

بررسی اختلاف روش‌های مختلف تحلیل آزمون پمپاژ در برآورد ضرایب هیدرودینامیک آبخوان آزاد

ضرغام محمدی

استادیار بخش علوم زمین، دانشگاه شیراز

علیرضا نسیمی

دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی-آبشناسی، دانشگاه شیراز

تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۰/۱۳

تاریخ دریافت: ۹۰/۳/۲۸

zmohamad@shirazu.ac.ir

چکیده

برای تحلیل و ارزیابی آزمون پمپاژ چاه‌ها جهت برآورد ضرایب هیدرودینامیک آبخوان، مدل‌های تحلیلی مختلفی وجود دارد. با توجه به تفاوت در فرضیات و خصوصیات هیدرولیکی جریان آب‌های زیرزمینی در آبخوان‌های آزاد و محبوس به‌طور اصولی نمی‌توان آزمون پمپاژ چاه‌های حفر شده در آبخوان آزاد را با فرض آبخوان محبوس مورد بررسی و محاسبه قرار داد. اما محققان مختلفی با ذکر قیدهایی تأکید کرده‌اند که تحت شرایط خاصی می‌توان آزمون پمپاژ در آبخوان آزاد را با مدل‌های تحلیلی مربوط به آزمون پمپاژ در آبخوان محبوس محاسبه نمود. از سوی دیگر مدل‌های تحلیلی مختلفی نیز برای بررسی و محاسبه آزمون پمپاژ در آبخوان آزاد وجود دارد. ارزیابی صحت قیده‌های موجود در راستای محاسبه ضرایب هیدرودینامیک آبخوان آزاد بر اساس مدل‌های تحلیلی آبخوان محبوس نشان می‌دهد، که قیده‌های Stallman (1965) و همچنین اصلاحات Jacob (1944) جهت استفاده از مدل‌های تحلیلی آبخوان محبوس در آبخوان آزاد می‌تواند تا ۱۱۶۹ درصد خطا داشته باشد. همچنین براساس نتایج این مقاله می‌توان پیشنهاد داد که تنها در حالتی محاسبه هدایت هیدرولیکی آبخوان آزاد با استفاده از مدل‌های تحلیلی مربوط به آبخوان محبوس خطای کمی دارد که مقدار η (پارامتر ارائه شده توسط Neuman (1972) کمتر از ۰.۰۰۱ باشد.

کلمات کلیدی: ضرایب هیدرودینامیک، آبخوان آزاد، روش *Thies* (1935)، روش *Neuman* (1972)، روش *Moench* (1997)

مقدمه

اعتمادی از هدایت هیدرولیکی ارائه دهند، اگر شکل و نوع مواد موجود در محیط متخلخل یک حالت ایده‌آل داشته باشند، یعنی محیط متخلخل مجموعه‌ای از کره‌های هم‌اندازه باشد. در روش‌های آزمایشگاهی استاندارد برای تعیین هدایت هیدرولیکی که شامل آزمایش بار ثابت و آزمایش بار افتان است، در موقع کار نباید هیچ تغییری در نمونه مورد نظر به وجود آید و هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده فقط معرف هدایت هیدرولیکی نقطه نمونه‌برداری شده است. آزمایش ردیابی به منظور تعیین هدایت هیدرولیکی نیز اگرچه خیلی آسان است، ولی نتایج حاصله تقریبی است و محدودیت‌هایی در صحرا دارد که عبارتند از: الف- به علت این که سرعت حرکت آب در زیر زمین کم است، زمان آزمایش طولانی است، ب- برای تعیین جهت واقعی جریان، باید تعداد چاهک‌های زیادی احداث شود که اقتصادی نیست، ج- اگر آبخوان به صورت لایه لایه (مطبق) باشد، آب در داخل لایه‌ای که هدایت هیدرولیکی بیشتری

تشکیل یک آبخوان و قابلیت آبدهی آن قبل از هر چیز به هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره (ضرایب هیدرودینامیک) آبخوان بستگی دارد. مقدار هدایت هیدرولیکی (ضریب آبگذری) بیانگر توانایی محیط متخلخل در عبور سیالات است و ضریب ذخیره نمایه‌ای مربوط به خروج آب از آبخوان و یا ورود به آن، بر اثر تغییر سطح تراز آب است. علاوه بر این ضرایب هیدرودینامیک آبخوان در محاسبات مربوط به بیلان آب‌های زیرزمینی، مدل آب‌های زیرزمینی، تغییرات حجم آبخوان، سرعت حرکت آب‌های زیرزمینی و شیب هیدرولیکی بسیار اهمیت دارند. تعیین هدایت هیدرولیکی منطقه اشباع به‌وسیله روش‌های مختلفی از جمله فرمول‌های تجربی، روش‌های آزمایشگاهی، آزمایش‌های ردیابی و آزمون‌های پمپاژ صورت می‌گیرد (Todd and Mays, 2007). فرمول‌های تجربی با استفاده از تخلخل و فابریک می‌توانند تخمین قابل

Neuman (1972) در رابطه با آبخوان‌های آزاد به لحاظ کاربردی دارای اهمیت بیشتری می‌باشند که در ادامه به اختصار مدل‌های یاد شده معرفی می‌شوند.

مدل‌های تحلیلی آزمون پمپاژ در آبخوان محبوس

Thies (1935) با مشابه قرار دادن معادله جریان آب‌های زیرزمینی و جریان گرما، معادله جریان شعاعی آب‌های زیرزمینی (معادله ۲) را در مختصات قطبی حل نمود (معادله ۳):

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

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (3)$$

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

در این معادلات، t زمان از شروع پمپاژ (ثانیه)، r فاصله چاه مشاهده‌ای از مرکز چاه پمپاژ (متر)، s افت سطح آب در چاه مشاهده‌ای (متر)، S ضریب ذخیره و T قابلیت انتقال است.

با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده افت-زمان در آزمون پمپاژ و منحنی شاخص که از حل معادله Thies (1935) به دست آمده است، می‌توان در چهار مرحله زیر به محاسبه S و T آبخوان پرداخت (Bear, 1979):

- مرحله اول: تهیه منحنی شاخص^۱ Thies (1935) بر اساس رابطه بین u و $W(u)$ روی یک کاغذ لوگ-لوگ
- مرحله دوم: ترسیم مقادیر اندازه‌گیری شده افت نسبت به زمان روی کاغذ شفاف با مقیاس لوگ-لوگ و با همان مقیاس مربوط به منحنی شاخص
- مرحله سوم: منطبق کردن منحنی لگاریتمی افت-زمان روی منحنی شاخص با این شرط که محورهای آن‌ها همواره موازی هم هستند و بهترین تطابق را روی هم داشته باشند.
- مرحله چهارم: انتخاب یک نقطه تطابق^۲ دلخواه بین دو صفحه و قرائت مقادیر s و $W(u)$ روی محورهای عمودی و $1/u$ و t روی محورهای افقی

با داشتن مختصات نقطه تطابق و مراجعه به معادله Thies (1935)، می‌توان مقادیر S و T را به دست آورد. مدل تحلیلی Cooper & Jacob (1946) در واقع حالت ساده شده‌ای از مدل تحلیلی Thies (1935) با شرط $u \leq 0.01$ است که در این حالت خواهیم داشت:

$$s = \frac{2.3 Q}{4\pi T} \log \frac{2.25 Tt}{r^2 S} \quad (5)$$

دارد، سریع‌تر عبور می‌کند و در نتیجه هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده بزرگ‌تر از هدایت هیدرولیکی معادل کل لایه‌هاست، د- در این روش باید تخلخل آبخوان مشخص باشد که اندازه‌گیری آن کار مشکلی است. با این حال یکی از قابل اعتمادترین روش‌ها برای اندازه‌گیری ضرایب هیدرودینامیک آبخوان آزمایش پمپاژ است. در این روش با استفاده از داده‌های افت-زمان و به کمک روش‌ها و معادلات مختلف ضرایب هیدرودینامیک آبخوان محاسبه می‌شوند. مزیت این روش دقت بالای آن و عیب این روش هزینه بالای آن است.

آزمون پمپاژ را می‌توان در آبخوان‌های آزاد و محبوس انجام داد که به خاطر تفاوت در فرضیات و خصوصیات هیدرولیکی جریان آب‌های زیرزمینی در آبخوان‌های آزاد و محبوس به طور اصولی نمی‌توان آزمون‌های پمپاژ چاه‌های حفر شده در آبخوان آزاد را با فرض آبخوان محبوس مورد بررسی و محاسبه قرار داد. اما محققان مختلفی با ذکر قیدهایی تأکید کرده‌اند که طی شرایط خاصی می‌توان آزمون پمپاژ آبخوان آزاد را با روش‌های مربوط به آزمون پمپاژ آبخوان محبوس محاسبه نمود. به عقیده Stallman (1965) به طور کلی، اگر افت نسبت به ضخامت اشباع آبخوان آزاد ناچیز باشد، روش حل جریان ناپایدار در آزمون پمپاژ آبخوان محبوس می‌تواند برای آبخوان آزاد نیز به کار رود. بر اساس پیشنهاد Jacob (1944)، اگر در آزمون پمپاژ داده‌های افت در چاه مشاهده‌ای به صورت معادله ۱ اصلاح شوند، می‌توان از معادلات حل آبخوان محبوس جهت آبخوان آزاد استفاده کرد.

$$s' = s - (s^2/2b) \quad (1)$$

در این معادله، s' افت اصلاح شده، s افت مشاهده شده و b ضخامت اشباع آبخوان است. همچنین Neuman (1972) با فرض وقوع زهکشی آبی در آبخوان‌های آزاد، پاسخ آبخوان به پمپاژ را تابعی از نسبت ناهم‌سویی هدایت هیدرولیکی عمودی به افقی، فاصله چاه مشاهده‌ای از مرکز چاه پمپاژ و ضخامت اشباع آبخوان معرفی کرد. در این مقاله ابتدا ارزیابی صحت قیدهایی موجود در راستای محاسبه ضرایب هیدرودینامیک آبخوان آزاد بر اساس معادلات آبخوان محبوس انجام شده است، سپس به برآورد خطای ناشی از محاسبه ضرایب هیدرودینامیک آبخوان آزاد بر اساس معادلات آبخوان محبوس پرداخته می‌شود و در نهایت قید کاربردی بر اساس داده‌های واقعی ارائه می‌شود.

