایره که چاه مجازی بر روی آن قرار دارد، تعریف می‌شود. این امر به اندازه‌گیری دو یا چند چاه مشاهده‌ای جهت تعیین مقدار منحصر بفرد موقعیت چاه مجازی که از تقاطع سه کمان حاصل می‌شود، نیاز دارد.

۵- بر این اساس مرز در میانه خط عمود بر خطی که چاه‌های واقعی و مجازی را به هم متصل می‌نماید قرار می‌گیرد. بایستی توجه شود که اگر مرز آبخوان یک رودخانه تغذیه‌کننده باشد، یک چاه مجازی تغذیه‌ای باید در نظر گرفته شود. در این حالت خطی با شیب برابر اما در خلاف جهت منحنی افت ایجاد می‌شود که نتیجه آن یک خط مجانب افقی است.



سامانه‌های چند چاهی (Multiple Well Systems)

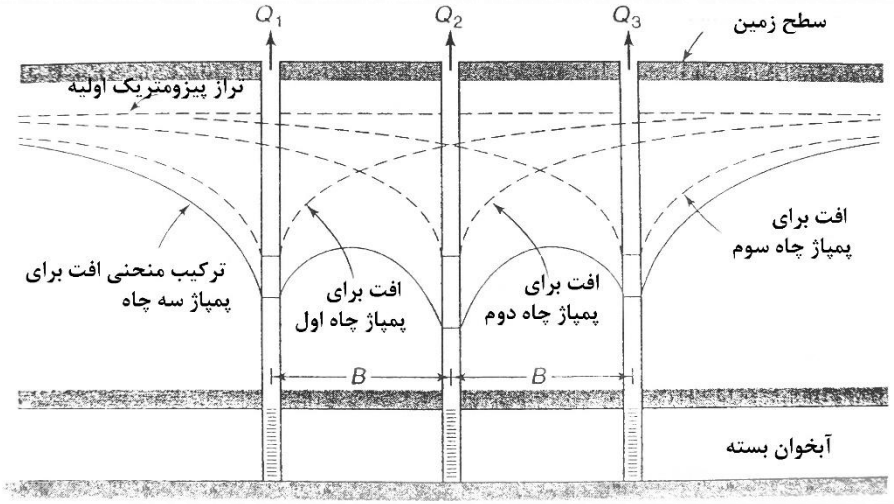
زمانی که مخروط افت ناشی از پمپاژ دو چاه با یکدیگر تداخل پیدا کنند، به دلیل افزایش افت و همچنین افزایش میزان پمپاژ، گفته می‌شود که یک چاه به چاه دیگر تداخل (Interfere) کرده است. برای یک گروه چاه که تشکیل‌دهنده حوضه چاه (Well Field) می‌باشند، با مشخص بودن میزان تخلیه‌ها می‌توان میزان افت را می‌توان در هر نقطه تعیین نمود و یا بالعکس.

بر اساس اصل برهم‌نهی، میزان افت در هر نقطه از منطقه که تحت تأثیر پمپاژ چندین چاه می باشد برابر است با مجموع افت ناشی از هر چاه پمپاژ. بنابراین:

$$s_T = s_1 + s_2 + s_3 + \dots\dots\dots + s_n$$

s_T: افت کل در یک نقطه مشخص

$s_1, s_2, s_3, \dots\dots, s_n$: افت‌های ناشی از پمپاژ از چاه‌های $1,2,3,\dots\dots,n$ در همان نقطه

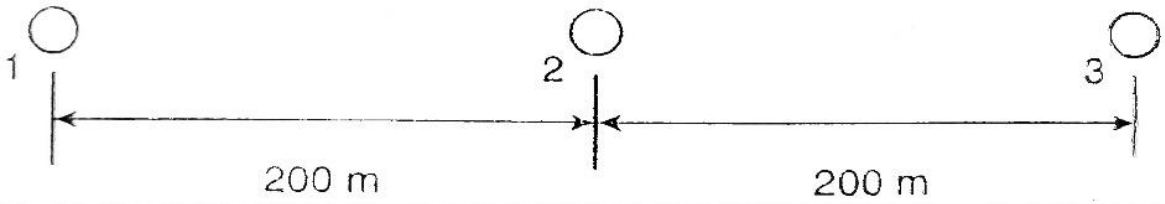


مجموع افت‌ها را می‌توان به طور ساده و با استفاده از روش خط چاه ارائه شده در شکل مقابل نشان داد. منحنی‌های افت مجزا و مجموع افت‌ها برای $Q_1 = Q_2 = Q_3$ مشخص می‌باشد. بطور مشخص، تعداد چاه‌ها و هندسه حوضه چاه در تعیین افت‌ها مهم می‌باشد. این گونه مسائل را می‌توان بر اساس معادله تعادلی یا غیرتعادلی حل نمود.

