

ارزیابی نتایج تحلیل اطلاعات پمپاژ به کمک مدل وارن و روت و مقایسه آن با نتایج روش تیس در سفره‌های آبدار لایه‌ای

احمد طاهر شمسیⁱ؛ فرهاد هوشیاری پورⁱⁱ

چکیده

مخازن درزه و شکافدار، از دیدگاه تحلیلی سیستم‌های بسیار پیچیده، ناهمگن و غیر ایزوتروپ هستند، که به طور معمول با روش وارن و روت ارزیابی می‌شوند. در این مقاله، به منظور آزمودن قابلیت بکارگیری این روش در سفره‌های آبدار متشکل از لایه‌های با تراوایی بسیار متفاوت، داده‌های افت-زمان یک چاه واقع در یک سفره آبدار لایه‌ای، با استفاده از مدل وارن و روت اصلاح شده تحلیل شده است. فرض می‌شود که سفره‌های آبدار در چنین سیستمی شامل دو لایه مختلف باشند، یکی لایه‌ای که نفوذپذیری آن زیاد و ضخامت آن کم است و به عنوان شکاف در نظر گرفته می‌شود و دیگری لایه‌ای که ضخامت زیاد و نفوذپذیری کم دارد. لایه دوم، در این سیستم به عنوان بلوک یا ماتریکس در نظر گرفته می‌شود.

سفره‌های آبداری که داده‌های پمپاژ آنها، در این مقاله تحلیل شده‌اند، به ترتیب در امریکا، کانادا و منطقه خور و بیابانک استان اصفهان واقع شده‌اند. پارامترهای هیدرولیکی این سفره‌ها، با استفاده از اطلاعات پمپاژ چاه‌های حفر شده در آنها به دو روش وارن و روت اصلاح شده و روش تیس، محاسبه شده و در نهایت نتایج بدست آمده از این دو روش با مقادیر واقعی مقایسه گردیده است. مطابق نتایج بدست آمده، برای تحلیل چنین سفره‌هایی استفاده از روش تیس به جواب‌های غیردقیق منجر می‌شود، درحالی که نتایج مدل وارن و روت برای مخازن شکافدار، تقریباً دقیق و برای سفره‌های آبدار لایه‌ای چندان رضایت بخش نیست.

کلمات کلیدی

آزمایش پمپاژ، سفره درزه و شکافدار، سفره آبدار لایه‌ای، تخلخل دوگانه، مدل وارن و روت

Evaluation of the pumping test's results by using Warren & Root model and its comparison with the Theis model in multi layer aquifers

A. Tahershamsi; F. Hoshyari-por

ABSTRACT

Modeling of cracked and fissured aquifers is very complicated, because of anisotropy and being heterogeneous of their porous media. There are some different methods for modeling of water flow through such media that Warren and Root is the most common model in this subject. This paper deals with reliability assessment of this method in layered and fractured aquifers that formed of very different layers with different permeability. In this method, a multilayer aquifer is assumed to consist of two main part: fissure with high permeability and low thickness and matrix or block with low permeability and large thickness.

Three different pumping data set, were analyzed by modified Warren and Root and Theis models separately where located in U.S.A, Canada and Iran (Khour & Biabanak region in Isfahan province) and

ⁱ دانشجویار، عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر: tshamsi@aut.ac.ir

ⁱⁱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر: hooshyari-por@yahoo.com

result have been compared with field data. Consequently, comparisons showed that Theis Method for such aquifers lead to imprecise results, however, results of modified Warren and Root method for fractured reservoirs are relatively accurate but their results for multilayer aquifers aren't satisfactory.

KEYWORDS

Pumping test, fractured aquifer, multilayer aquifer, double porosity, Warren & Root model

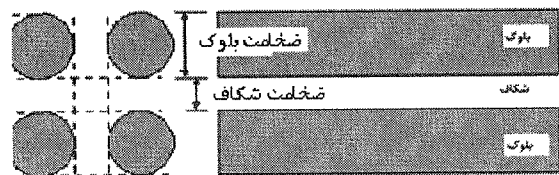
سفره‌های شکافدار اغلب به صورت محیطی رفتار می‌کنند که از تفاسیر کلاسیک (مثلا روش تیس) تبعیت نمی‌کند (Bernard, et al., 2006). برای حل مسائل آزمایش پمپاژ، از این نظر که چه نوع جریانی از بلوک به سمت شکاف فرض شود، دو روش کلی ارائه شده است. در یک روش فرض بر این است که جریان از بلوک به سمت شکاف، تحت شرایط ماندگار ایجاد می‌شود (Warren and Root, 1963) و در روش دیگر فرض بر این است که جریان تحت شرایط غیر ماندگار رخ می‌دهد (Kazemi, 1969). فرض حالت ماندگار جریان از بلوک به طرف شکاف یک ساده‌سازی است که هرچند در آن از برخی فیزیک پدیده مثل حرکت در نتیجه شیب هیدرولیکی، چشم پوشی می‌شود، در عین حال مزایای بیشتری از فرض جریان گذرا دارد، جالب است که بدانیم، داده‌هایی از آزمایش پمپاژ موجود است که با هر دو روش مطابقت دارند (Moench, 1984). سامانیگو مدل ریاضی وارن و روت را توسعه دادند. آنها در مدل وارن و روت تاثیر ذخیره چاه و سرعت بالای جریان در نزدیکی چاه را وارد کردند (Samaniego and Villalobos, 2003).

لی و همکاران، یک مدل ماسه سنگی شکافدار ساختند و در مدل تئوری خود، تغییر شکل‌های سیال و محیط جریان را بر پایه تئوری الاستیسیته لحاظ کردند و بر این اساس، تغییر ارتفاع دهانه شکاف را نیز مدل کردند. در نهایت، ایشان نتیجه گرفتند که تاثیر متقابل سیال و محیط در مخازن نفتی، می‌بایست به صورت همزمان در معادلات در نظر گرفته شود (Liu, J. et al. 2004).

