

بررسی روش‌های تفسیر پمپاژ پله‌ای تک چاهی برای محاسبه قابلیت انتقال آبخوان

فرهاد اسدیان^(*)، راحله هاتفی^۱، بهروز اعتباری^۲، بهزاد دلخواهی^۳، کمال خدائی^۴ و علی اکبر شهسواری^۴

۱. مربی پژوهش، پژوهشکده علوم پایه کاربردی، جهاد دانشگاهی
۲. کارشناس ارشد هیدروژئولوژی، شرکت آب منطقه‌ای خراسان جنوبی
۳. دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشگاه شهید بهشتی
۴. استادیار پژوهش، پژوهشکده علوم پایه کاربردی، جهاد دانشگاهی

تاریخ دریافت: ۹۱/۹/۲۹

تاریخ پذیرش: ۹۳/۴/۱

چکیده

با توجه به اینکه افت اندازه‌گیری شده در آزمون‌های تک - چاهی و در چاه پمپاژ، منعکس کننده افت آبخوان نبوده و در برگیرنده مجموعه عوامل خطی و غیرخطی ایجادکننده افت می‌باشد، محاسبات مبتنی بر افت مشاهده شده در چاه پمپاژ نمی‌تواند برآورد دقیقی از پارامترهای هیدرودینامیک آبخوان ارائه کند. ولی وقتی که یک تخمین ارزان و سریع از قابلیت انتقال آبخوان مورد نیاز باشد، استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از پمپاژ تک چاهی جزو گزینه‌های جذاب به شمار می‌آیند. روش‌های مختلفی برای برآورد مولفه‌های افت درون چاهی از سوی محققین مختلف پیشنهاد شده است. در این مطالعه با بررسی آزمون‌های پمپاژ انجام شده بر روی تعدادی از چاه‌های اکتشافی استان خراسان رضوی و جنوبی و به‌کارگیری داده‌های اندازه‌گیری شده در چاه پمپاژ و پیرومتر مجاور، روش‌های Eden-Hazel, Hantush-Biershenk, Kasinow, Miller-Weber و Karami-Younger برای محاسبه مولفه‌های افت در چاه و تصحیح داده‌های افت اندازه‌گیری شده در چاه پمپاژ (CQⁿ) برای محاسبه قابلیت انتقال آبخوان مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از به‌کارگیری روش‌های غیرمستقیم Eden-Hazel, Hantush-Biershenk, Kasinow و Miller-Weber اختلاف قابل توجهی با پارامترهای محاسبه شده به کمک داده‌های پیرومتری نشان می‌دهند. روش Karami-Younger در مجموع چاه‌های آنالیز شده قادر بوده تا مقدار CQⁿ را بطور میانگین با اختلاف ۲۵٪ محاسبه نماید. این در حالی است که دقت قابلیت انتقال برآورد شده به کمک تصحیح داده‌ها با یک افت چاه برآورد شده دقیق، لزوماً به محاسبه مقدار قابلیت انتقال قابل قبول منجر نمی‌شود. به عبارتی دیگر نتایج اجرای این روش در رسوبات با تراوایی زیاد که افت چاه در آنها کم می‌باشد از حساسیت بیشتری برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: پمپاژ تک - چاهی، افت چاه، قابلیت انتقال، آبخوان

مقدمه

برآورد میزان هزینه‌های لازم جهت تجهیز چاه می‌باشد. گستردگی تعداد چاه‌های بهره‌برداری در اغلب آبخوان‌ها و وجود داده‌های پمپاژ ثبت شده در آرشیو باعث شده تا یافتن روشی قابل اعتماد برای برآورد پارامترهای هیدرودینامیک آبخوان از طریق تحلیل

هدف اصلی آزمایش پمپاژ افت پله‌ای تک چاهی، تعیین مقدار آبدهی و افت سطح آب در چاه و همچنین تعیین ظرفیت مخصوص چاه (Q/s) جهت انتخاب پمپ و متعلقات مربوطه و