نکته ۱: چاه‌های یک حوضه چاه که برای تأمین آب طراحی شده‌اند بایستی تا حد ممکن آنقدر دور از هم قرار داده شوند تا منطقه تأثیرشان حداقل تأثیر بر چاه‌های دیگر داشته باشد. به عبارت دیگر، فاکتورهای اقتصادی از قبیل هزینه زمین یا خطوط انتقال ممکن است باعث تداخل چاه‌ها شود.

نکته ۲: برای چاه‌های زهکشی که ارتفاع سطح آب را کنترل می‌کنند، کاهش فاصله چاه و در نتیجه ایجاد پدیده تداخل جهت زهکشی بیشتر، مورد قبول می‌باشد.

مثال) سه چاه پمپاژی در یک امتداد و به فاصله 200m از یکدیگر قرار گرفته‌اند. در شرایط پایدار میزان پمپاژ از هر چاه باید چه میزان باشد تا افت تقریباً پایدار در هر چاه از 2m تجاوز نکند؟ ضریب قابلیت انتقال آبخوان محصور که چاه‌ها بطور کامل در آن نفوذ کرده‌اند، $2400\text{m}^2/\text{day}$ و قطر تمام چاه‌ها 40cm می‌باشد. ضخامت آبخوان 40m و شعاع تأثیر هر چاه 800m می‌باشد.

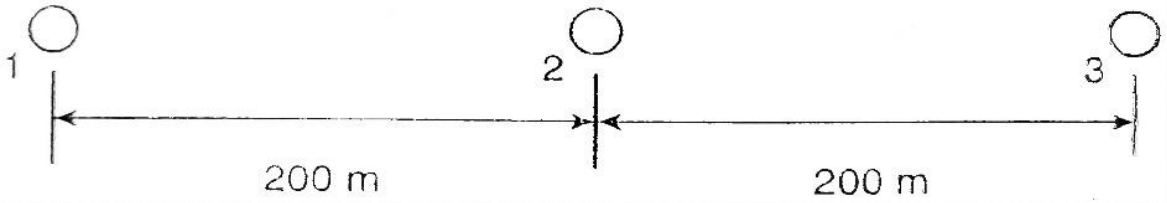


حل) اطلاعات داده شده این مسأله بصورت زیر می‌باشد:

$$s_1, s_2, s_3 \leq 2 \quad , \qquad T = 2400\frac{m^2}{day} = 27.8 \times \frac{10^{-3}m^2}{s} \; , r_w = 0.2m, b = 40m, r_0 = 800m$$

Q: نرخ پمپاژ هر چاه

h_0: بار آبی قبل از شروع پمپاژ



برای چاه $1 \rightarrow s_1 = s_{11} + s_{12} + s_{13}$ و s_{ij}: افت در چاه i ناشی از پمپاژ چاه j می‌باشد.

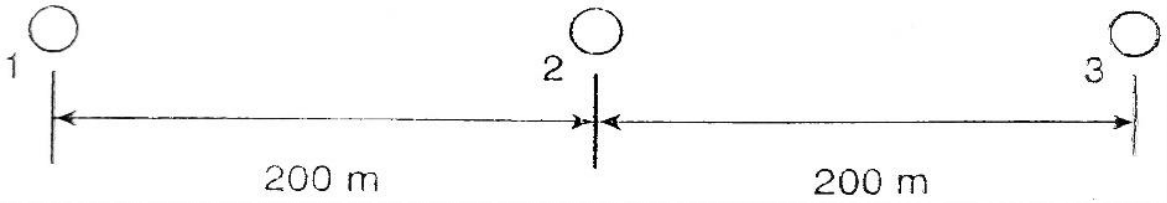
بنابراین برای دیگر چاه‌ها، $s_2 = s_{21} + s_{22} + s_{23}$ و $s_3 = s_{31} + s_{32} + s_{33}$.

با خلاصه نمودن روابط خواهیم داشت: $s_1 = s_3$. افت در چاه ۱ ناشی از پمپاژ چاه‌های ۱، ۲ و ۳ بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\left.\begin{aligned} s_{11} &= \frac{Q\,ln\frac{r_0}{r_w}}{2\pi T} = \frac{Q\,ln\frac{800}{0.2}}{2\pi(27.8\times10^{-3})} = 47.48Q \\ s_{12} &= \frac{Q\,ln\frac{r_0}{r_{12}}}{2\pi T} = \frac{Q\,ln\frac{800}{200}}{2\pi(27.8\times10^{-3})} = 7.94Q \\ s_{13} &= \frac{Q\,ln\frac{r_0}{r_{13}}}{2\pi T} = \frac{Q\,ln\frac{800}{400}}{2\pi(27.8\times10^{-3})} = 3.97Q \end{aligned}\right\} \Rightarrow s_1 = s_3 = 47.48Q + 7.94Q + 3.97Q = 59.39Q$$