در این مقاله، علاوه بر تحلیل دو سفره آبدار شکافدار، با توجه به مفهوم تخلخل دوگانه در سازندهای شکست‌دار، تلاش شده است تا نتایج به دست آمده از آزمایش پمپاژ در آبخوانی که با میان‌لایه‌های بسیار تراوا می‌تواند به تعبیری همان مفهوم تخلخل دوگانه را تداعی کند، نیز تحلیل شود. از آنجا که روش تحلیل آزمایش‌های پمپاژ در محیط‌های متخلخل دانه‌ای غیر درزه معمولاً با روش‌های تیم (Thiem, 1906)، تیس (Theis, 1935) و ژاکوب (Jacob, 1950) انجام می‌شود، لذا در این پژوهش با کمک داده‌های صحرایی واقعی مقایسه‌ای بین نتایج قابل استحصال از روش تیس و روش وارن و روت، صورت می‌گیرد، تا نشان داده شود که قابلیت جایگزینی این روش‌ها با

۱- مقدمه

پیچیدگی‌های تحلیل جریان در محیط‌های متخلخل از دیرباز موجب شده است تا با پذیرش فرض‌های ساده کننده، تعیین برخی پارامترهای هیدرودینامیکی آنها امکان‌پذیر باشد. از متداول‌ترین فرض‌هایی که اغلب تئورسین‌ها به کار گرفته‌اند، همگنی، ایزوتروپ بودن، گسترش محیط تا بی‌نهایت در پلان، معتبر بودن قانون داری و برقراری جریان ماندگار است. از طرفی در برخی محیط‌های متخلخل سخت، علاوه بر تخلخل توده اصلی مصالح به علت وجود شبکه‌هایی از درزه و شکاف (شکل ۱)، شرایط با فرضیات ساده کننده فوق سازگاری ندارد و لذا برای حل مشکل تحلیلی ناگزیر از مفهوم تخلخل دوگانه^۲، که بارنبلات (Barenblatt et al., 1960) ارائه کرده است، استفاده می‌کنند. فرض می‌شود که جریان سیال به سمت چاه تنها از طریق شکاف‌ها و نه از طریق توده سنگی صورت می‌گیرد. با این فرض، می‌توان ثابت کرد که دبی عبوری از شکاف با توان سوم ارتفاع دهانه شکاف متناسب است (Witherspoon et al., 1980).



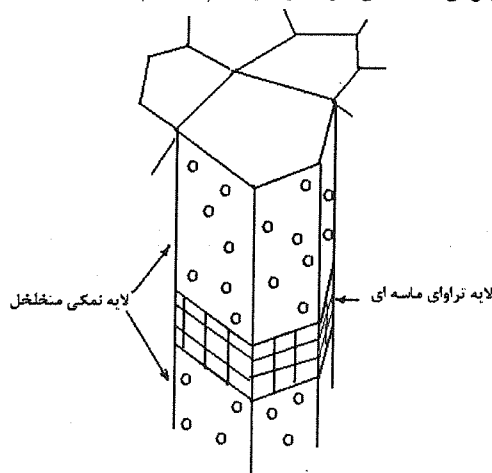
شکل (۱): نمایش هندسه تخلخل دوگانه در سفره‌های آبدار شکافدار

به دلیل این‌که شکاف‌ها اغلب خصوصیتی از قبیل جهت، زبری، ضخامت دهانه شکاف و فضا و اندازه شکاف دارند، ممکن است در مطالعات کمی، از نظر اهمیت خصوصیات محیط متخلخل، هدایت هیدرولیکی؛ که مهم‌ترین پارامتر هیدرودینامیکی آن است، به عنوان دومین پارامتر در مقایسه با کمیت‌های اسکالر مذکور در نظر گرفته شود. برای مثال، سن فرض کرد که شکاف‌ها، ضخامت دهانه و زبری‌های مختلف دارند و در فرمولبندی‌های خود به روش حجمی، این دو متغیر را به عنوان پارامترهای مورد محاسبه در نظر گرفت (Zekai Sen, 1989).

³. Double porosity

یکدیگر تا چه حدی هستند. برای بکارگیری روش وارن و روت در اینگونه سفره ها باید پارامتر α را؛ که به هندسه توده سنگی وابسته است تعریف و مقدار آن را محاسبه کنیم.

به طور کلی، در منطقه خور و بیابانک، لایه های خاک از منشورهای قائم پنج ضلعی تشکیل شده است که وجه مشترک در صفحات قائم شکاف های عمودی است که سیستم را به هم وصل می کند. در امتداد قائم، هر ستون متشکل از چندین لایه نمکی متخلخل همراه با لایه های تراوای ماسه ای می باشد. مجموعه این سیستم را می توان به عنوان لایه کم تراوای متخلخل نمکی، لایه تراوای شکاف های بین ستون ها و لایه بسیار تراوای ماسه ای در نظر گرفت (شکل ۲).



شکل (۲): وضعیت لایه های خاک در کفه نمکی خور و بیابانک

۲- سفره های درزه و شکافدار و مدل وارن و روت

مفهوم تخلخل دوگانه را برای اولین بار بارانبلات به منظور کمک به تعیین مقادیر جریان در صخره های شکست دار پیشنهاد کرده است (Barenblatt et al., 1960). مطابق این مفهوم، فرض می شود که یک توده صخره شکافدار شامل دو محیط پیوسته متقابل و درهم است: یکی بلوک های پیوسته به عنوان تخلخل اصلی با نفوذپذیری کم و دیگری شکاف ها به عنوان تخلخل دوم با نفوذپذیری بالا، که در شکل (۱) نیز نشان داده شده است. فرض می شود معادله دیفرانسیل حاکم بر شبکه شکاف همان معادله آشنا و معروف انتشار آب زیرزمینی به همراه ترم چشمه برای در نظر گرفتن وجود آب در توده سنگی است (Moençh 1984):

$$K\nabla^2 h = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + q_\alpha \quad (1)$$

به طور مشابه برای توده سنگها نیز خواهیم داشت:

$$K'\nabla^2 h' = S'_s \frac{\partial h'}{\partial t} - q_\alpha \quad (2)$$

که در آن:

h : هد هیدرولیکی در شکاف (m)، S_s : ضریب ذخیره ویژه سیستم شکاف (m^{-1})، K : هدایت هیدرولیکی سیستم شکاف (ms^{-1})، h' : هد هیدرولیکی در بلوک (m)، S'_s : ضریب ذخیره ویژه سیستم بلوک (m^{-1})، K' : هدایت هیدرولیکی سیستم بلوک (ms^{-1})، q_α : ترم چشمه و چاه (s^{-1})

برای توسعه یک مدل ریاضی جریان آب به سمت چاه در یک سیستم تخلخل دوگانه، وارن و روت فرض کردند که سمت چپ معادله (۲) برابر صفر است. معنای فیزیکی این فرضیه این است که در واقع، تغییرات گرادیان هیدرولیکی یا دیورژانس جریان در بلوک، قابل چشم پوشی است. آنها همچنین فرض کردند که شار جریان از بلوک به سمت شکاف در یک حجم دلخواه، تنها به خاطر اختلاف بین میانگین هد هیدرولیکی شکافها و بلوکها است. این فرضیات در ریاضی به صورت زیر نشان داده می شود (Warren and Root, 1963):

$$q_\alpha = -\alpha K'(h' - h) \quad (3)$$

در این معادله، α پارامتری است که به ژئومتری توده سنگی شکافدار با دیمانسیون عکس مساحت مربوط است. هنگامی که اندازه بلوکها نسبت به اندازه شکافها بزرگ باشد، یا دانسیته شکاف کم باشد و یا سطح تماس بلوک و شکاف کوچک باشد، مقدار α کم است. عکس این مطلب نیز صادق است.

$$\alpha = 4n(n+2)/L^2 \quad (4)$$

در این رابطه، n : تعداد شکافها و L : ارتفاع بلوکهاست (Golf-racht. T. V, 1982).