* نویسنده مرتبط farhad.asadian@gmail.com

تکمیل چاه ایجاد می‌شود. این افت برای مثال در برگرفته افت بار هیدرولیکی ناشی از مواد متراکم شده آبخوان در طول حفاری؛ افت ناشی از آبخوان مسدود شده توسط گل حفاری، که تراوایی مناطق مجاور گمانه چاه را کاهش می‌دهد؛ افت بار در صافی شنی؛ و افت بار در لوله جدار مشبک چاه می‌باشد. افت S_2 ناشی از افت خطی چاه را می‌توان به شکل $S_2 = B_2 Q$ مطرح نمود که در آن B_2 ضریب خطی افت چاه است. افت غیرخطی چاه شامل افت ناشی از اصطکاک در داخل لوله جدار چاه و لوله مکش که در آن جریان آشفته است و همچنین افت‌هایی است که در منطقه مجاور چاه در جایی که معمولاً جریان آشفته است اتفاق می‌افتد. افت S_3 مربوط به این افت چاه غیرخطی را می‌توان به صورت $S_3 = C Q^n$ بیان نمود که C در آن ضریب غیرخطی افت چاه بر حسب $T^n L^{3n-1}$ (و n یک توان) می‌باشد. معادله عمومی توصیف‌کننده افت در یک چاه پمپاژ به شکل تابعی از افت‌های آبخوان/چاه و تخلیه عبارت است از (Kruseman and De Ridder, 1990):

$$SW = S_1 + S_2 + S_3 = (B_1 + B_2)Q + CQ^n = BQ + CQ^n \quad (1)$$

در آزمون افت پله‌ای، پمپاژ با یک نرخ تخلیه ثابت کم شروع می‌شود تا افت در چاه تثبیت شود. سپس نرخ تخلیه به یک مقدار ثابت جدید افزایش می‌یابد تا یکبار دیگر افت تثبیت شود. نرخ پمپاژ معمولاً سه تا چهار بار در طول یک آزمون تغییر می‌کند و مدت هر دوره پمپاژ باید تقریباً مشابه با سایر دوره‌ها باشد. مقادیر سه پارامتر B ، C و n را می‌توان از نتایج آنالیز آزمون‌های افت پله‌ای بدست آورد. برای تحلیل آزمون‌های افت پله‌ای عموماً از ترسیمات تشخیصی استفاده می‌شود که در آنها مقادیر S_w/Q در مقابل Q بر روی یک کاغذ خطی رسم می‌شوند، که S_w بیانگر افت پایدار در انتهای هر گام می‌باشد. در صورتی که نقاط تشکیل یک خط افقی را دهند؛ یعنی $S_w/Q = B$ بدان معناست که افت غیرخطی چاه وجود ندارد ($c=0$). این موقعیت تنها در شرایط نرخ پمپاژ بسیار کم ایجاد می‌شود. با افزایش نرخ پمپاژ چاه به شکل متفاوتی رفتار خواهد کرد. در صورتی که نقاط با شیب یکسان تشکیل یک خط مستقیم دهند، بدان معنی است که $n=2$ می‌باشد. در چنین شرایطی (Jacob (1947 روشی تحلیلی را برای محاسبه B و C ارائه نموده است. بنابر روش Jacob در شرایطی که P مساوی 2 باشد، مقادیر افت $S_w(t)$ در مقابل زمان مربوطه t بر روی یک کاغذ نیمه لگاریتمی رسم می‌شود، با رسم مقادیر $S_w(n)/Q_n$ در مقابل مقادیر متناظر Q_n و برازش یک خط مستقیم بر روی نقاط ترسیم شده، شیب خط مستقیم $D(S_w/Q)/DQ$ بیان‌گر مقدار C و مقدار S_w/Q در محل تلاقی خط مستقیم تا محور $Q=0$ نشان‌دهنده مقدار B می‌باشد. روش Jacob را در هر آبخوانی با در نظر گرفتن شرایط می‌توان اعمال نمود. در صورتی که مقادیر افت‌ها در پایان هر پله ثابت نشد، از روش Hantush-Biershenk برای تصحیح $S_w(n)$ استفاده می‌شود.