تئوری

مدل‌های تحلیلی موجود برای ارزیابی نتایج آزمون‌های پمپاژ مبتنی بر یکسری فرضیات ساده انگارنده می‌باشند که اهم این فرضیات عبارتند از (Freeze and Cherry, 1979): الف- آبخوان در قسمت پایین توسط یک لایه ناتراوا محدود شده است. ب- قبل از شروع آزمون پمپاژ سطح تراز آبخوان افقی و ثابت باشد. ج- آبخوان همگن، همسو و نامحدود باشد. د- قانون دارسی صادق باشد. ه- جریان آب‌های زیرزمینی افقی باشد. و- چاه‌های پمپاژ و مشاهده‌ای در تمام عمق لایه نفوذ کرده و مشبک باشند. ز- قطر چاه‌های پمپاژ ناچیز باشد. از بین مدل‌های موجود برای ارزیابی نتایج آزمون پمپاژ، مدل تحلیلی Thies (1935) برای شبیه‌سازی حرکت آب در آبخوان‌های محبوس و مدل تحلیلی

مدل‌های تحلیلی آزمون پمپاژ در آبخوان آزاد

مدل تحلیلی جریان شعاعی ناپایدار در آبخوان آزاد، همگن و غیرهمسو را با در نظر گرفتن زهکشی تأخیری و جریان سه‌بعدی در محیط اشباع و غیراشباع آبخوان و بدون در نظر گرفتن ذخیره چاه ارائه دادند (Tartakovsky and Neuman, 2007). به دلیل این که در حال حاضر مدل تحلیلی Neuman (1972) در مقایسه با سایر مدل‌های تحلیلی دارای کاربرد بیشتری می‌باشد، در این پژوهش مدل تحلیلی Neuman (1972) مبنای بررسی قرار گرفته است و در ادامه روابط تحلیلی این مدل ارائه شده است. Neuman (1972) معتقد بود که معادله ۳ باید به صورت زیر نوشته شود:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_a, u_y, \eta) \quad (6)$$

$$u_a = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (7)$$

$$u_y = \frac{r^2 S_y}{4Tt} \quad (8)$$

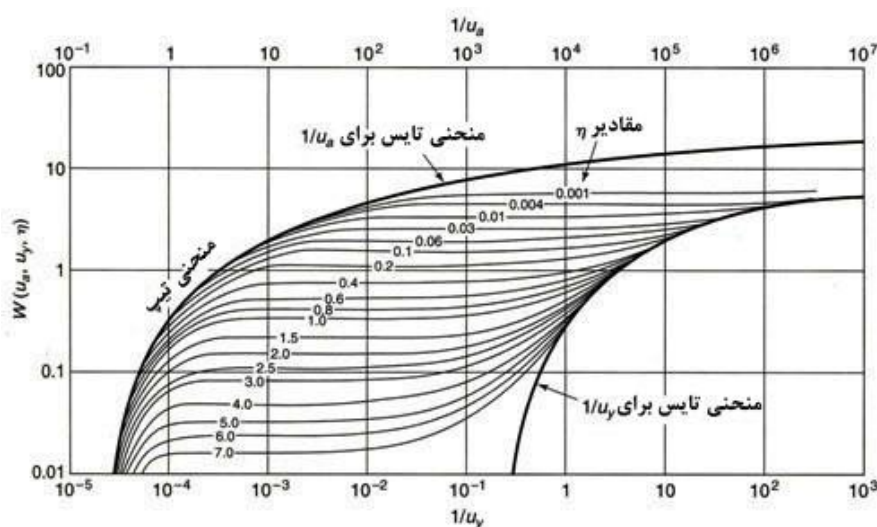
$$\eta = \frac{r^2 K_z}{b^2 K_r} \quad (9)$$

$$T = K_r b \quad (10)$$

در این معادلات، K_r هدایت هیدرولیکی افقی، K_z هدایت هیدرولیکی عمودی، S_y آبدی ویژه، S ضریب ذخیره، b ضخامت اشباع آبخوان، r فاصله چاه مشاهده‌ای از مرکز چاه پمپاژ و t زمان سپری شده از ابتدای پمپاژ است. پارامتر u_a متناظر با زمان‌های اولیه پمپاژ و پارامتر u_y متناظر با زمان‌های بلند مدت پمپاژ است. مقادیر عددی تابع $W(u_a, u_y, \eta)$ بر حسب مقادیر مختلف u_y و u_a در قالب منحنی‌های نمونه Neuman (1972) ارائه شده است (شکل ۱). برای برآورد ضرایب هیدرودینامیک آبخوان آزاد بر مبنای روابط ارائه شده توسط Neuman (1972) روش انطباق بر منحنی‌های نمونه به صورت دو مرحله‌ای به کار گرفته می‌شود. بدین صورت که داده‌های زمان‌های اولیه پمپاژ بر بخش اول منحنی‌های نمونه Neuman (1972) و داده‌های زمان‌های بلند مدت پمپاژ بر بخش انتهایی منحنی‌های نمونه Neuman (1972) انطباق می‌یابند و با انتخاب نقطه تطابق ضرایب هیدرودینامیک آبخوان شامل K_r ، K_z ، S و S_y برآورد می‌شوند.

به دلیل پیچیدگی نحوه وقوع جریان در آبخوان آزاد، مدل‌های تحلیلی متعددی برای پیش‌بینی نحوه وقوع جریان در این آبخوان‌ها ارائه شده است. هنگامی که یک آبخوان آزاد توسط چاه تحت پمپاژ قرار می‌گیرد، مؤلفه‌های افقی و عمودی جریان در آبخوان شکل گرفته و مخروط افت گسترش می‌یابد. به دلیل حضور پدیده "زهکشی ثقلی" در این آبخوان‌ها که به تدریج و در طول زمان پمپاژ آشکار می‌شود، سه بازه زمانی متفاوت در منحنی‌های افت-زمان در محل چاه‌های مشاهده‌ای واقع در این آبخوان‌ها قابل تشخیص می‌باشند که عبارتند از: زمان‌های اولیه، زمان‌های میانی و زمان‌های بلند مدت از شروع پمپاژ (Walton, 1988).

Bulton (1963) با تکیه بر مفهوم زهکشی تأخیری در آبخوان آزاد، یک مدل تحلیلی برای بیان نحوه وقوع جریان در این آبخوان ارائه کرد. مدل ارائه شده توسط Bulton (1963) مبتنی بر ضریبی تجربی به نام ضریب تأخیر بود که این ضریب مفهوم فیزیکی خاصی نداشت. پس از آن Neuman (1972) وقوع پدیده زهکشی تأخیری را وابسته به مؤلفه قائم جریان در آبخوان آزاد معرفی نمود و به جای این که مدل تحلیلی خود را مبتنی بر مفهوم زهکشی تأخیری و ضریب تأخیر قرار دهد، با فرض وقوع زهکشی آبی در آبخوان آزاد، پاسخ آبخوان به پمپاژ را تابعی از نسبت ناهمسویی هدایت هیدرولیکی عمودی به افقی (K_z/K_r)، فاصله چاه مشاهده‌ای از مرکز چاه پمپاژ (r) و ضخامت اشباع آبخوان (b) معرفی کرد. Neuman (1972) با فرض این که مقدار افت ایجاد شده در آبخوان در مقایسه با ضخامت اشباع آبخوان ناچیز بوده و مقدار آبدی ویژه خیلی بزرگ‌تر از ضریب ذخیره است، تغییرات سطح آزاد آب را به عنوان شرط مرزی فوقانی در معادله دیفرانسیل دو بعدی جریان اعمال نمود و روابط تحلیلی هیدرولیک چاه‌ها در آبخوان آزاد را ارائه کرد (Walton, 1988). در ادامه، Moench (1997) با در نظر گرفتن ذخیره چاه و آزاد شدن تدریجی آب از منطقه غیراشباع مدل تحلیلی جدیدی را برای بیان نحوه وقوع جریان در آبخوان آزاد ارائه کرد که پیش‌بینی دقیق‌تری از جریان در این آبخوان‌ها به دست می‌دهد (Moench, 1997). همچنین Tartakovsky and Neuman (2007)



شکل ۱. منحنی نظری تابع چاه $W(u_a, u_y, \eta)$ در برابر $1/u_y$ و $1/u_a$ برای آبخوان آزاد (Neuman, 1972)

روش کار

است، نیز مشاهده می‌شود. به طور کلی، با توجه به لاگ چاه‌های مشاهده‌ای رسوبات سطحی دشت بوشکان (تا عمق ۳۰ متری) در اکثر نقاط شامل قلوه سنگ، شن و ماسه با بین لایه‌های سیلت می‌باشد. با توجه به چاه‌های اکتشافی در مناطق جنوب شرق دشت رسوبات دانه ریز و رسی وجود داشته و به سمت ارتفاعات و شمال غرب دشت رسوبات دانه درشت افزایش می‌یابد.