مقدار این پارامتر در سفره های آبدار لایه ای کمی متفاوت از مقدار آن در سفره های شکافدار است؛ لذا در این تحقیق به صورت تجربی برای ۱۰ چاه تقریب زده و رابطه زیر ارائه شده است:

$$\alpha = 2n(n+2)l/L^3 \quad (5)$$

که در آن، l : ارتفاع لایه با نفوذپذیری زیاد است (m).

به علت کم بودن هدایت هیدرولیکی توده سنگها، فرض می شود که سیال تنها از طریق شکافها وارد بدنه چاه می شود. جریان به سمت چاه، شعاعی، دبی پمپاژ ثابت و سفره سیستمی با تخلخل دوگانه و بی نهایت فرض می شود که از بالا و پایین با لایه های غیر قابل نفوذ تحت فشار قرار گرفته است.

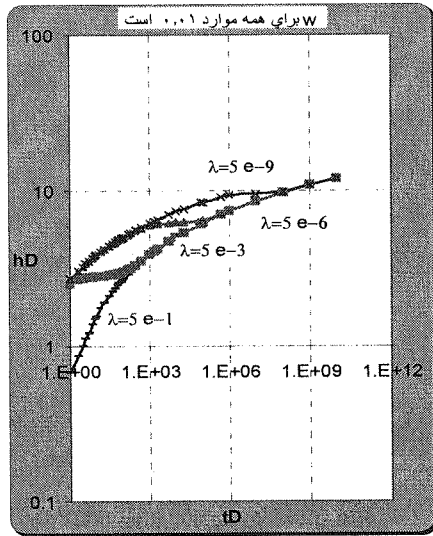
وارن و روت پارامترهای بی بعد زیر را تعریف و بیان کردند که می توان برای ساده سازی، معادلات (۱) و (۲) و شرایط مرزی را به فرم ساده و بی بعد نوشت.

h_D : افت بی بعد که به صورت زیر تعریف می شود:

$$h_D = \frac{4\pi KH}{Q_T} (h_i - h) \quad (6)$$

t_D : زمان بی بعد که به صورت زیر تعریف می شود:

مدت زمان این ناحیه به پارامترهای λ و ω وابسته است.



شکل (۳): منحنی‌های نمونه به دست آمده از مدل وارن و روت در سفره‌های آبدار شکافدار

در ناحیه سوم که مدت زمان طولانی ادامه خواهد داشت، کل سیستم شکاف و بلوک به صورت یک سیستم یکپارچه و همگن رفتار می‌کند. اگر نفوذپذیری بلوک در مقایسه با نفوذپذیری شکاف کم باشد، آبدی مخزن همگن و یکپارچه فرضی، برابر نفوذپذیری سیستم شکاف‌ها در نظر گرفته می‌شود (Golf-racht. T. V, 1982). در زمان‌های طولانی هر دو تابع Ei معادله (۱۳) تقریباً برابر صفر می‌شود.

۳- نتایج

در این مقاله سه سری از اطلاعات پمپاژ با روش‌های تیس و وارن و روت ارزیابی شده‌اند: یکی اطلاعات پمپاژ چاه‌های حفر شده در مجاورت کوه‌های یوکا در ایالت نوادا، دیگری اطلاعات پمپاژ چاه‌های حفر شده در روستای سامبروی کانادا و در نهایت، اطلاعات پمپاژ چاه‌های حفر شده در منطقه خور و بیابانک اصفهان. هر کدام از مناطق ذکر شده یک نوع ژئومتری خاص دارند که در زیر به آنها پرداخته شده است.

۱- نتایج آزمایش پمپاژ در منطقه‌ای از ایالت نوادای آمریکا و در مجاورت کوه‌های یوکا، که بخش انرژی ایالت متحده، گزارش کرده است (Moench 1984)، با استفاده از دو روش وارن و روت و روش تیس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. داده‌های پمپاژ در پیوست الف آمده است. عمق چاه حفر شده در این منطقه به ۱۲۰۰ متر می‌رسد و در طول پروفیل آبدی چاه با عمق ۴۰۰ متر پنج شکاف وجود دارد.

نتایج حاصله از تحلیل اطلاعات پمپاژ به دو روش مورد نظر و نتایج واقعی حاصل از نمونه برداری‌ها در جدول (۱) آمده

$$t_D = \frac{Kt}{S_s r_w^2} \quad (7)$$

r_D : فاصله بی‌بعد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$r_D = r / r_w \quad (8)$$

H : ضخامت مخزن (m)، Q_T : دبی کل چاه ($m^3 s^{-1}$)، h_i : هد هیدرولیکی اولیه در مخزن (m) (Moench 1984).

وارن و روت معادلات (۱) و (۲) را به صورت بی‌بعد زیر نوشتند:

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial h}{\partial r_D} \right) - \omega \frac{\partial h}{\partial t_D} - (1-\omega) \frac{\partial h'}{\partial t_D} = 0 \quad (9)$$

$$(1-\omega) \frac{\partial h'}{\partial t_D} - \lambda (h - h') = 0 \quad (10)$$

که در آن:

$$\lambda = \alpha (K' / K)_w^2 \quad (11)$$

$$\omega = S_s / S'_s \quad (12)$$

با حل همزمان این دو معادله با کمک تبدیل لاپلاس، معادله افت بی‌بعد در سیستم شکاف‌ها برای چاه پمپاژ اصلی ($r_D = 1$)، به صورت زیر در خواهد آمد:

$$h_D = \frac{1}{2} \left[0.80908 + \ln t_D + Ei \left(-\frac{\lambda t_D}{\omega(1-\omega)} \right) - Ei \left(-\frac{\lambda t_D}{1-\omega} \right) \right] \quad (13)$$

که در آن، Ei به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Ei(-x) = - \int_x^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (14)$$

می‌بینیم که با فرض مشخص بودن ژئومتری بلوک‌ها، یک سیستم تخلخل دوگانه تنها با دو پارامتر بی‌بعد ω و λ قابل تشخیص است. با حل معادله (۱۳)، برای مقادیر مختلف ω و λ ، منحنی‌های نمونه فراوانی را برای افت بی‌بعد در مقابل زمان بی‌بعد، به دست خواهیم آورد که هر منحنی توصیفی از یک نوع منحصر به فرد سفره آبدار شکافدار است. در شکل (۳) چند نمونه از جواب‌های معادله (۱۳) رسم شده است.