افت در چاه‌های ۱ و ۳ مشخص می‌باشند. بنابراین کل افت در چاه‌ها برابر است با:

$$s_1 = s_3 = 47.48Q + 7.94Q + 3.97Q = 59.39Q$$



افت‌های چاه شماره ۲ ناشی از چاه‌های ۱، ۲ و ۳ عبارتند از:

$$s_{21} = \frac{Q\,ln\left(\frac{r_0}{r_{12}}\right)}{2\pi T} = \frac{Q\,ln\left(\frac{800}{200}\right)}{2\pi(27.8\times10^{-3})} = 7.94Q$$

$$s_{22} = s_{11} = 47.48Q$$

$$s_{23} = s_{21} = 7.94Q$$

$$\Rightarrow s_2 = 7.94Q + 47.48Q + 7.94Q = 63.36Q$$

افت کل در چاه ۲ برابر است با:

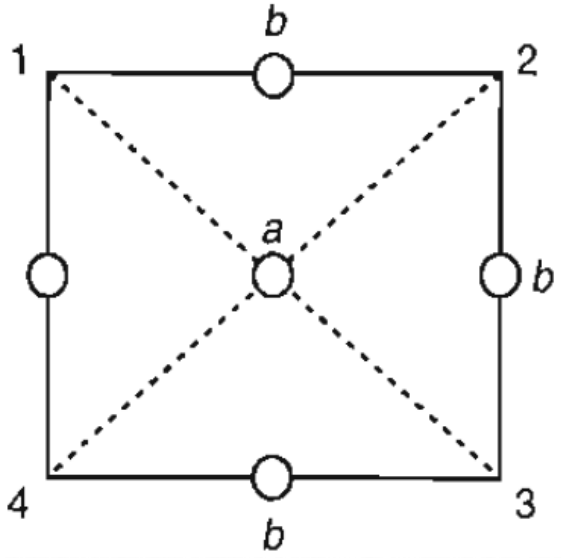
$$s_2 = 7.94Q + 47.48Q + 7.947Q = 63.36Q$$

رابطه بین $s_1 = 59.39Q$ و $s_2 = 63.36Q$ نشان می‌دهد که چنانچه میزان تخلیه از تمام چاه‌ها یکسان باشد، بیشترین افت در چاه میانی رخ می‌دهد. بنابراین، افت غالب در این چاه حاکم می‌باشد.

با استفاده از رابطه $s_2 \le 2$ یا $63.36Q \le 2$، نرخ پمپاژ پایدار در هر چاه بایستی به میزان:

$Q \le 3.16\times10^{-2}\,\frac{m^3}{s} = 113\,m^3/hr$ باشد.

مثال) در یک قطعه زمینی به ابعاد $80 \times 80m$ که برای ساخت یک ساختمان در نظر گرفته شده است، سطح آب زیرزمینی باید پایین برده شود. کف ساختمان باید $1.5m$ پایین‌تر از سطح اولیه آب زیرزمینی قرار گیرد. ارتفاع اولیه سطح آب زیرزمینی $90m$ است. قرار است از ۴ پمپ بر روی چهار چاه با قطر $0.5m$، واقع در چهار گوشه محل برای تخلیه آب زیرزمینی استفاده گردد. ضریب قابلیت انتقال و ضریب ذخیره آبخوان محل به ترتیب برابر با $1{,}600m^2/day$ و 0.16 می‌باشد. جهت آماده نمودن محل ساختمان در پایان مدت یکماه، نرخ پمپاژ آب از هر چاه را تعیین نمائید.



حل) برای حل این مشکل، حداقل افت سطح آب زیرزمینی در منطقه باید بیشتر از 1.5m باشد. می‌توان نشان داد که نقاط بالقوه مهم که لازم است دارای حداقل افت باشند، مرکز محل (نقطه a) و نقاط وسط هر ضلع از منطقه (نقطه b) می‌باشند. از رابطه تقریبی کوپر- ژاکوب جهت محاسبه افت سطح آب زیرزمینی می‌توان استفاده نمود.

در نقطه a (مرکز مربع)، $\mathrm{r} = \sqrt{40^2 + 40^2} = 56.6\mathrm{m}$ و

$$\mathrm{u} = \frac{\mathrm{r}^2\mathrm{S}}{4\mathrm{Tt}} = \frac{(56.6\mathrm{m})^2(0.16)}{4(1600\mathrm{m}^2/\mathrm{day})(30\mathrm{days})} = 0.00267$$

با توجه به اینکه $u < 0.01$ می‌باشد، لذا می‌توان از روش کوپر- ژاکوب استفاده نمود:

$$s_a = \frac{Q}{4\pi T}(-0.5772 - ln(u)) = \frac{Q}{4\pi(1600m^2/day)}(-0.5772 - ln(0.00267)) = 0.0002661Q$$

با استفاده از اصل برهم‌نهی و به علت تقارن، افت ناشی از چاه چهار برابر است با:

$s_T = 4 \times s_a = 4 \times 0.0002661Q = 0.0010643Q$ و

$s_T = 0.0010643Q = 1.5m \rightarrow Q = 1409m^3/day$

در هر یک از چهار نقطه نشان داده شده با b، برای دو چاه، $r_1 = 40m$ و. برای دو چاه باقی‌مانده $r_2 = \sqrt{80^2 + 40^2}$ $= 89.44m$ می‌باشد. بنابراین

$$u_1 = \frac{r^2 S}{4Tt} = \frac{(40m)^2(0.16)}{4(1600m^2/day)(30days)} = 0.0013333$$

$$u_2 = \frac{r^2 S}{4Tt} = \frac{(89.44m)^2(0.16)}{4(1600m^2/day)(30days)} = 0.006666$$

با توجه به اینکه $u_1 < 0.01$ و $u_2 < 0.01$ می‌باشد، بنابراین می‌توان از رابطه کوپر- ژاکوب استفاده نمود:

$$s_b = 2\left[\frac{Q}{4\pi T}(-0.5772 - ln(u_1))\right] + 2\left[\frac{Q}{4\pi T}(-0.5772 - ln(u_2))\right]$$

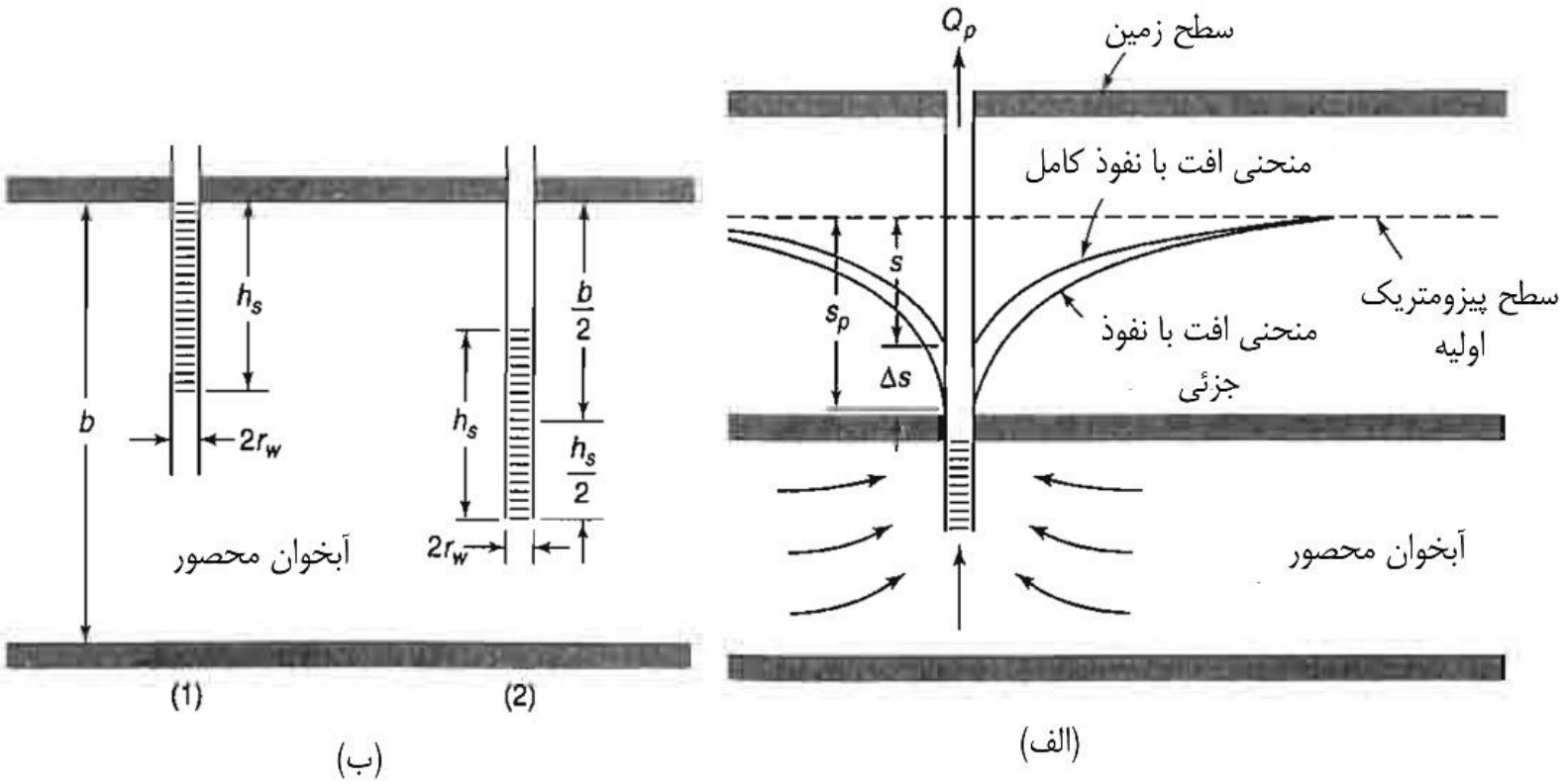
$$= 2\left[\frac{Q}{4(1600m^2/day)}(-0.5772 - ln(0.0013333))\right] + 2\left[\frac{Q}{4(1600m^2/day)}(-0.5772 - ln(0.006666))\right]$$

$$= 2 \times 0.0003Q + 2 \times 0.0002202Q = 1.041 \times 10^{-3}Q = 1.5m \rightarrow Q = 1441m^3/day$$