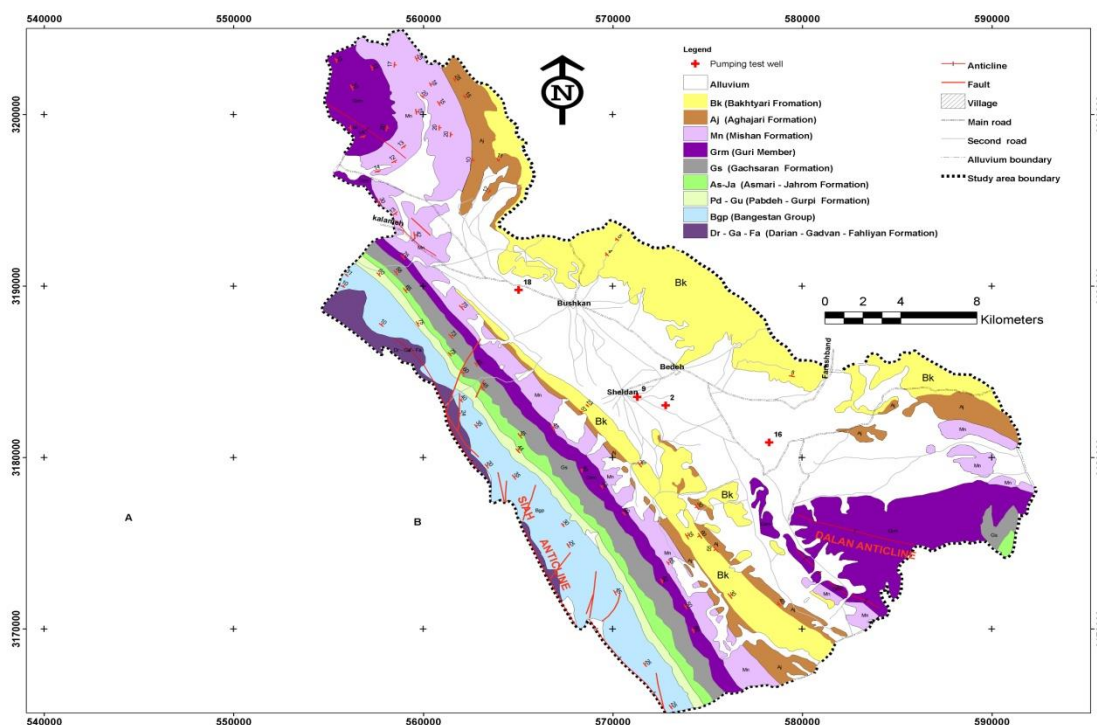
مشخصات چهار چاه مشاهده‌ای به شماره‌های ۲، ۹، ۱۶ و ۱۸ در آبخوان دشت بوشکان در جدول ۱ ارائه شده است (شکل ۲). در چاه پمپاژ مربوط به هر یک از این چاه‌ها، آزمون پمپاژ با دبی ثابت انجام شده است و میزان افت سطح ایستایی در زمان‌های مختلف در چاه مشاهده‌ای مربوطه توسط شرکت سهامی آب منطقه‌ای بوشهر اندازه‌گیری شده است. پس از تنظیم داده‌های افت-زمان در هر کدام از چاه‌ها، باید ضرایب هیدرودینامیک آبخوان محاسبه شود. در این مقاله نیاز به برآورد ضرایب هیدرودینامیک آبخوان آزاد مورد مطالعه بر اساس شرایط و قیده‌های متعدد آبخوان محبوس و آزاد می‌باشد.

برای نیل به اهداف مقاله و ارزیابی دقت و صحت قیده‌های مربوط به مدل‌های تحلیلی مورد استفاده در آزمون پمپاژ در آبخوان آزاد نیاز به داده‌های واقعی و انجام چندین آزمون پمپاژ وجود دارد. از این‌رو دشت بوشکان که یک آبخوان آزاد آبرفتی است، به عنوان منطقه مورد مطالعه جهت انجام محاسبات انتخاب شد.

رسوبات آبرفتی دشت بوشکان عمدتاً از فرسایش سازنده‌های آغاچاری، بختیاری و میشان که در اطراف دشت رخمون دارند، منشاء گرفته‌اند. به طور کلی، آبرفت دشت بوشکان به لحاظ ذخیره آب مناسب بوده و از قطب‌های کشاورزی استان بوشهر محسوب می‌شود. رسوبات این دشت عمدتاً رودخانه‌ای و سیلابی هستند که بر اساس لاگ زمین‌شناسی، چاه‌های اکتشافی و مشاهده‌ای از گراول، ماسه، سیلت و رس تشکیل شده‌اند. در حاشیه ارتفاعات، رسوباتی به صورت زمین لغزش و حرکات توده‌ای که عمدتاً در سازنده‌های مارنی ایجاد شده

جدول ۱. مشخصات چاه‌های مشاهده‌ای در دشت بوشکان

شماره چاه	X (UTM)	Y (UTM)	ضخامت اشباع آبخوان (m)	دبی پمپاژ (m ³ /d)	فاصله چاه مشاهده‌ای از چاه پمپاژ (m)	حداکثر افت (m)	حداکثر افت نسبت به ضخامت اشباع آبخوان (%)
۲	۵۷۲۷۹۴	۳۱۸۳۰۴۶	۷۳٫۶۵	۴۹۲٫۴۸	۱۰	۱٫۰۱	۱٫۳۷۱
۹	۵۷۱۳۰۰۱	۳۱۸۳۵۴۳	۵۴٫۳۵	۳۳۹٫۵۵۲	۱۱	۰٫۲۱	۰٫۳۸۶
۱۶	۵۷۸۲۶۲	۳۱۸۰۸۸۹	۳۴٫۴۵	۱۰۷۸٫۲۷۲	۱۳٫۷۵	۰٫۲۱	۰٫۶۰۹
۱۸	۵۶۵۰۲۹	۳۱۸۹۷۷۵	۲۹٫۸۴	۹۲۹٫۶۶۴	۱۱	۰٫۹۶	۳٫۲۱۷



شکل ۲. موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای در دشت بوشکان

نتایج

با توجه به این که آبخوان مورد مطالعه از نوع آزاد است، از نظر اصولی باید نتایج آزمون پمپاژ چاه‌های این آبخوان به کمک مدل‌های تحلیلی آبخوان آزاد مورد بررسی قرار گیرد. اما با توجه به اهداف این مقاله فرضیات مختلف در راستای امکان جایگزینی مدل تحلیلی آبخوان محبوس با مدل تحلیلی آبخوان آزاد مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

با توجه به جدول ۱ حداکثر افت نسبت به ضخامت اشباع آبخوان در چاه‌های مورد مطالعه ناچیز است (از ۰٫۳۸۶ درصد تا ۳٫۲۱۷ درصد). لذا بر اساس فرض (Stallman (1965 می‌توان از روش‌های مختلف حل جریان ناپایدار در آزمون پمپاژ آبخوان محبوس، به محاسبه ضرایب هیدرودینامیک این آبخوان آزاد با استفاده از نرم‌افزارهای Aqtesolv (Duffield, 2007) و Aquiferwin32 (Rumbaugh, and Rumbaugh, 2003) پرداخت (جدول ۲). (Todd and Mays (2007 نیز در کتابشان به فرض (Stallman (1965 اشاره کرده و حسین‌زاده و همکاران (۱۳۸۸) و اکبری‌پور و همکاران (۱۳۸۹) بر همین اساس به برآورد ضرایب هیدرودینامیک آبخوان‌های آزاد با روش‌های مرسوم آبخوان محبوس پرداخته‌اند. بر اساس محاسبات مدل تحلیلی Thies (1935) مقدار K_r از حداقل ۴٫۵۲ متر بر روز در چاه شماره ۲ تا حداکثر ۶۶٫۶۲ متر بر روز در چاه شماره ۱۶ تغییر می‌کند؛ در حالی که مقدار K_r بر اساس مدل تحلیلی (Cooper and Jacob (1946 از حداقل ۴٫۵۳ متر بر روز در چاه شماره ۲ تا حداکثر ۶۷٫۳۴ متر بر روز در چاه شماره ۱۶ تغییر می‌کند. همان طور که مشخص است، روش (Cooper and Jacob (1946 به مقدار اندکی K_r را بیشتر برآورد می‌کند که به دلیل کوچک‌تر در نظر گرفتن مقدار $W(u)$ است (معادله ۳). بر اساس محاسبات مدل تحلیلی Thies (1935) مقدار S از حداقل ۰٫۰۰۰۱۷ در چاه شماره ۲ تا حداکثر ۰٫۰۰۰۰۷ در چاه شماره ۱۶ تغییر می‌کند؛ در حالی که مقدار S بر اساس مدل تحلیلی (Cooper and Jacob (1946 از حداقل ۰٫۰۰۰۱۷ در چاه شماره ۲ تا حداکثر ۰٫۰۰۰۶۶ در چاه شماره ۱۶ تغییر می‌کند. همان طور که مشخص است، روش (Cooper and Jacob (1946 به مقدار اندکی S را کمتر برآورد می‌کند که به دلیل بزرگ‌تر در نظر گرفتن مقدار T است (معادله ۵).