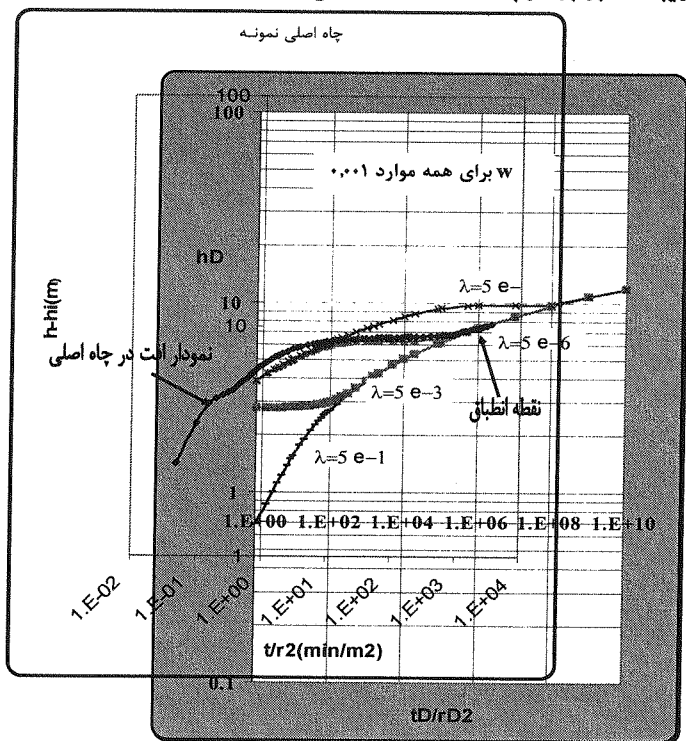
در هر یک از نمودارهای بالا سه ناحیه مختلف و مجزا قابل تفکیک هستند. ناحیه ابتدایی پمپاژ؛ که در آن سیال پمپاژ شده تنها از طریق سیستم شکاف‌ها تامین می‌شود. در این ناحیه، تابع Ei می‌تواند به صورت زیر شبیه سازی شود:

$$Ei(-x) = -\gamma - \ln(x) \quad (15)$$

که در آن، γ عدد اولر برابر است با: $\gamma = 0.5772$

در ناحیه دوم نمودار، یا ناحیه انتقال، افت در سیستم شکاف‌ها با گذشت زمان، ثابت می‌ماند. در این ناحیه سیال، از بلوک‌ها به سمت شکاف‌ها شروع به حرکت می‌کند، بنابراین

هدایت هیدرولیکی شکاف‌ها، دیگر پارامترها را بخوبی تخمین زده است. ضریب هدایت هیدرولیکی شکاف‌ها در این روش تقریباً سه برابر کوچک‌تر از مقدار واقعی است.



شکل (۴): انطباق منحنی نمونه (ایالت نوادا)

۳- همین کار برای داده‌های پمپاژ چاه‌های حفر شده در منطقه خور و بیابانک، واقع در شمال شرقی استان اصفهان انجام شده است. در این منطقه، تراز سطح آب زیرزمینی بالا و در پروفیل طولی چاه؛ که در شکل (۵) نشان داده شده است، دو نوع لایه کاملاً متمایز، قابل تشخیص است. یکی لایه سنگ نمک که نفوذپذیری آن بسیار کم است و به علت تخلخل زیاد ظرفیت ذخیره زیادی دارد. لایه دوم، لایه‌ای است از ماسه بادی؛ که نفوذپذیری آن نسبت به توده سنگ نمک زیاد است (وزارت صنایع و معادن، ۱۳۷۶). در این منطقه مجموعاً ۳۲ حلقه چاه مطالعاتی حفر شده است. منحنی افت-زمان برخی از این چاه‌ها از تئوری تخلخل دوگانه تبعیت می‌کند. بلوک‌های پنج ضلعی نمک، در تمامی حوزه گسترده شده‌اند؛ لیکن میان لایه‌های تراوای ماسه‌ای تنها در پروفیل چند چاه مشاهده می‌شود (شکل ۲). با مقایسه این چاه‌ها نتیجه می‌شود که شکاف‌های بین بلوک‌ها به خاطر باریک بودن و مسدود شدن در اثر تجمع و تراکم رسوبات نمک، نقش موثری در آبدهی چاه‌ها ندارند و علت اصلی سه قسمتی شدن منحنی افت، به خاطر لایه‌های ماسه‌ای بسیار تراواست که نقش شکاف‌های افقی را بازی می‌کند؛ لذا با بکارگیری مدل وارن و روت و اصلاح پارامتر α مطابق معادله ۵ در این سفره آبدار لایه‌ای، مقادیر پارامترهای

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در روش تیس، ضریب هدایت هیدرولیکی بلوک و شکاف تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند، بنابراین روش تیس قابلیت تمییز درزه و شکاف را در این سیستم ندارد. این روش مقادیر بزرگی را برای ضریب هدایت هیدرولیکی بلوک‌ها نشان می‌دهد. به طور متوسط نتایج این روش در بلوک‌ها ۵۰ برابر مقادیر واقعی می‌باشد (۴۰۰ درصد خطا)، که خطایی بزرگ و غیر قابل چشم‌پوشی است. نتایج روش وارن و روت در مورد ضرایب هدایت هیدرولیکی، تفاوت چندانی با نتایج واقعی ندارد و سه و نیم برابر کوچک‌تر است که قابل قبول است.

از طرفی، روش تیس مقادیر ضرایب ذخیره بلوک و شکاف را صد تا هزار برابر بزرگ‌تر از نتایج واقعی نشان می‌دهد که این اندازه خطا قابل اغماض نیست. همچنین روش وارن و روت مقدار ضریب ذخیره بلوک را بیشتر از صد برابر مقدار واقعی و ضریب ذخیره شکاف را بیشتر از ده برابر مقدار واقعی نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت که در این روش، به مقادیر ضریب ذخیره چندان اعتمادی نیست؛ ولی در مقایسه با روش تیس، ممتاز است.