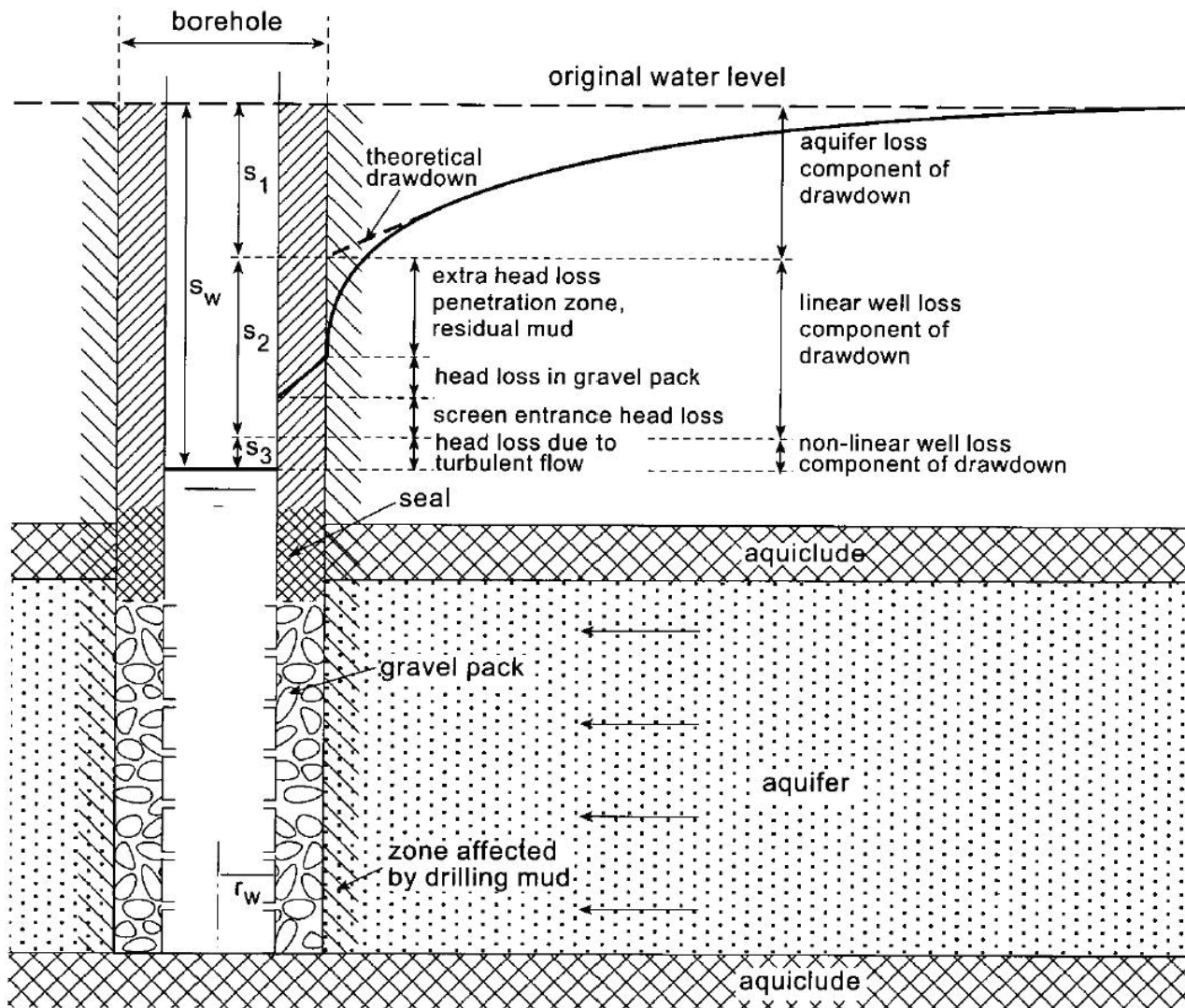
داده‌های تک چاهی مورد توجه قرار گیرد. با در نظر گرفتن محدودیت روش‌های تحلیلی در تفسیر دقیق داده‌های آزمون پمپاژ بدون حضور پیرومتر در انواع آبخوان‌ها شرایطی را فراهم می‌آورد که در صورت یافتن راه حلی قابل اعتماد برای برآورد خصوصیات هیدرودینامیک آبخوان به کمک آزمون‌های تک چاهی، ضمن اینکه از صرف هزینه زیاد برای انجام آزمون‌های پمپاژ پراکنده به روش استاندارد اجتناب می‌شود، میتوان ارزیابی کمی-کیفی دقیق تری از آبخوان بعمل آورد.