همچنین ضرایب هیدرودینامیک آبخوان آزاد مورد مطالعه با اعمال اصلاحات (Jacob (1944 (معادله ۱) که در کتاب (Kruseman and Ridder (2000) نیز مورد اشاره قرار گرفته است، به روش‌های (Thies (1935) اصلاح شده و (Cooper & Jacob (1946) اصلاح شده با استفاده از نرم‌افزارهای Aqtesolv و Aquiferwin32 محاسبه شده و نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس محاسبات مدل تحلیلی (Thies (1935) اصلاح شده مقدار K_r از حداقل ۴٫۵۵ متر بر روز در چاه شماره ۲ تا حداکثر ۶۶٫۸۷۶ متر بر روز در چاه شماره ۱۶ تغییر می‌کند؛ در حالی که مقدار K_r بر اساس مدل تحلیلی Cooper

(1946) and Jacob اصلاح شده از حداقل ۴٫۵۷ متر بر روز در چاه شماره ۲ تا حداکثر ۶۷٫۶ متر بر روز در چاه شماره ۱۶ تغییر می‌کند. با توجه به جدول ۳ روش‌های (Thies (1935) و (Cooper and Jacob (1946) پس از اصلاح به مقدار اندکی K_r را بیشتر برآورد می‌کند که به دلیل کوچک‌تر در نظر گرفتن مقدار S است (معادلات ۱ و ۳). بر اساس محاسبات مدل تحلیلی Thies (1935) اصلاح شده مقدار S از حداقل ۰٫۰۰۰۱۷ در چاه شماره ۲ تا حداکثر ۰٫۰۰۰۰۷ در چاه شماره ۱۶ تغییر می‌کند؛ در حالی که مقدار S بر اساس مدل تحلیلی (Cooper and Jacob (1946) اصلاح شده از حداقل ۰٫۰۰۰۱۷ در چاه شماره ۲ تا حداکثر ۰٫۰۰۰۶۶ در چاه شماره ۱۶ تغییر می‌کند. با توجه به جدول ۳ روش‌های (Thies (1935) و (Cooper and Jacob (1946) پس از اصلاح به مقدار اندکی S را کمتر برآورد می‌کند که به دلیل بزرگ‌تر در نظر گرفتن مقدار T است (معادله ۵).

محاسبه ضرایب هیدرودینامیک آبخوان آزاد دشت بوشکان بر اساس آزمون‌های پمپاژ انجام شده با روش‌های (Neuman (1972)، (Moench (1997) و (Tartakovsky and Neuman (2007) که با فرض آبخوان آزاد تنظیم شده‌اند، با استفاده از نرم‌افزارهای Aqtesolv و Aquiferwin32 در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس محاسبات مدل تحلیلی (Neuman (1972) مقدار K_r از حداقل ۱٫۲۱۷ متر بر روز در چاه شماره ۹ تا حداکثر ۳۰٫۰۴ متر بر روز در چاه شماره ۱۶ تغییر می‌کند و بر اساس محاسبات مدل تحلیلی (Moench (1997) مقدار K_r از حداقل ۲٫۹ متر بر روز در چاه شماره ۹ تا حداکثر ۲۰٫۷۶۶ متر بر روز در چاه شماره ۱۶ تغییر می‌کند؛ در حالی که مقدار K_r بر اساس مدل تحلیلی (Tartakovsky and Neuman (2007) از حداقل ۲٫۸۱۷ متر بر روز در چاه شماره ۹ تا حداکثر ۲۴٫۳ متر بر روز در چاه شماره ۱۶ تغییر می‌کند. بررسی لاگ حفاری این چاه‌ها نیز سهم بیشتر لایه‌های حاوی رسوبات ریزدانه را در چاه‌های شماره ۲، ۹ و ۱۸ نسبت به چاه شماره ۱۶ نشان می‌دهد به نحوی که در چاه‌های شماره ۲، ۹، ۱۸ و ۱۶ ضخامت لایه‌های حاوی رسوبات ریزدانه به ترتیب ۸۲٫۸۲، ۲۹٫۴۳، ۷۵٫۴۷ و ۱۰٫۰۵ درصد است (شکل‌های ۳ و ۴) و نتایج به‌دست آمده با فرض آبخوان آزاد را تأیید می‌کنند. مقایسه مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده به روش‌های (Neuman (1972)، (Moench (1997) و (Tartakovsky and Neuman (2007) با مقدار متوسط آن‌ها تا ۷۴ درصد اختلاف از مقدار متوسط هدایت هیدرولیکی محاسبه شده با فرض آبخوان آزاد را نشان می‌دهد، ولی مقایسه مقدار متوسط روش‌های مربوط به آبخوان محبوس یا روش‌های اصلاح شده آبخوان محبوس با مقدار متوسط روش‌های مربوط به آبخوان آزاد تا ۴۴۵ درصد اختلاف دارند. بنابراین روش‌های مربوط به محاسبه ضرایب هیدرودینامیک آبخوان آزاد یکدیگر را تأیید می‌کنند و با روش‌های دیگر اختلاف زیادی دارند.

جدول ۲. نتایج حاصل از محاسبات مربوط به ضرایب هیدرودینامیک آبخوان آزاد با استفاده از روش‌های حل جریان ناپایدار در آزمون پمپاژ آبخوان محبوس

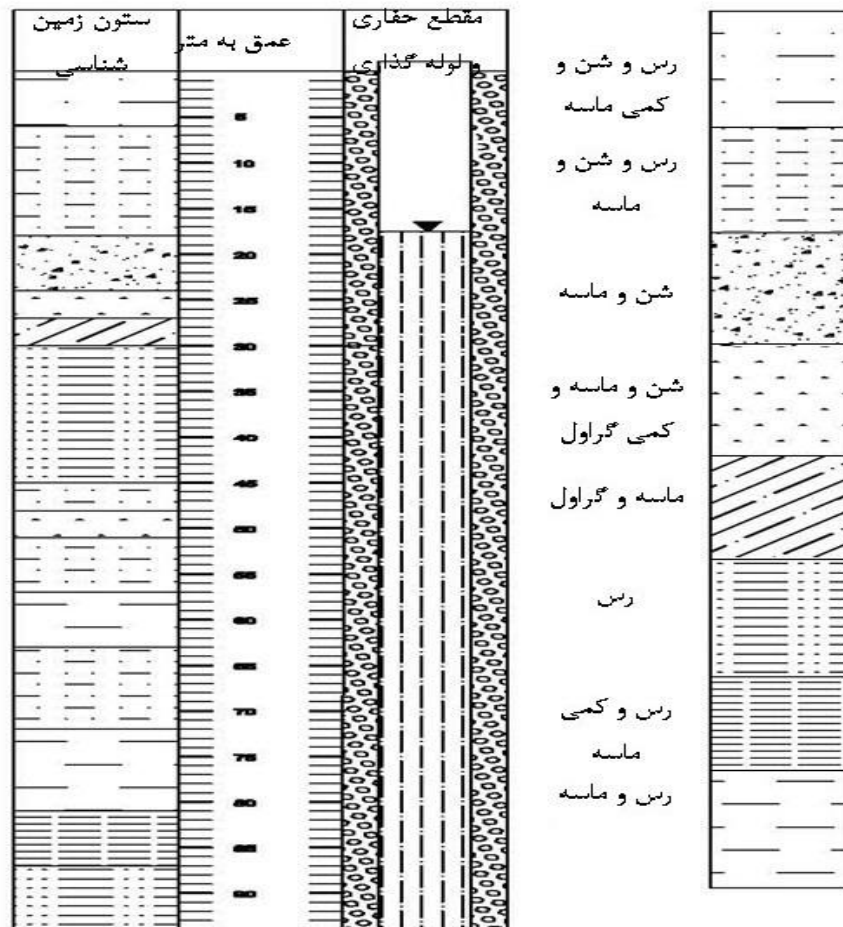
شماره چاه	روش محاسبه	نحوه محاسبه	S	K_r (m/d)	T (m^2/d)
۲	Thies (1935)	Aqtesolv	۰,۰۰۰۱۷	۴,۵۲	۳۳۳
		Aquiferwin32	۰,۰۰۰۱۷	۴,۵۲	۳۳۳,۰۱۷
	Cooper & Jacob (1946)	Aqtesolv	۰,۰۰۰۱۷	۴,۵۳	۳۳۳,۸
		Aquiferwin32	۰,۰۰۰۱۷	۴,۵۳	۳۳۳,۴۰۵
متوسط					
۹	Thies (1935)	Aqtesolv	۰,۰۰۳۸	۱۵,۲۵	۸۲۸,۹
		Aquiferwin32	۰,۰۰۳۸	۱۵,۲۳	۸۲۷,۹۸۵
	Cooper & Jacob (1946)	Aqtesolv	۰,۰۰۳۶	۱۵,۴۵	۸۳۹,۹
		Aquiferwin32	۰,۰۰۳۶	۱۵,۴۵	۸۳۹,۶۸۹
متوسط					
۱۶	Thies (1935)	Aqtesolv	۰,۰۰۷۰	۶۶,۶۱۵	۲۲۹۴,۹
		Aquiferwin32	۰,۰۰۷۰	۶۶,۶۲	۲۲۹۵,۱۲
	Cooper & Jacob (1946)	Aqtesolv	۰,۰۰۶۶	۶۷,۳۴	۲۳۲۰
		Aquiferwin32	۰,۰۰۶۶	۶۷,۲۶۸	۲۳۱۷,۴۱
متوسط					
۱۸	Thies (1935)	Aqtesolv	۰,۰۰۵۲	۷,۶۷	۲۲۸,۹
		Aquiferwin32	۰,۰۰۵۲	۷,۶۷	۲۲۸,۸۹۴
	Cooper & Jacob (1946)	Aqtesolv	۰,۰۰۴۱	۸,۵۴	۲۵۴,۹
		Aquiferwin32	۰,۰۰۴۱	۸,۵۳	۲۵۴,۵۶۴
متوسط					
			۰,۰۰۴۶۵	۸,۱۰۴	۲۴۱,۸۱