۲- نتایج آزمایش پمپاژ چاه‌های حفر شده در حوالی روستای سامبرو؛ که در جنوب غربی شهرستان هالیفاکس کانادا، واقع شده است، از تئوری تخلخل دوگانه تبعیت می‌کند. در این ناحیه، توده صخره‌هایی که به شدت شکافدارند، به صورت لایه‌های متوالی سنگ بر روی همدیگر قرار گرفته‌اند و مجاری عبور آب در فواصل بین لایه‌ها قرار دارد. ضخامت شکاف‌ها کم؛ ولی تعداد آنها زیاد است. در این مقاله، اطلاعات پمپاژ یکی از این چاه‌ها را که جایل (Gale, 1977) ارائه کرده است به دو روش تیس و وارن و روت تجزیه و تحلیل شده است. داده‌های پمپاژ در پیوست ب آمده است.

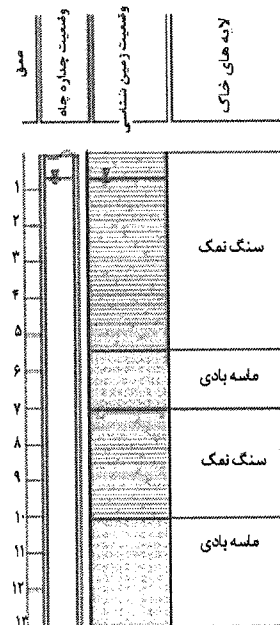
در طول پروفیل چاه، که ۱۶ متر است بیشتر از ۲۰ شکاف با حداکثر ضخامت ۳ سانتی‌متر وجود دارد. تمامی آب پمپاژ شده، از طریق شکاف‌ها تامین می‌شود و نفوذپذیری صخره‌ها بسیار کم است؛ بنابراین در این مثال، بلوک‌ها نقش ناچیزی را در آبدهی چاه دارند. نتایج تحلیل داده‌های پمپاژ در جدول (۲) آمده است.

با توجه به نتایج می‌توان گفت روش تیس ضریب ذخیره شکاف را بزرگ‌تر از مقدار واقعی و ضریب ذخیره بلوک را بسیار کوچک‌تر از مقدار حقیقی آن برآورد می‌کند. ضریب هدایت هیدرولیکی به دست آمده از این روش برای شکاف‌ها کمتر از داده‌های میدانی و حدوداً شش برابر کوچک‌تر است؛ اما در مورد بلوک‌ها مقدار به دست آمده تقریباً همان مقدار واقعی است. در این مثال، روش وارن و روت جز در برآورد ضریب

هیدرولیکی محاسبه شده است.

در ابتدا، مقدار ضریب α به کمک داده‌های میدانی کالیبره و رابطه‌ای برای تخمین آن ارائه شده است (معادله ۵)؛ سپس به کمک منحنی‌های نمونه حاصل از مدل وارن و روت و منحنی‌های افت در چاه‌های دیگر، مقادیر پارامترهای هیدرولیکی سفره آبدار محاسبه شده است.

داده‌های پمپاژ و منحنی انطباق داده‌ها برای یکی از چاه‌ها در پیوست آمده است.



شکل (۵): پروفیل چاه حفر شده در منطقه خور و بیایانک (وزارت صنایع و معادن، ۱۳۷۶)

با استفاده از دو روش تیس و وارن و روت، اطلاعات پمپاژ در این چاه‌ها تحلیل و نتایج آن در جدول (۳) نشان داده شده است.

با توجه به نتایج مندرج در جدول (۳)، استفاده از روش تیس در برآورد ضرایب هدایت هیدرولیکی شکاف و بلوک، به خطای زیادی منجر می‌شود، به طوری که ضریب هدایت هیدرولیکی شکاف و بلوک را تقریباً ۶ تا ۵۰ برابر کمتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد. روش وارن و روت ضریب هدایت هیدرولیکی شکاف‌ها و بلوک‌ها را ۱۰ تا ۱۵ برابر کوچک‌تر از مقادیر واقعی برآورد می‌کند که نسبت به روش تیس جز در بلوک‌ها تفاوت چندانی ندارد؛ در عین حال، خطای نسبتاً بزرگی را نتیجه می‌دهد.

روش تیس مقادیر ضریب ذخیره شکاف را بهتر از روش وارن و روت برآورد می‌کند؛ اما در مورد بلوک‌ها نمی‌توان قضاوتی کرد هر چند که استفاده از روش وارن و روت به یک خطای بزرگ منجر می‌شود.

۴- بحث و نتیجه گیری

تحلیل و ارزیابی اطلاعات آزمایش پمپاژ، بیش از اینکه یک علم باشد یک هنر است. علم است از این نظر که بر اساس مدل‌های تئوری است که زمین شناسان یا مهندسان باید آن را فهمیده و ارزیابی کنند و هنر است از این نظر که برخی لایه‌های آبدار مختلف ممکن است رفتار یکسانی داشته باشند؛ بنابراین به مهارت‌های تفسیری در بخش‌های زمین شناسی و مهندسی نیاز است (Bocart, W.D., 1999).

بعضی از محققین، روش‌های مرسوم تیس و ژاکوب را برای آنالیز داده‌های آزمایش پمپاژ در سفره‌های درزه و شکافدار پیشنهاد کرده‌اند (کرمی، غ، ۱۳۸۴). دو و پدلر (Doe & pedler, 1998) به این نتیجه رسیدند که در اکثر سفره‌های شکافدار عکس‌العمل لایه آبدار نسبت به پمپاژ ممکن است به طور قابل ملاحظه‌ای از نتایج روش تیس متمایز باشد. بر اساس این توصیه‌ها، روش تیس و روش وارن و روت، برای تعدادی آزمایش پمپاژ در سفره‌های درزه و لایه‌ای بکار گرفته شد و بر اساس نتایج حاصله و شکل منحنی افت- زمان، پیشنهادات زیر برای ارزیابی و برآورد خصوصیات هیدرولیکی اینگونه سفره‌ها ارائه می‌شود:

در شرایطی که منحنی افت- زمان از الگوی تئوری تخلخل دوگانه تبعیت می‌کند؛ به عبارت دیگر، زمانی که منحنی افت- زمان شامل سه بخش باشد، مناسب‌ترین روش برای آنالیز داده‌ها، به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

- در سفره‌های شکافداری که ضخامت شکاف‌ها بسیار کم است (صادق بودن قانون داریسی در اثر اصطکاک بدنه شکاف) و حجم اعظم آب از طریق ذخیره بلوک‌های بسیار ضخیم تأمین می‌شود، بکارگیری مدل وارن و روت به نتایجی منجر می‌شود که با داده‌های واقعی تطابق نسبتاً خوبی دارد؛ ولی در مورد ظرفیت ذخیره بلوک یا شکاف اعتماد چندانی به نتایج این روش نیست. بکارگیری روش تیس در اینگونه سفره‌ها به هیچ عنوان پیشنهاد نمی‌شود، زیرا به خطاهای بزرگی منجر می‌شود؛ بنابراین در چنین سفره‌هایی استفاده از روش وارن و روت بسیار مناسب است.