بنابراین نقاطی که با b نشان داده شده‌اند، نقاط بحرانی بوده و برای هر چاه دبی $1{,}441m^3/day$ مورد نیاز می‌باشد.

چاه‌های با نفوذ نسبی یا ناقص در آبخوان (Partially Penetrating Wells)

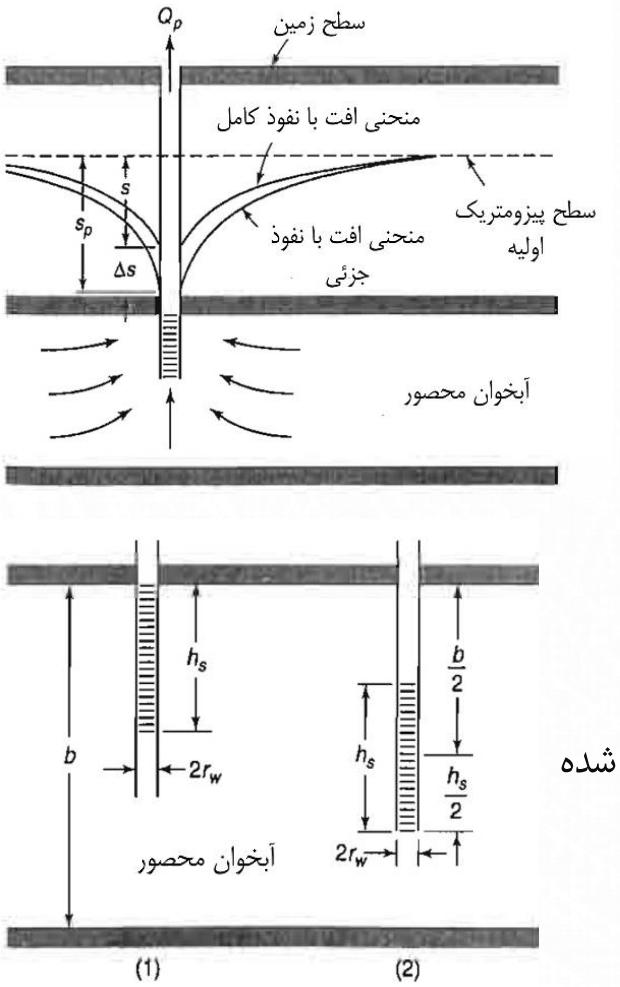
چاهی که طول بخش آبده آن کمتر از ضخامت آبخوانی است که در آن نفوذ کرده به چاه با نفوذ نسبی یا ناقص در آبخوان معروف می‌باشند. شکل زیر موقعیت یک چاه با نفوذ نسبی در یک آبخوان محصور را نشان می‌دهد. الگوی جریان این قبیل چاه‌ها با جریان شعاعی افقی که اطراف یک چاه با نفوذ کامل فرض می‌شود، متفاوت است. متوسط طول خط جریان به چاه با نفوذ نسبی بیشتر از طول خط جریان یک چاه با نفوذ کامل می‌باشد. بنابراین مقاومت بیشتری در مقابل جریان وجود دارد.



چاه‌هایی با نفوذ نسبی در یک آبخوان محصور الف) تأثیر چاه با نفوذ نسبی روی افت ب) دو ترکیب از چاه‌های با نفوذ نسبی

برای اهداف عملی، این نتایج در روابط بین دو چاه مشابه، یکی با نفوذ نسبی و یکی با نفوذ کامل در آبخوان مشابه به این صورت می‌باشد:

اگر $Q_p = Q$ بنابراین $s_p > s$ و اگر $s_p = s$ بنابراین $Q_p < Q$ می‌باشد. Q تخلیه چاه و s افت در چاه و اندیس p نشان‌دهنده چاه با نفوذ نسبی می‌باشد. تأثیر نفوذ نسبی بر روی الگوی جریان و افت، در فاصله شعاعی بیشتر از ۰/۵ تا ۲ برابر ضخامت اشباع (b)، ناچیز بوده و به مقدار نفوذ چاه در آبخوان بستگی دارد.