جدول ۳. نتایج حاصل از محاسبات مربوط به ضرایب هیدرودینامیک آبخوان آزاد با استفاده از روش‌های Thies (1935) اصلاح شده و Cooper and Jacob (1946) اصلاح شده

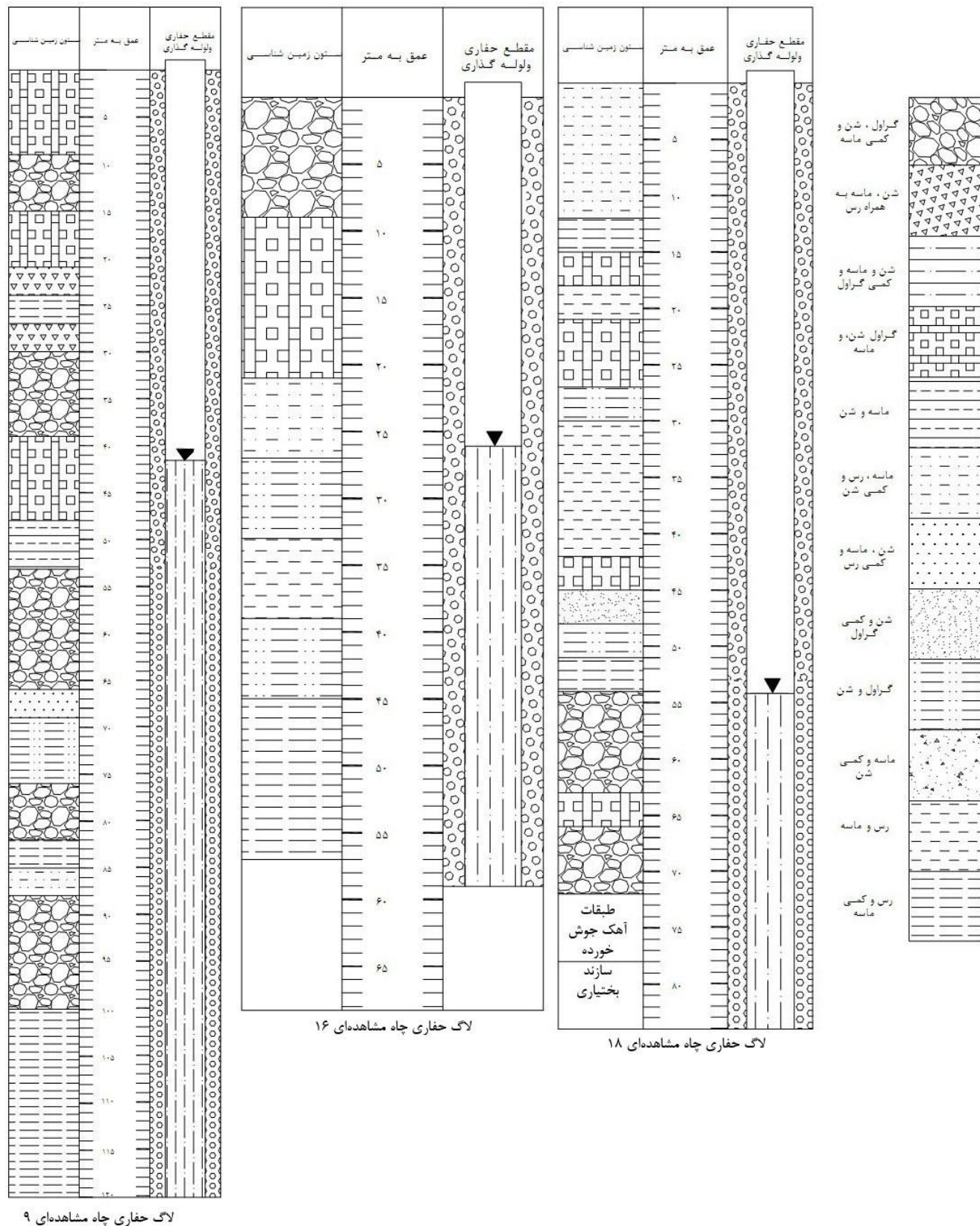
شماره چاه	روش محاسبه	نحوه محاسبه	S	K_r (m/d)	T (m^2/d)
۲	Thies (1935) اصلاح شده	Aqtesolv	۰,۰۰۰۱۷	۴,۵۶	۳۳۶,۲
		Aquiferwin32	۰,۰۰۰۱۷	۴,۵۵	۳۳۵,۳۶
	Cooper & Jacob (1946) اصلاح شده	Aqtesolv	۰,۰۰۰۱۷	۴,۵۷	۳۳۷
		متوسط			
۹	Thies (1935) اصلاح شده	Aqtesolv	۰,۰۰۳۸	۱۵,۲۹	۸۳۱,۲
		Aquiferwin32	۰,۰۰۳۶	۱۵,۴۷	۸۴۰,۹۲۷
	Cooper & Jacob (1946) اصلاح شده	Aqtesolv	۰,۰۰۳۵	۱۵,۶۹	۸۵۲,۹
		متوسط			
۱۶	Thies (1935) اصلاح شده	Aqtesolv	۰,۰۰۷	۶۶,۸۷۶	۲۳۰۳,۹
		Aquiferwin32	۰,۰۰۷	۶۶,۷۱	۲۲۹۸,۲
	Cooper & Jacob (1946) اصلاح شده	Aqtesolv	۰,۰۰۶۶	۶۷,۶	۲۳۲۸,۷
		متوسط			
۱۸	Thies (1935) اصلاح شده	Aqtesolv	۰,۰۰۵۲	۷,۸۶	۲۳۴,۷
		Aquiferwin32	۰,۰۰۵۲	۷,۷۲	۲۳۰,۶۰۱
	Cooper & Jacob (1946) اصلاح شده	Aqtesolv	۰,۰۰۴۱	۸,۷۲	۲۶۰,۲
		متوسط			
			۰,۰۰۴۸۳	۸,۱۰۴	۲۴۱,۸۳

جدول ۴. ضرایب هیدرودینامیک آبخوان آزاد به روش‌های (Neuman (1972)، Moench (1997) و Tartakovsky and Neuman (2007)

شماره چاه	روش محاسبه	نحوه محاسبه	η	S_y	S	K_r (m/d)	T (m ² /d)
۲	Neuman (1972)	Aqtesolv	۰,۰۰۰۲۴	۰,۰۱۱۷	۰,۰۰۰۲۷	۳,۷۷	۲۷۷,۵
		Aquiferwin32	۰,۰۰۰۲۴	۰,۰۱۱۸	۰,۰۰۰۲۷	۳,۷۷	۲۷۷,۶۱۲
	Moench (1997)	Aqtesolv	7.572E-5	۰,۰۱۱۴	۰,۰۰۰۱۸	۴,۰۸	۳۰۰,۴
	Tartakovsky & Neuman (2007)	Aqtesolv	7.558E-5	۰,۵	۰,۰۰۰۱۹	۴,۲	۳۰۹,۷
	متوسط		۰,۰۰۰۱۵۸	۰,۱۳۳۷	۰,۰۰۰۲۳	۳,۹۵۵	۲۹۱,۳۰۳
۹	Neuman (1972)	Aqtesolv	۰,۶۱	۰,۵	۰,۰۰۰۳۹	۱,۶۸	۹۱,۱۹
		Aquiferwin32	۰,۸۶	۰,۶۰۴	۰,۰۰۰۳۳	۱,۲۱۷	۶۶,۱۵
	Moench (1997)	Aqtesolv	۰,۲۷	۰,۳۵	۰,۰۰۰۳۹	۲,۹	۱۵۷,۸
	Tartakovsky & Neuman (2007)	Aqtesolv	۰,۲۸۵۵	۰,۴۱	۰,۰۰۰۵	۲,۸۱۷	۱۵۳,۱
	متوسط		۰,۵۰۶۴	۰,۴۶۶	۰,۰۰۰۴	۲,۱۵۴	۱۱۷,۰۶
۱۶	Neuman (1972)	Aqtesolv	۰,۰۵۳	۰,۵	۰,۰۰۰۹۲	۳۰,۰۴	۱۰۳۵
		Aquiferwin32	۰,۰۲	-	۰,۰۰۰۹۱	۱۶,۳۲۸	۵۶۲,۵
	Moench (1997)	Aqtesolv	۰,۱۲۷۹	۰,۵	۰,۰۰۰۹۰	۲۰,۷۶۶	۷۱۵,۴
	Tartakovsky & Neuman (2007)	Aqtesolv	۰,۱۲۷۴۴	۰,۵	۰,۰۰۰۸۳	۲۴,۳	۸۳۷,۴
	متوسط		۰,۰۱۲۷	۰,۵	۰,۰۰۰۸۹	۲۲,۸۶۱	۷۸۷,۵۷۵
۱۸	Neuman (1972)	Aqtesolv	۰,۰۲۶۵	۰,۶۳۸۶	۰,۰۰۰۴۱	۲,۳۹	۷۱,۲۹
		Aquiferwin32	۰,۰۲۵۰	-	۰,۰۰۰۴۲	۲,۴۷	۷۳,۷۳
	Moench (1997)	Aqtesolv	۰,۰۱۲۹	۰,۵	۰,۰۰۰۳۶	۳,۵۵	۱۰۶
	Tartakovsky & Neuman (2007)	Aqtesolv	۰,۰۲۷۱۸	۰,۵	۰,۰۰۰۳۸	۶,۵۳	۱۹۵
	متوسط		۰,۰۱۶۷۸	۰,۵۴۶۲	۰,۰۰۰۳۹	۳,۷۳۷	۱۱۱,۵۰۵