- در سفره‌های شکافداری که شامل صخره‌های لایه‌ای با نفوذپذیری بسیار کم هستند و جریان آب در آنها تنها از طریق شکاف‌های بین لایه‌ها انجام می‌پذیرد، روش تیس به هیچ عنوان مقادیر واقعی را به درستی تخمین نمی‌زند و به خطای بزرگی منجر می‌شود؛ اما مدل وارن و روت در اینگونه سفره‌ها جواب‌های نسبتاً دقیقی را ارائه می‌کند؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود در این چنین سفره‌هایی از روش غیر خطی و

منحنی‌های نمونه وارن و روت استفاده شود.

بکارگیری روش تیس به عنوان یک تخمین برای مقادیر ضریب ذخیره، در این چنین سفره‌ها مناسب‌تر است. با توجه به نتایج بالا، به طور کلی می‌توان گفت که در اکثر سفره‌های شکافدار، عکس‌العمل لایه آبدار نسبت به پمپاژ به طور قابل ملاحظه‌ای از نتایج روش تیس متمایز است و بکارگیری روش وارن و روت می‌تواند ما را به محاسبه نتایج دقیق‌تر رهنمون سازد. در مورد سفره‌های آبدار لایه‌ای احتمالاً اصلاح روش وارن و روت و تغییر شرایط مرزی معادله می‌تواند به جواب‌های دقیق‌تر منجر شود.

- در مورد سفره‌های آبدار چند لایه‌ای؛ که منحنی افت- زمان در آنها شامل سه قسمت مختلف است، به عبارتی شکل منحنی آنها از مدل‌های تخلخل دوگانه تبعیت می‌کند، به کارگیری روش تیس و روش وارن و روت به هیچ عنوان مناسب نیست. این در حالی است که خطای روش وارن و روت برای ضرایب هدایت هیدرولیکی بسیار کمتر از روش تیس و نتایج به مقادیر واقعی نزدیک تر است. پیشنهاد می‌شود در این‌گونه سفره‌های آبدار، از تئوری لایه‌های آبدار نشستی یا لایه‌های آبدار چند لایه‌ای نیز استفاده شود. در عین حال می‌توان گفت که

جدول (۱): نتایج آزمایش پمپاژ به دو روش وارن و روت و روش تیس (ایالت نوادای امریکا)

| پارامترهای هیدرولیکی | $K(m/hr)$ | $Ss(m^{-1})$ | $K'(m/hr)$ | $Ss'(m^{-1})$ |
|----------------------------|-----------|--------------|------------|---------------|
| مقادیر صحرایی (نمونه‌گیری) | ۰/۰۳۵۸۹۶ | ۱/۶۹e(-۶) | ۰/۰۰۵۹۳۳ | ۳/۳۸e(-۴) |
| نتایج روش وارن و روت | ۰/۰۲۰۶۷۷ | ۶/۲۷e(-۵) | ۰/۰۰۱۷۰۸ | ۴/۱۸e(-۲) |
| نتایج روش تیس | ۰/۰۲۳۵۸۹ | ۱/۴۶e(-۳) | ۰/۰۲۹۴۸۷ | ۵/۴۸e(-۲) |

جدول (۲): نتایج آزمایش پمپاژ به دو روش وارن و روت و روش تیس (روستای سامبروی کانادا)

| پارامترهای هیدرولیکی | $K(m/hr)$ | $Ss(m^{-1})$ | $K'(m/hr)$ | $Ss'(m^{-1})$ |
|----------------------------|-----------|--------------|------------|---------------|
| مقادیر صحرایی (نمونه‌گیری) | ۰/۰۱۷۱۷۹ | ۱/۰۰e(-۵) | Very low | large |
| نتایج روش وارن و روت | ۰/۰۰۴۷۵۳ | ۱/۱۳e(-۵) | ۲/۱۱e(-۲۱) | large |
| نتایج روش تیس | ۰/۰۰۳۳۲۷ | ۸/۳۱e(-۳) | ۷/۲۲e(-۹) | ۰/۰۱۲۱ |

جدول (۳): نتایج آزمایش پمپاژ به دو روش وارن و روت و روش تیس (منطقه خور و بیابانک اصفهان)

| | پارامترهای هیدرولیکی | $K(m/hr)$ | $Ss(m^{-1})$ | $K'(m/hr)$ | $Ss'(m^{-1})$ |
|-------------|----------------------------|-----------|--------------|------------|---------------|
| | مقادیر صحرایی (نمونه‌گیری) | ۱/۰۸ | ۰/۱۳۲ | ۰/۷۲ | ۰/۲۵۰ |
| چاه شماره ۱ | نتایج روش وارن و روت | ۰/۱۰۵۵۶۷ | ۱/۱۳e(-۴) | ۰/۰۳۲۷۲۶ | large |
| | نتایج روش تیس | ۰/۱۷۹۳۳۵ | ۰/۰۴۴۹۵۲۸ | ۰/۰۱۳۶۰۱ | ۰/۲۶۹۷۱۷ |
| چاه شماره ۲ | نتایج روش وارن و روت | ۰/۲۲۵۵۶۷ | ۲/۴۶e(-۳) | ۱/۳۲۲۷۲۶ | ۲/۴۶ |
| | نتایج روش تیس | ۰/۱۲۴۵۸۷ | ۰/۰۳۲۵۴ | ۰/۱۱۴۵۱ | ۰/۸۵۴۲ |
| چاه شماره ۳ | نتایج روش وارن و روت | ۰/۰۴۹۴۵۱ | ۲/۰۴ e(-۳) | ۰/۰۱۵۳۲۹ | ۰/۰۲۰۴ |
| | نتایج روش تیس | ۰/۰۷۴۸۷۷ | ۰/۰۱۰۴۴۵ | ۰/۰۱۴۹۷۵ | ۰/۰۳۲۱۳۹ |
| چاه شماره ۴ | نتایج روش وارن و روت | ۰/۱۰۹۹۱۶ | ۲/۴۰ e(-۳) | ۰/۰۳۴۰۷۴ | ۰/۰۲۴۰ |
| | نتایج روش تیس | ۰/۲۶۰۰۳۱ | ۰/۰۰۱۲۰۹ | ۰/۱۵۸۲۸۰ | ۰/۰۰۷۳۶۰ |
| چاه شماره ۵ | نتایج روش وارن و روت | ۰/۰۷۱۸۸۵ | ۷/۸۰ e(-۴) | ۰/۰۲۲۲۸۴ | ۰/۰۰۷۸ |
| | نتایج روش تیس | ۰/۱۱۸۶۵۳ | ۰/۲۷۵۸۶۹ | ۰/۰۵۰۴۲۸ | ۰/۱۱۷۲۴۴ |

مجاورت کوه‌های یوکا که بخش انرژی ایالت متحده، گزارش کرده است.