افت s_p در چاه با نفوذ نسبی در یک آبخوان محصور را می‌توان بصورت زیر ارائه کرد:

$$s_p = s + \Delta s$$

که Δs افت اضافی ناشی از تأثیر نفوذ نسبی می‌باشد. این میزان افت اضافی برای شرایط پایدار و حالت‌های مشابه شکل زیر به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\Delta s = \frac{Q_p}{2\pi T}\frac{1-p}{p} ln \frac{(1-p)h_s}{r_w}$$

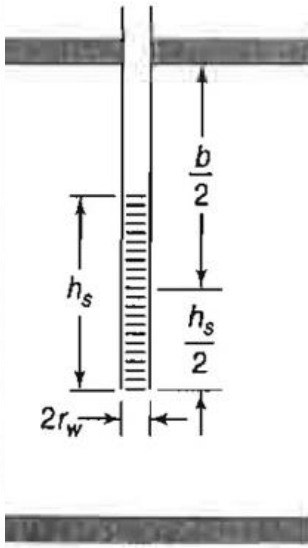
T: ضریب قابلیت انتقال

p: بخش نفوذ از ضخامت آبخوان $(p = h_s/b)$ و h_s، طول بخش مشبک (Screen) شده است.

رابطه فوق برای شرایطی قابل کاربرد است که $p > 0.20$ باشد.

در مواردی که توری چاه در وسط ضخامت آبخوان قرار داشته باشد، میزان Δs از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Delta s = \frac{Q_p}{2\pi T}\frac{1-p}{p} ln \frac{(1-p)h_s}{2r_w}$$



معادله $\Delta s = \frac{Q_p}{2\pi T}\frac{1-p}{p} ln \frac{(1-p)h_s}{r_w}$ را می‌توان برای یک آبخوان آزاد به صورت زیر تغییر داد:

$$\Delta s2h_w = \frac{Q_p}{\pi K}\frac{1-p}{p} ln \frac{(1-p)h_s}{r_w}$$

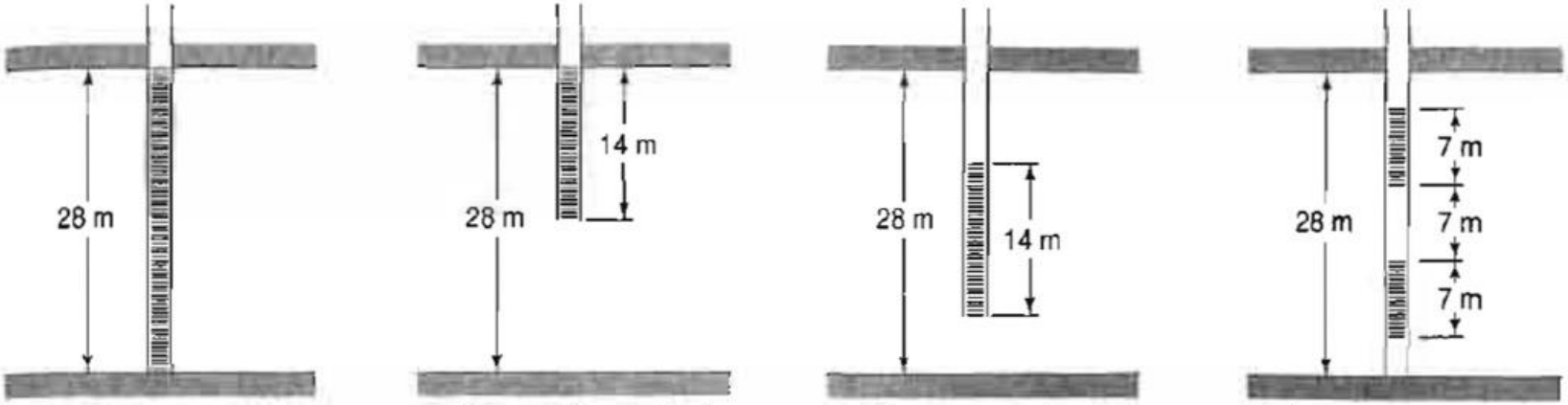
در این رابطه h_w ضخامت اشباع در چاه با نفوذ کامل و هدایت هیدرولیکی $K = T/h_w$ می‌باشد. بنابراین:

$$s_p^2 = s^2 + \Delta s2h_w$$

تعریف چاه با نفوذ کامل: لازم به ذکر است هر چاه با بازشدگی ۸۵ درصد یا بیشتر در لوله جدار (توری چاه) واقع در ضخامت اشباع می‌تواند چاه با نفوذ کامل در نظر گرفته شود.

نکته: هنگامی که یک چاه مشاهده‌ای در فاصله ۱/۵ تا ۲ برابر ضخامت اشباع آبخوان از چاه پمپاژ قرار گرفته باشد، در این حالت تأثیر نفوذ نسبی برای آبخوان‌های همگن و همسان ناچیز می‌باشد. این حالت را می‌توان برای بسیاری از آبخوان‌های آبرفتی با ناهمسانی معلوم اعمال نمود. در این حالت مؤلفه‌های قائم جریان کوچک می‌باشد، بنابراین یک چاه پمپاژ تقریباً نقش یک چاه با نفوذ کامل در یک آبخوان محصور یا نشتی با ضخامت اشباع برابر با طول توری چاه، را ایفا می‌نماید.