می‌توان انتظار داشت که، در صورتی که تصحیحات بر روی داده‌های مربوط به یکی از پله‌های آزمون افت پله‌ای صورت گیرد و اثر افت چاه از داده‌های افت-زمان ثبت شده حذف گردد، بتوان با دقت مناسبی پارامترهای هیدرودینامیک آبخوان را محاسبه نمود. خصوصاً این مرحله را می‌توان با دقت مناسبی به کمک روش عددی تخمین پارامتر محاسبه و اجرا نمود. تعدد پارامترهای مجهول رای محاسبه افت خطی و غیرخطی چاه پمپاژ و قابلیت عملی بودن به‌کارگیری برخی از این روش‌ها موجب شده تا استفاده از روش مستقیمی که بتواند برآوردهای قابل قبولی را به ساده‌ترین روش و با حداقل داده فراهم نماید از مزیت نسبی برخوردار باشد.

آزمون پمپاژ افت پله‌ای تک چاهی - تاریخچه و تئوری

پمپاژ تک چاهی آزمونی است که در آن از هیچ پیرومتری استفاده نمی‌شود و تغییرات تراز آب در طول پمپاژ و در پله‌های مختلف تنها در خود چاه اندازه‌گیری می‌گردد. در این شرایط افت در یک چاه پمپاژ شده صرفاً منعکس‌کننده افت آبخوان نبوده و تحت تاثیر افت‌های چاه¹ و ذخیره گمانه چاه² قرار می‌گیرد. افت در آبخوان، افت‌های خطی و غیرخطی چاه، افت ناشی از نفوذ ناقص چاه، ذخیره آب داخل گمانه، زهکشی تاخیری در آبخوان‌های آزاد و افت ناشی از زهکشی و خروج آب از رسوبات در آبخوان آزاد عوامل اصلی ایجادکننده افت چاه در آزمون پمپاژ می‌باشند. برای تجزیه و تحلیل یک آزمون تک چاهی لازم است مقادیر افت ناشی از جریان آشفته، تجهیزات داخل چاه و ذخیره گمانه چاه مشخص شده و تصحیحات لازم بر روی داده‌های افت - زمان اندازه‌گیری شده در چاه پمپاژ انجام گیرد. در مجموع، افت ایجاد شده در یک چاه پمپاژ در برگرفته دو مولفه است: افت مربوط به آبخوان و افت مربوط به چاه. افت آبخوان افت بار هیدرولیک است که در شرایطی که جریان خطی است اتفاق می‌افتد. این افت تابع زمان است و بصورت خطی با تخلیه چاه تغییر می‌کند. افت S_1 مربوط به این افت خطی آبخوان را می‌توان به صورت $S_1 = B_1 Q$ بیان نمود که در آن B_1 ضریب افت خطی آبخوان و r_w شعاع موثر چاه می‌باشد. این مولفه را می‌توان با استفاده از معادله جریان چاه مورد محاسبه قرار داد. افت چاه به دو مولفه خطی و غیرخطی افت بار تقسیم می‌شود. افت خطی چاه توسط آبخوان تخریب شده در طول حفاری و

1. Well losses
2. Wellbore storage



شکل ۱. مولفه‌های مختلف افت در یک چاه پمپاژ (Kruseman and De Ridder, 1990).