شکل ۳. لاگ حفاری چاه مشاهده‌ای شماره ۲



شکل ۴. لاگ حفاری چاه‌های مشاهده‌ای شماره ۹، ۱۶ و ۱۸

بحث

نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که به‌طور کلی برآورد هدایت هیدرولیکی آبخوان آزاد با استفاده از روش‌های مربوط به آبخوان محبوس و یا روش‌های اصلاح شده آبخوان محبوس باعث می‌شود هدایت هیدرولیکی بزرگ‌تر از مقدار واقعی نشان داده شود. همچنین تفاوت در محاسبات نرم‌افزارهای مختلف به دلیل تفاوت در نحوه انطباق منحنی افت-زمان با منحنی شاخص است. با توجه به این که مدل تحلیلی (Thies 1935) در رابطه با آبخوان‌های محبوس و مدل تحلیلی (Neuman 1972) در رابطه با آبخوان‌های آزاد سابقه بیشتری دارند و بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ادامه نتایج فرضیات و روش‌های مختلف استفاده شده در این مقاله با این دو مدل سنجیده می‌شوند.

جهت ارزیابی دقت فرض (Stallman 1965) هدایت هیدرولیکی محاسبه شده با فرض آبخوان محبوس (روش (Thies 1935) و آزاد (روش (Neuman 1972) از جداول ۲ و ۴ استخراج شده و در جدول ۵ ارائه شده است.

نمودار تغییرات درصد افت نسبت به ضخامت اشباع آبخوان بر حسب نسبت هدایت هیدرولیکی به روش (Thies 1935) (فرض آبخوان محبوس) به هدایت هیدرولیکی به روش (Neuman 1972) (فرض آبخوان آزاد) در شکل ۵ رسم شده است. همان‌طور که از این شکل برمی‌آید، هیچ ارتباط معناداری بین درصد افت نسبت به ضخامت اشباع آبخوان و نزدیک بودن هدایت هیدرولیکی محاسبه شده با فرض محبوس و آزاد به یکدیگر وجود ندارد؛ در حالی که بر اساس فرض (Stallman 1965) انتظار می‌رفت که با کاهش افت نسبت به ضخامت اشباع آبخوان، هدایت هیدرولیکی محاسبه شده به روش (Thies 1935) (فرض آبخوان محبوس) و (Neuman 1972) (فرض آبخوان آزاد) به‌طور مشخصی به یکدیگر نزدیک شوند ($K_r \text{ Theise} / K_r \text{ Neuman} \rightarrow 1$). شکل ۶ نیز نشان می‌دهد که هیچ ارتباط معناداری بین تغییرات ضخامت اشباع آبخوان و نزدیک بودن مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده با فرض آبخوان محبوس (روش (Thies 1935) و آزاد (روش (Neuman 1972) به یکدیگر وجود ندارد. به‌طوری که با افزایش ضخامت آبخوان، هدایت هیدرولیکی محاسبه شده به روش‌های (Thies 1935) و (Neuman 1972) به‌طور معنی‌داری به یکدیگر نزدیک نمی‌شوند ($K_r \text{ Theise} / K_r \text{ Neuman} \rightarrow 1$) که بر اساس فرض (Stallman 1965) انتظار می‌رفت با افزایش ضخامت اشباع آبخوان نیز این دو روش به یکدیگر نزدیک شوند.

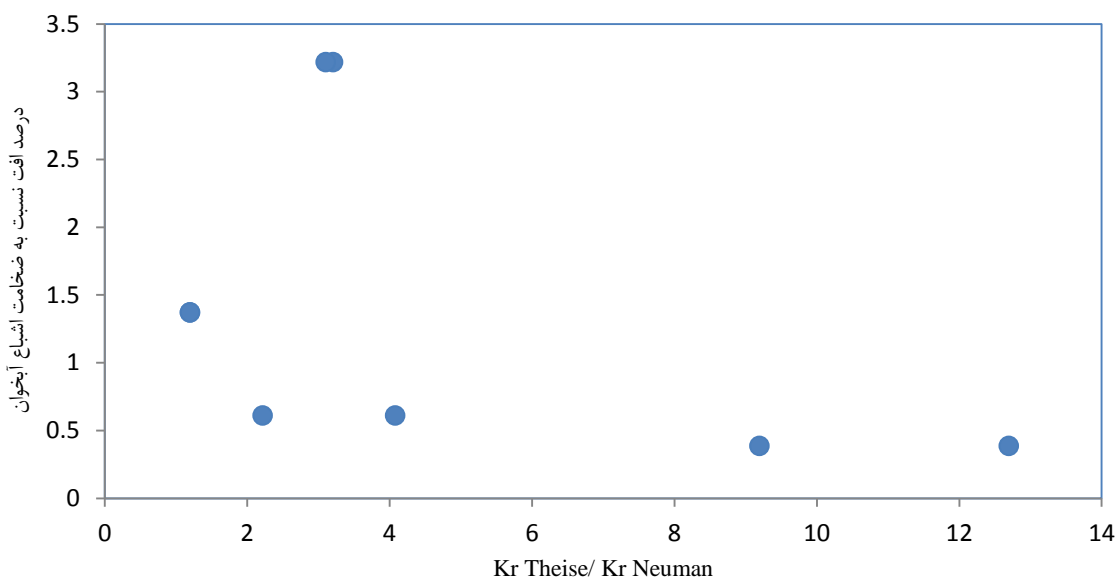
در بررسی پارامترهای دیگر، شکل ۷ نشان می‌دهد که هیچ روند مشخصی بین افزایش یا کاهش فاصله از چاه پمپاژ و نزدیک بودن مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده با فرض آبخوان محبوس (روش (Thies

(1935)) و آزاد (روش (Neuman 1972) به یکدیگر وجود ندارد. بر این اساس با افزایش یا کاهش فاصله چاه مشاهده‌ای اندازه‌گیری مقادیر افت-زمان از مرکز چاه پمپاژ، مقدار هدایت هیدرولیکی محاسبه شده به روش Thies (1935) (فرض آبخوان محبوس) و (Neuman 1972) (فرض آبخوان آزاد) به‌طور پیوسته به یکدیگر نزدیک نمی‌شوند ($K_r \text{ Theise} / K_r \text{ Neuman} \rightarrow 1$).