مثال) مطابق شکل زیر، چهار چاه با قطر ۱ متر به صورت کامل/نسبی در یک آبخوان محصور با ضخامت ۲۸ متر حفاری شده است. کارآیی نسبی هر یک از این چاه‌ها را بر اساس ارزیابی ظرفیت ویژه (Q/s)آن‌ها تفسیر نمائید. شعاع تأثیر در تمام چاه‌ها ۱۵۰ متر در نظر گرفته شود. نرخ پمپاژ و قابلیت انتقال در تمام چاه‌ها یکسان است.



الف) چاه با نفوذ کامل

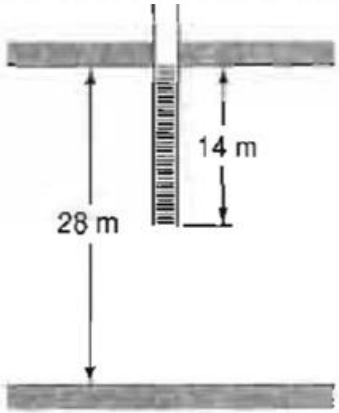
ب) چاه که تا ۱۴ متر بالای آبخوان محصور نفوذ کرده است

ج) ۱۴ متر چاه که در آبخوان محصور نفوذ کرده است دارای اسکرین می باشد

د) چاه که ۱۴ متر در آبخوان محصور نفوذ کرده دارای ۲ اسکرین ۷ متری می باشد

حل) چاه الف) افت را در این حالت که چاه بطور کامل در آبخوان نفوذ کرده است می‌توان با مرتب نمودن معادله Thiem $(Q = 2\pi Kb\frac{h-h_w}{ln(r/r_w)})$ بدست آورد:

$$s_a = \frac{Q}{2\pi T}\left(\ln\left(\frac{R}{r_w}\right)\right) \Rightarrow \frac{Q}{2\pi T}\left(\ln\left(\frac{150}{0.5}\right)\right) = 0.9078\left(\frac{Q}{T}\right)$$



ب) چاه که تا ۱۴ متر بالای آبخوان محصور نفوذ کرده است

چاه ب) میزان افت اضافی را می‌توان با مرتب نمودن رابطه $\Delta s = \frac{Q_p}{2\pi T}\frac{1-p}{p} ln \frac{(1-p)h_s}{r_w}$ بدست آورد:

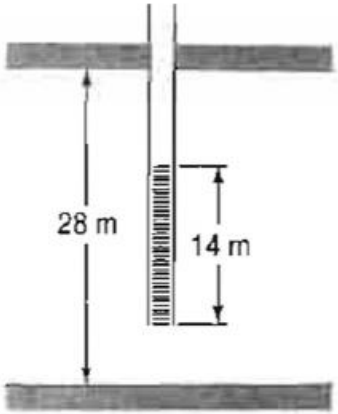
$$\Delta s = \left[\frac{Q_p}{2\pi T}\right]\left[\frac{1-p}{p}\right]\left[ln\frac{(1-p)h_s}{r_w}\right]$$

$$= \left[\frac{Q}{2\pi T}\right]\left[\frac{1-0.5}{0.5}\right]\left[ln\frac{(1-0.5)(14)}{(0.5)}\right] = 0.42\left(\frac{Q}{T}\right)$$

بنابراین جمع کل افت برابر است با $s_b = (0.9078 + 0.42)(Q/T) = 1.3278(Q/T)$.

چاه ج) میزان افت اضافی در این حالت که چاه در مرکز ضخامت اشباع آبخوان قرار دارد توسط رابطه

$\Delta s = \frac{Q_p}{2\pi T}\frac{1-p}{p} ln \frac{(1-p)h_s}{2r_w}$ ارائه می‌شود:

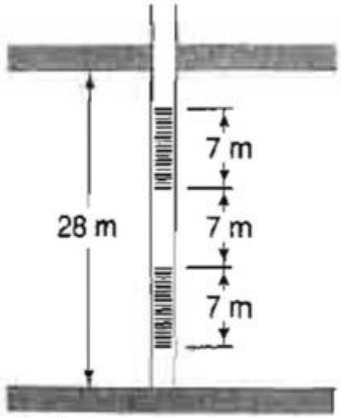


ج) ۱۴ متر چاه که در آبخوان محصور نفوذ کرده است دارای اسکرین می باشد

$$\Delta s = \left[\frac{Q_p}{2\pi T}\right]\left[\frac{1-p}{p}\right]\left[ln\frac{(1-p)h_s}{2r_w}\right]$$

$$= \left[\frac{Q}{2\pi T}\right]\left[\frac{1-0.5}{0.5}\right]\left[ln\frac{(1-0.5)(14)}{2(0.5)}\right] = 0.3097\left(\frac{Q}{T}\right)$$