اطلاعات پمپاژ در منطقه‌ای از ایالت نوادای آمریکا و در

جدول (۴): مقادیر افت آب چاه نسبت به زمان در اثر پمپاژ برای چاهی در ایالت نوادای آمریکا

| اطلاعات پمپاژ چاه واقع در ایالت نوادا | | اطلاعات پمپاژ چاه واقع در ایالت نوادا | |
|---------------------------------------|---------|---------------------------------------|---------|
| t(min) | hi-h(m) | t(min) | hi-h(m) |
| 0.05 | 2.513 | 70 | 8.91 |
| 0.1 | 3.769 | 80 | 8.92 |
| 0.15 | 4.583 | 90 | 8.93 |
| 0.2 | 4.858 | 100 | 8.95 |
| 0.25 | 5.003 | 120 | 8.97 |
| 0.3 | 5.119 | 140 | 8.98 |
| 0.35 | 5.23 | 160 | 8.99 |
| 0.4 | 5.39 | 180 | 9 |
| 0.45 | 5.542 | 200 | 9.02 |
| 0.5 | 5.69 | 240 | 9.04 |
| 0.6 | 5.96 | 300 | 9.07 |
| 0.7 | 6.19 | 400 | 9.11 |
| 0.8 | 6.42 | 500 | 9.14 |
| 0.9 | 6.59 | 600 | 9.17 |
| 1 | 6.74 | 700 | 9.18 |
| 1.2 | 6.96 | 800 | 9.21 |
| 1.4 | 7.17 | 900 | 9.25 |
| 1.6 | 7.33 | 1000 | 9.3 |
| 1.8 | 7.45 | 1200 | 9.44 |
| 2 | 7.56 | 1400 | 9.55 |
| 2.5 | 7.76 | 1600 | 9.64 |
| 3 | 7.93 | 1800 | 9.74 |
| 3.5 | 8.03 | 2000 | 9.78 |
| 4 | 8.12 | 2200 | 9.8 |
| 5 | 8.24 | 2400 | 9.84 |
| 6 | 8.32 | 2600 | 9.93 |
| 7 | 8.41 | 2800 | 10.03 |
| 8 | 8.46 | 3000 | 10.08 |
| 9 | 8.54 | 3500 | 10.26 |
| 10 | 8.62 | 4000 | 10.3 |
| 12 | 8.67 | 4200 | 10.41 |
| 14 | 8.7 | | |
| 16 | 8.74 | | |
| 18 | 8.76 | | |
| 20 | 8.77 | | |
| 25 | 8.81 | | |
| 30 | 8.84 | | |
| 35 | 8.84 | | |
| 40 | 8.86 | | |
| 50 | 8.86 | | |
| 60 | 8.9 | | |

هالیفاکس کانادا، واقع شده است.

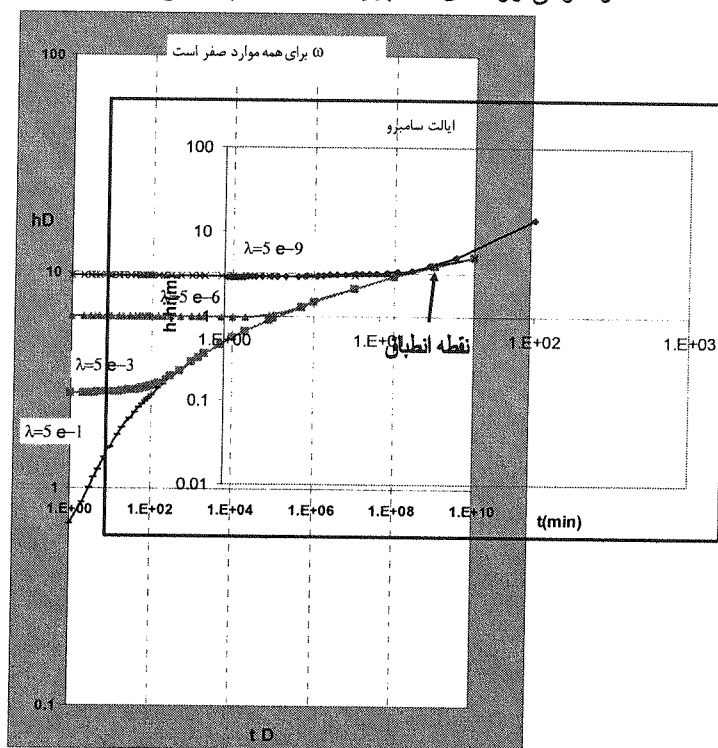
اطلاعات پمپاژ و منحنی نمونه به دست آمده برای چاه حفر شده در حوالی روستای سامبرو، که در جنوب غربی شهرستان

جدول (۵): مقادیر افت آب چاه نسبت به زمان در اثر پمپاژ برای

چاهی در روستای سامبروی کانادا

اطلاعات پمپاژ منطقه سامبرو

| t(min) | h(m) |
|--------|--------|
| 2 | 0.057 |
| 3 | 0.06 |
| 4 | 0.084 |
| 5 | 0.114 |
| 6 | 0.126 |
| 7 | 0.15 |
| 9 | 0.195 |
| 10 | 0.24 |
| 12 | 0.27 |
| 15 | 0.294 |
| 20 | 0.2955 |
| 25 | 0.3 |
| 30 | 0.315 |
| 40 | 0.327 |
| 50 | 0.336 |
| 60 | 0.375 |
| 90 | 0.405 |
| 110 | 0.435 |
| 140 | 0.495 |
| 200 | 0.525 |
| 230 | 0.555 |
| 260 | 0.6 |
| 280 | 0.75 |
| 300 | 1.5 |
| 320 | 3 |
| 340 | 4.2 |
| 380 | 10.5 |
| 420 | 15 |