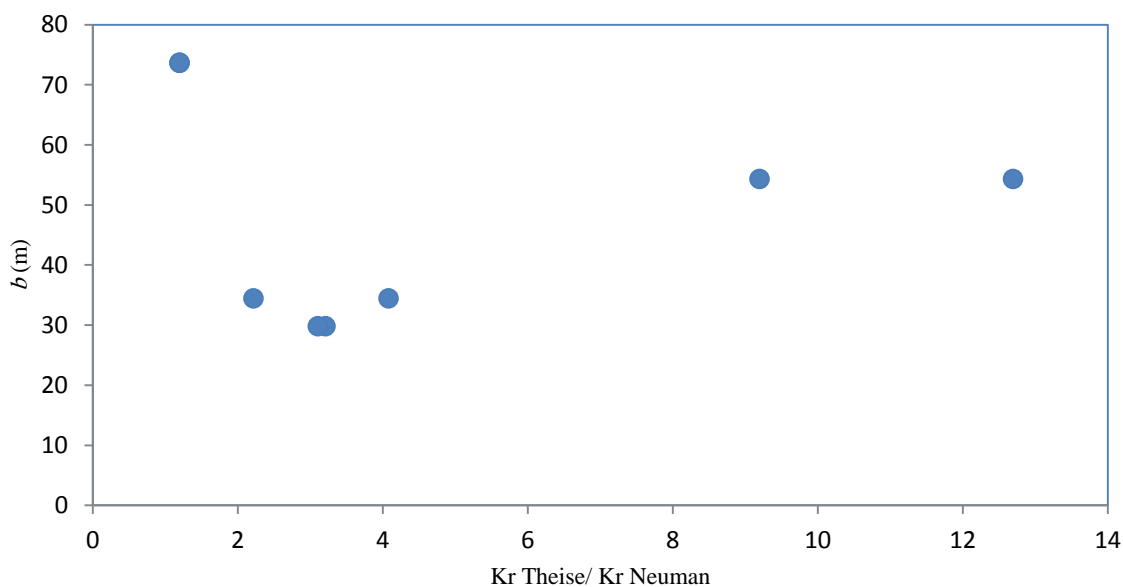
در مرحله آخر نمودار تغییرات η (معادله ۹) در مقابل نسبت هدایت هیدرولیکی محاسبه شده به روش (Thies 1935) (فرض آبخوان محبوس) به روش (Neuman 1972) (فرض آبخوان آزاد) ترسیم شده است (شکل ۸) که بر اساس آن ارتباط معناداری بین مقادیر η و مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده با فرض آبخوان محبوس (روش (Thies 1935) و آزاد (روش (Neuman 1972)) به یکدیگر وجود دارد. چنانچه هرچه η کوچک‌تر باشد مقادیر محاسبه شده هدایت هیدرولیکی آبخوان آزاد با استفاده از روش‌های مربوط به آبخوان محبوس خطای کمتری دارد. این موضوع مطابق با تئوری ارائه شده از سوی (Neuman 1972) نیز می‌باشد و همان‌طور که از شکل ۱ برمی‌آید، هرچه مقدار η کوچک‌تر شود منحنی مربوط به محاسبه هدایت هیدرولیکی به روش (Neuman 1972) (فرض آبخوان آزاد) به منحنی مربوط به محاسبه هدایت هیدرولیکی به روش (Thies 1935) (فرض آبخوان محبوس) نزدیک‌تر می‌شود. با توجه به مفهوم η (معادله ۹) می‌توان نتیجه گرفت اگرچه بزرگ‌تر بودن ضخامت اشباع آبخوان (b) شرط لازم برای کوچک شدن η و در نتیجه کاهش خطای محاسبه ضرایب هیدرودینامیک آبخوان آزاد با استفاده از روش‌های مربوط به آبخوان محبوس است، ولی برخلاف نظر Stallman (1965) شرط کافی نیست، زیرا اولاً قابل استفاده بودن روش‌های مربوط به آبخوان محبوس جهت آبخوان آزاد به کوچک بودن η بستگی دارد که مقدار آن برابندی از سه عامل ضخامت اشباع آبخوان (b)، فاصله چاه مشاهده‌ای از چاه پمپاژ (r) و نسبت ناهم‌سویی هدایت هیدرولیکی عمودی به افقی (K_z/K_r) است و ثانیاً با توجه به جدول ۵ و شکل‌های ۵ و ۶ به‌طور مثال برای چاه شماره ۹ با درصد افت نسبت به ضخامت اشباع آبخوان ۰٫۳۸۶ درصد که درصد افت نسبت به ضخامت اشباع آبخوان آن از درصد افت نسبت به ضخامت اشباع آبخوان‌های شماره ۲، ۱۶ و ۱۸ کمتر است و ضخامت ۵۴٫۳۵ متر که ضخامت آن از ضخامت چاه‌های شماره ۱۶ و ۱۸ بیشتر است، محاسبه هدایت هیدرولیکی به روش (Neuman 1972) (فرض آبخوان آزاد) با نرم‌افزار Aquiferwin32 و Aqtesolv به ترتیب برابر ۱٫۶۸ و ۱٫۲۱۷ متر بر روز و به روش (Thies 1935) (فرض آبخوان محبوس) برابر ۱۵٫۴۵ متر بر روز است که حکایت از تطابق کمتر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده با فرض آبخوان محبوس و آزاد برای چاه شماره ۹ و خطای ۸۲۰ تا ۱۱۶۹ درصدی دارد.

جدول ۵. هدایت هیدرولیکی آبخوان آزاد با افت ناچیز به دو روش مرسوم Thies (1935) و Neuman (1972)

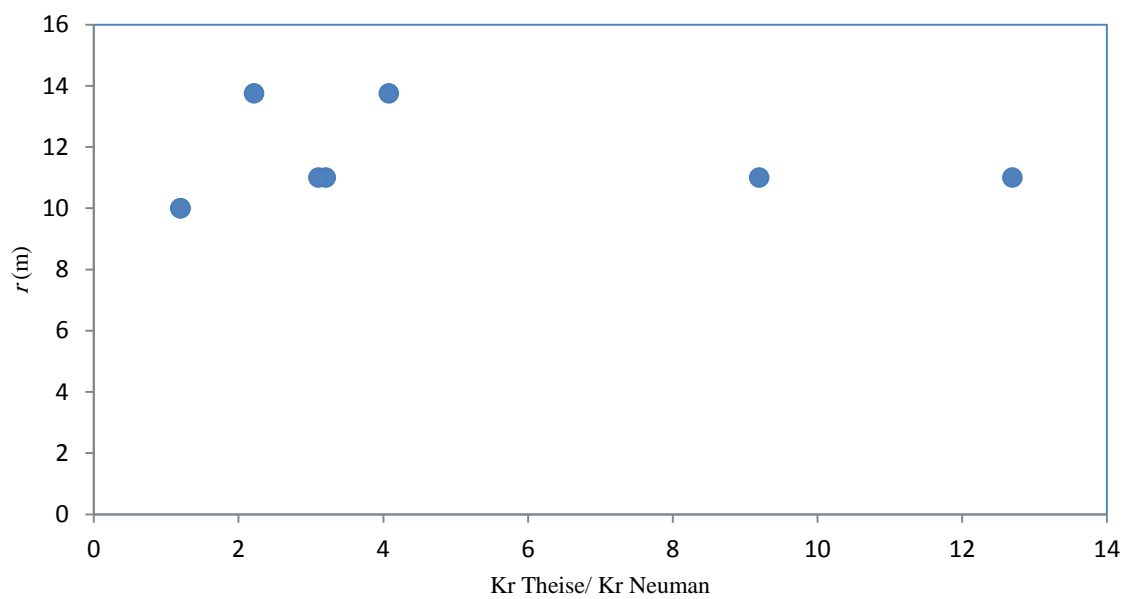
η	درصد خطا	K_r Theise/ K_r Neuman	K_r Theise	K_r Neuman	نحوه محاسبه	شماره چاه
۰.۰۰۰۰۲۴	۱۹.۹	۱.۱۹۹	۴.۵۲	۳.۷۷	Aqtesolv	۲
۰.۰۰۰۰۲۴	۱۹.۹	۱.۱۹۹	۴.۵۲	۳.۷۷	Aquiferwin32	
۰.۶۱	۸۱۹.۶	۹.۱۹۶	۱۵.۴۵	۱.۶۸	Aqtesolv	۹
۰.۸۶	۱۱۶۹.۵	۱۲.۶۹۵	۱۵.۴۵	۱.۲۱۷	Aquiferwin32	
۰.۰۵۳	۱۲۱.۸	۲.۲۱۸	۶۶.۶۱۵	۳۰.۰۴	Aqtesolv	۱۶
۰.۲	۳۰.۸	۴.۰۸۰	۶۶.۶۲	۱۶.۳۲۸	Aquiferwin32	
۰.۲۶۵	۲۲۰.۹	۳.۲۰۹	۷.۶۷	۲.۳۹	Aqtesolv	۱۸
۰.۲۵	۲۱۰.۵	۳.۱۰۵	۷.۶۷	۲.۴۷	Aquiferwin32	



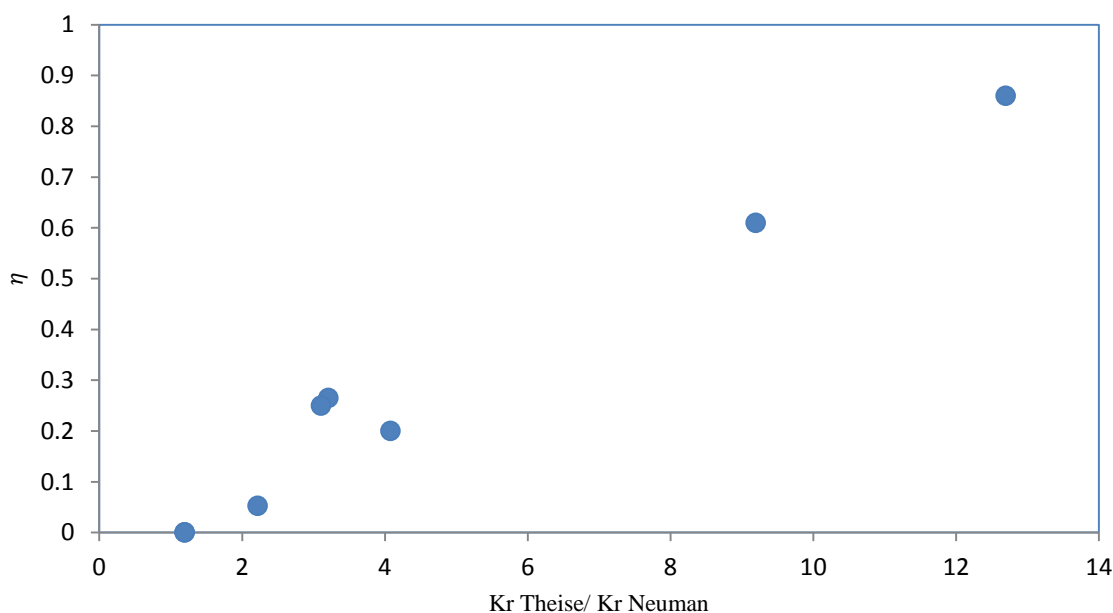
شکل ۵. نمودار تغییرات درصد افت نسبت به ضخامت اشباع آبخوان بر حسب نسبت هدایت هیدرولیکی به روش Thies (1935) (فرض آبخوان محبوس) به هدایت هیدرولیکی به روش Neuman (1972) (فرض آبخوان آزاد)



شکل ۶. نمودار تغییرات ضخامت اشباع آبخوان بر حسب نسبت هدایت هیدرولیکی به روش Thies (1935) (فرض آبخوان محبوس) به هدایت هیدرولیکی به روش Neuman (1972) (فرض آبخوان آزاد)



شکل ۷. نمودار تغییرات فاصله از چاه پمپاژ بر حسب نسبت هدایت هیدرولیکی به روش Thies (1935) (فرض آبخوان محبوس) به هدایت هیدرولیکی به روش Neuman (1972) (فرض آبخوان آزاد)



شکل ۸. نمودار تغییرات η بر حسب نسبت هدایت هیدرولیکی به روش Thies (1935) (فرض آبخوان محبوس) به هدایت هیدرولیکی به روش Neuman (1972) (فرض آبخوان آزاد)

نتیجه گیری

روش‌های مربوط به آبخوان محبوس یا روش‌های اصلاح شده آبخوان محبوس با مقدار متوسط روش‌های مربوط به آبخوان آزاد تا ۴۴۵ درصد اختلاف دارند. همچنین باید در نظر داشت با استفاده از این روش‌ها علاوه بر دقت در محاسبه هدایت هیدرولیکی افقی (K_r)، می‌توان آینده ویژه (S_r) و هدایت هیدرولیکی عمودی (K_z) را نیز محاسبه نمود.