بنابراین جمع کل افت $s_c = (0.9078 + 0.3097)(Q/T) = 1.2175(Q/T)$



د) چاه که ۱۴ متر در آبخوان محصور نفوذ کرده دارای ۲ اسکرین ۷ متری می باشد

چاه د) این حالت معادل است با چاهی با طول توری چاه ۷ متر که در مرکز آبخوانی با ضخامت ۱۴ متر قرار گرفته است. با استفاده مجدد از رابطه $\Delta s = \frac{Q_p}{2\pi T}\frac{1-p}{p} ln \frac{(1-p)h_s}{2r_w}$ خواهیم داشت:

$$\Delta s = \left[\frac{Q}{2\pi T}\right]\left[\frac{1-p}{p}\right]\left[ln\frac{(1-p)h_s}{2r_w}\right] = \left[\frac{Q}{2\pi T}\right]\left[\frac{1-0.5}{0.5}\right]\left[ln\frac{(1-0.5)(7)}{2(0.5)}\right]$$

$$= 0.1994\left(\frac{Q}{T}\right)$$

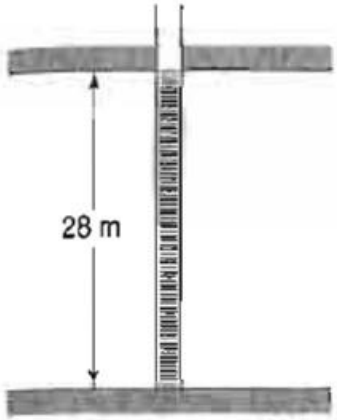
بنابراین جمع کل افت برابر $s_d = (0.9078 + 0.1994)(Q/T) = 1.1072(Q/T)$ می‌باشد. ظرفیت ویژه هر یک از چاه‌ها (Q/s)عبارت است از:

$$Q/s_a = 1.1016(T)$$

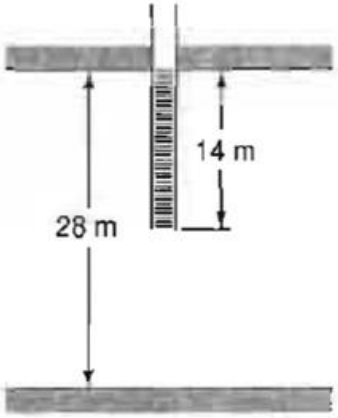
$$Q/s_b = 0.7531(T)$$

$$Q/s_c = 0.8214(T)$$

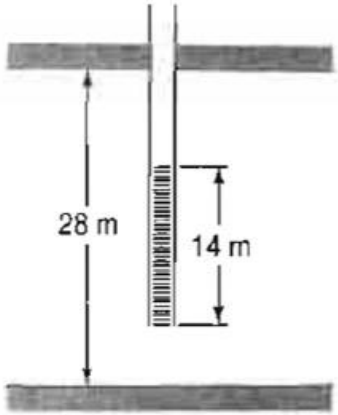
$$Q/s_d = 0.9032(T)$$



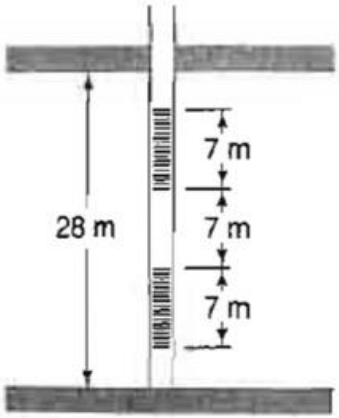
الف) چاه با نفوذ کامل



ب) چاه که تا ۱۴ متر بالای آبخوان محصور نفوذ کرده است



ج) ۱۴ متر چاه که در آبخوان محصور نفوذ کرده است دارای اسکرین می باشد



د) چاه که ۱۴ متر در آبخوان محصور نفوذ کرده دارای ۲ اسکرین ۷ متری می باشد

با توجه به محاسبات انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت که:

- چاه الف) چاه با نفوذ کامل دارای حداکثر پتانسیل ظرفیت ویژه می‌باشد.
- چاه‌های ب)، ج) و د) به ترتیب دارای ظرفیت ویژه حداکثر ۷۵ درصد، ۸۲ درصد و ۹۰ درصد می‌باشند.
- بنابراین از میان این سه چاه، چاه د مؤثرترین از کارآیی بالایی برخوردار می‌باشد.
- چاه‌هایی که توری چاه آن‌ها در میانه آبخوان قرار دارد از بازدهی بالاتری نسبت به چاه‌هایی با نفوذ نسبی که توری چاه از بالا یا کف آبخوان شروع می‌شود، برخوردار می‌باشند.