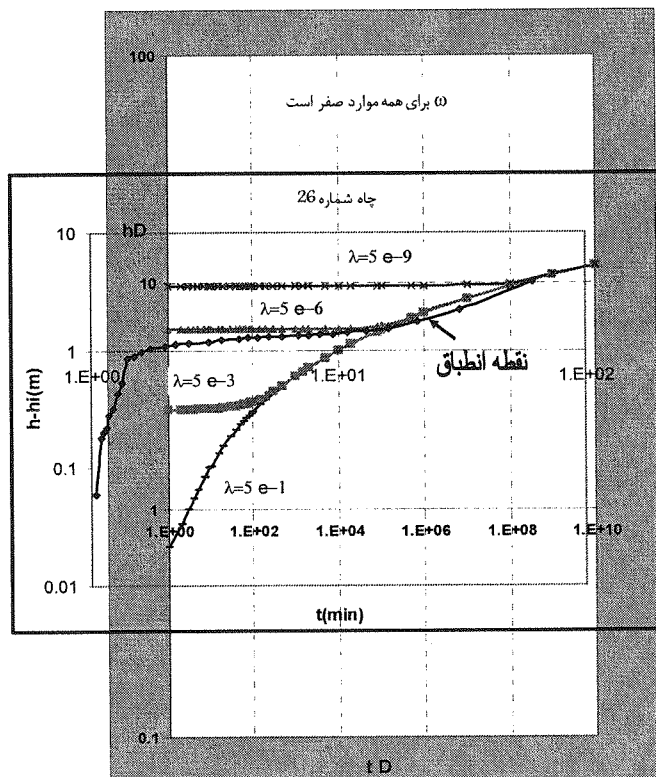
شکل (۶): انطباق منحنی افت- زمان با منحنی نمونه برای چاهی در روستای سامبروی کانادا

اطلاعات پمپاژ و منحنی نمونه بدست آمده برای چاه حفر شده در منطقه خور و بیابانک که در شمال شرقی استان اصفهان واقع شده است.

| | |
|----|------|
| 9 | 1.35 |
| 10 | 1.37 |
| 11 | 1.41 |
| 13 | 1.45 |
| 16 | 1.52 |
| 20 | 1.82 |
| 30 | 2.64 |
| 60 | 4.28 |

۶- مراجع

- [۱] گزارش مطالعات منابع آب زیرزمینی کفه نمکی خور- بیابانک، وزارت صنایع و معادن، ۱۳۷۶.
- [۲] کرمی، غلامحسین؛ "آنالیز داده‌های آزمایش پمپاژ در سفره‌های کارستی، روش‌های مرسوم آری یا خیر؟"، هشتمین همایش سالانه انجمن زمین شناسی ایران، ۱۳۸۴.
- [۳] Barenblatt, G.I., Zhelton, Iu.P. and Kocina, I.N. (1960) "Basic Concepts in the Theory of Seepage of Homogeneous Liquids in Fissured Rocks (strata)", J. Appl. Math. Mech. Engl. Transl., 24, 1286-1303
- [۴] Bernard, S., Delay, F., and Porel, G. (2006) "A New Method of Data Inversion for the Identification of Fractal Characteristics and Homogenization Scale From Hydraulic Pumping Tests in Fractured Aquifers", Journal of Hydrology, 328, 647-658.
- [۵] Bocaration, W.D. (1999) "The Handbook of Groundwater Engineering", CRC press, Editor in chief.
- [۶] Doe, T. and W.H. Pedler. (1998) "The Problem of Fractures Groundwater Monitoring", and Review. Winter., 7477.
- [۷] Gale, J.E. (1977) "A Numerical Field and Laboratory Study of Flow in Rocks with deformable Fracture", Environment Canada, Water Resources Branch, Scientific Series. No 75 14.
- [۸] Kazemi, H. (1969) "Pressure Transient Analysis of Naturally Fractured Reservoirs with Uniform Fracture Distribution", Trans. Soc. Pet. Eng. AIME, 246, 451-462.
- [۹] Kazemi, H., Seth, M.S. and Tomas, G.W., (1969). "The Interpretation of Interference Tests in Naturally Fractured Reservoirs with Uniform Fracture Distribution", SPEJ, December, p 463-472.
- [۱۰] Liu, J., Feng X., and Jing, L., (2004). "Theoretical and Experimental Studies on the Fluid-Soil Coupling Processes for oil Recovery from Low Permeability Fractured Reservoirs", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41, 496.
- [۱۱] Moench, A.F. (1984) "Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin", Water Resou. Res., 20(7), 831-846.
- [۱۲] Samaniego, F. and Villalobos, H. (2003) "Transient Pressure Analysis of Pressure-Dependent Naturally Fractured Reservoirs", Journal of Petroleum Science and Engineering, 39 45-56.
- [۱۳] Sen, Z. (1989) "Volumetric Approach to Multiaquifer and Horizontal Fracture Wells", Journal of Hydraulic Engineering, 115(12), 1646-1667.



شکل (۷): انطباق منحنی افت- زمان با منحنی نمونه برای یکی از چاه‌های منطقه خور و بیابانک

جدول (۶): مقادیر افت آب چاه نسبت به زمان در اثر پمپاژ برای یکی از چاه‌های منطقه خور و بیابانک

| اطلاعات پمپاژ منطقه خور و بیابانک (شماره ۱) | |
|---------------------------------------------|----------|
| t (min) | hi-h (m) |
| 1 | 0.05 |
| 1.05 | 0.06 |
| 1.1 | 0.18 |
| 1.12 | 0.2 |
| 1.15 | 0.22 |
| 1.18 | 0.28 |
| 1.2 | 0.43 |
| 1.22 | 0.32 |
| 1.32 | 0.53 |
| 1.4 | 0.86 |
| 1.5 | 0.9 |
| 1.6 | 0.98 |
| 1.75 | 1.03 |
| 2 | 1.08 |
| 2.2 | 1.12 |
| 2.5 | 1.16 |
| 3 | 1.18 |
| 3.4 | 1.23 |
| 4 | 1.24 |
| 4.5 | 1.27 |
| 4.75 | 1.29 |
| 5.3 | 1.3 |
| 6 | 1.31 |
| 7 | 1.33 |
| 8 | 1.34 |

- Theis, C.V. (1935) "The Relation between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well Using Groundwater Storage", Trans. Am. Geophys. Union, 16 519-524. [۱۴]
- Van Golf-Racht T. D. (1982) "Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering", Elsevier Scientific Publishing Company. [۱۵]
- Warren, J.E. and Root, P.J. (1963) "The Behavior of Naturally Fractured Reservoirs", Trans. Soc. Pet. Eng. AIME, 228, 3(3), 245-255. [۱۶]
- Witherspoon, P.A., J.S.Y. Wang, K. Iwai, and J.E. Gale. (1980) "Validity of the Cubic Law for Fluid Flow in a Deformable Rock Fracture", Water Resour. Res., 16(6), 1016-1024. [۱۷]