نتایج این مقاله بیانگر این است که ضرایب هیدرودینامیک محاسبه شده بر اساس روش‌های Thies (1935) اصلاح شده، Cooper and Jacob (1946) اصلاح شده، Thies (1935) و Cooper & Jacob (1946) با هم شباهت زیادی دارند، ولی در مقابل اختلاف زیادی بین مقادیر محاسبه شده از این روش‌ها با نتایج محاسبه شده بر اساس مدل‌های تحلیلی آبخوان آزاد شامل روش‌های Neuman (1972)، Moench (1997) و Tartakovsky and Neuman (2007) وجود دارد. مقایسه مقادیر ارائه شده نشان می‌دهد که تأثیر اصلاحات انجام شده توسط Jacob (1944) روی مدل‌های تحلیلی Thies (1935) و Cooper and Jacob (1946) ناچیز است و با احتیاط می‌توان گفت که نمی‌توان از روش‌های Thies (1935) اصلاح شده و Cooper and Jacob (1946) اصلاح شده در آبخوان‌های آزاد استفاده کرد. براساس نتایج این مقاله می‌توان پیشنهاد کرد که تنها در حالتی محاسبه هدایت هیدرولیکی آبخوان آزاد با استفاده از مدل‌های تحلیلی آبخوان محبوس خطای کمی دارد که مقدار η (معادله ۹) که تابعی از مجموعه مقادیر نسبت ناهم‌سویی هدایت هیدرولیکی عمودی به افقی (K_z/K_r)، فاصله چاه مشاهده‌ای از چاه پمپاژ (r) و ضخامت اشباع آبخوان (b) است، کمتر از ۰,۰۰۱ شود (شکل ۱).

قدردانی

از شرکت سهامی آب منطقه‌ای بوشهر که داده‌های خام آزمون‌های پمپاژ و لاگ حفاری چاه‌های مربوطه را در اختیار گذاشتند، قدردانی می‌شود.

در این مقاله آزمون‌های پمپاژ با دبی ثابت در دشت بوشکان که یک آبخوان آزاد آبرفتی است، در ۴ حلقه چاه پمپاژ انجام و اطلاعات افت-زمان در چاه‌های مشاهده‌ای مربوطه جهت ارزیابی محاسبه ضرایب هیدرودینامیک آبخوان مورد مطالعه بر اساس مدل‌های تحلیلی با فرض آبخوان محبوس و آزاد مورد استفاده قرار گرفته است.

هدایت هیدرولیکی چاه شماره ۲ به روش Thies (1935) (فرض آبخوان محبوس) و روش Neuman (1972) (فرض آبخوان آزاد) به ترتیب برابر ۴,۵۲ متر بر روز و ۳,۷۷ متر بر روز برآورد شده است. هدایت هیدرولیکی چاه شماره ۹ به روش Thies (1935) ۱۵,۴۵ متر بر روز و به روش Neuman (1972) با استفاده از نرم‌افزار Aqtesolv ۱,۶۸ متر بر روز و با استفاده از نرم‌افزار Aquiferwin32 ۱,۲۱۷ متر بر روز است. لذا، محاسبه هدایت هیدرولیکی آبخوان آزاد با استفاده از معادلات مربوط به آبخوان محبوس، در منطقه مورد مطالعه از ۱۲ تا ۱۱۶۹ درصد خطا دارد (جدول ۵)، یعنی اگر بدون توجه به مقدار η و صرفاً با توجه به کم بودن افت در چاه مشاهده‌ای یا زیاد بودن ضخامت آبخوان یا کم بودن فاصله از چاه پمپاژ مقدار هدایت هیدرولیکی آبخوان آزاد تقریباً برابر هدایت هیدرولیکی همان آبخوان در حالت محبوس در نظر گرفته شود و از رابطه Thies (1935) به دست آید می‌تواند تا مقدار ۱۱۶۹ درصد خطا ایجاد کند که در نتایج محاسبات منابع آب که هدایت هیدرولیکی در آن‌ها نقش مهمی دارد، مثل بیلان و مدل آب‌های زیرزمینی تأثیر زیادی دارد.

روش‌های Neuman (1972)، Moench (1997) و Tartakovsky and Neuman (2007) نتایج تقریباً مشابهی ارائه داده‌اند و یکدیگر را تأیید می‌کنند به طوری که اختلاف مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده به وسیله هر یک از آن‌ها با مقدار متوسط آن‌ها تا ۷۴ درصد می‌رسد، ولی مقایسه مقدار متوسط

منابع

- Jacob, C.E., 1944, Notes on determining permeability by pumping tests under watertable conditions, USGS Open File Report, In: USGS Water Supply Paper 1536-I, 1963, pp. 245-271.
- Kruseman, G.P., and de Ridder, N.A., 2000, Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, Second Edition, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands.
- Moench, A.F., 1997, Flow to a well of finite diameter in a homogeneous, anisotropic water-table aquifer, *Water Resources Research*, vol. 33, no. 6, pp. 1397-1407.
- Neuman, S.P., 1972, Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response of the water table, *Water Resources Research*, vol. 8, no. 4, pp. 1031-1045.
- Rumbaugh, D.B and Rumbaugh, J.O., 2003, *AquiferWin32 Version 3 Guide to Using, Environmental Simulations, Inc., New York.*
- Stallman, R. W., 1965, Effects of water table conditions on water level changes near pumping wells, *Water Resour. Res.*, 1(2), 295-312, doi:10.1029/WR001i002p00295
- Tartakovsky, G.D. and Neuman, S.P., 2007, Three-dimensional saturated-unsaturated flow with axial symmetry to a partially penetrating well in a compressible unconfined aquifer, *Water Resources Research*, W01410, doi: 1029/2006WR005153.
- Theis, C.V., 1935, The lowering of the piezometric surface and the rate and discharge of a well using ground-water storage. *Transactions, American Geophysical Union*, 16:519-24.
- Todd, D.K and Mays, L.W., 2007, *Groundwater Hydrogeology*, 3rd ed. John Wiley & Sons, New York.
- Walton, W.C., 1988, *Practical Aspects of Ground Water Modeling*, Third edition.
- اکبرپور، ابولفضل، آقاسینعلی شیرازی، محسن، عزیزی، محسن و اعتباری، بهروز، ۱۳۸۹، مقایسه روش‌های تاپس، ژاکوب، برگشت تاپس و هانتوش در تعیین ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان‌های آزاد (مطالعه موردی دشت مختاران در استان خراسان جنوبی)، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
- بهرامی، مازیار و حسینی، سید محمود، ۱۳۸۹، بررسی تأثیرپذیری نتایج مدل‌های تحلیل آزمایش‌های پمپاژ از برخی فرضیات اعمالی در آن‌ها، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
- بهرامی، مازیار و حسینی، سید محمود، ۱۳۸۹، ارزیابی عملکرد مدل تحلیلی نیومن و نرم‌افزار PMWIN در پیش‌بینی جریان در آکیفرهای آزاد، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
- حسین‌زاده، مهدی، آزادی‌جو، امید، آل‌بهبهانی، مجتبی و مشیری، محمد، ۱۳۸۸، محاسبه و برآورد ضریب قابلیت انتقال با استفاده از روش پاپادوپولوس- کوپر و دانه‌سنجی (مطالعه موردی دشت بوشکان)، نخستین کنفرانس سراسری آب‌های زیرزمینی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بهبهان، بهبهان
- رشیدی، محمد حسین و یوسفی، منوچهر، ۱۳۸۳، راهنمای پمپاژ و برداشت مجاز از مخازن آب در سازندهای سخت، نشریه شماره ۱۴۷- ن، شرکت مدیریت منابع آب ایران، معاونت پژوهش و مطالعات پایه، دفتر استاندارها و معیارهای فنی
- Bear, j., 1979, *Hydraulics of Groundwater*. McGraw-Hill, New York, 569p
- Cooper, H.H. and Jacob, C.E., 1946, A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, *Am. Geophys. Union Trans.*, vol. 27, pp. 526-534.
- Duffield, G.M., 2007, *AQTESOLV for Windows Version 4.5 User's Guide*, HydroSOLVE, Inc., Reston, VA.
- Fitts, C.R., 2002, *Groundwater Science*. Academic Press, New York, 450p.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979, *GROUNDWATER*, Prentice-Hall.