نمایش می‌دهند انتخاب و خط راستی را که بیشترین انطباق را با این نقاط دارد، ترسیم می‌شود. این خط تا پایان پله بعدی امتداد داده شده (برون یابی) و مقدار افزایش افت $DS_w(i)$ را برای هر پله با در نظر گرفتن اختلاف بین افت مشاهده شده در یک فاصله زمانی ثابت Dt که از ابتدای هر پله در نظر گرفته می‌شود تعیین می‌گردد. همچنین مقدار افت متناظر از روی خط مستقیم امتداد یافته از پله قبلی قرائت می‌شود و مقادیر $S_w(n)$ مربوط به تخلیه Q_n با استفاده از $S_w(n) = DS_w(1) + DS_w(2) + \dots + DS_w(N)$ تعیین می‌گردد (در شرایطی که $n=1,2,\dots,N$ می‌باشد و N تعداد پله‌ها می‌باشد) (Kruseman and De Ridder, 1990).

روش Eden-Hazel (1973) با در نظر گرفتن تغییر عامل افت آبخوان در طول زمان ارائه شده است. Hazel (1973) روشی را پیشنهاد کرده است که تغییرات زمان را در نظر می‌گیرد. در هر آزمون افت پله‌ای تنها داده‌های اولین پله افت واقعی مربوط به تخلیه مشخص شده در آن گام می‌باشند. برای پله‌های بعدی منحنی افت واقعی با یافتن مقدار افزایش افت بین پله‌های اول

در سال ۱۹۶۴ Hantush اصل انطباق را بر روی معادله Jacob اعمال نمود و معادله‌ای را توسعه داد که افت در یک چاه را در طول n امین پله از یک آزمون افت پله‌ای محاسبه می‌کرد.

(۲)

$$S_w(n) = \sum_{i=1}^n \Delta Q_i B(r_{ew}, t - t_i) + CQ_n^2$$

که در آن $S_w(n)$ مجموع افت در چاه در طول پله n ام در زمان t ، شعاع موثر چاه، t_i زمانی که در آن i امین پله شروع می‌شود، Q_n تخلیه ثابت در طول n امین پله، Q_i تخلیه ثابت در طول i امین پله که به دنبال n امین پله می‌باشد و $\Delta Q_i = Q_i - Q_{i-1}$ افزایش تخلیه از زمان t_i می‌باشد. با رسم $S_w(n)/Q_n$ در مقابل Q_n بر روی محورهای حسابی، خط مستقیمی با شیب C و (عرض از مبدا B) نقطه تقاطع B با محور Y ها نتیجه خواهد شد. بر اساس روش Hantush-Biershenk، مقادیر افت $S_w(t)$ تمامی پله‌ها را در مقابل زمان مربوطه در یک کاغذ نیمه لگاریتمی رسم شده در هر پله یک بازه زمانی در چایی که نقاط ترسیمی یک خط مستقیم را

معادله Rorabaugh مستقل از نرخ تخلیه می‌باشند، یک تکنیک محاسبه عددی مستقیم بدون نیاز به روش‌های گرافیکی یا ابزارهای گسترده رایانه‌ای برای محاسبه ضرایب افت ارائه دادند. این روش در یک آزمون پمپاژ افت پله‌ای با حداقل سه پله قابل به‌کارگیری می‌باشد و لازم است تا برای حل سه مجهول A ، C و n ، سه معادله مربوط به سه پله از پمپاژ حل شوند:

$$S_1=AQ_1+CQ_1^n; S_2=AQ_2+CQ_2^n; S_3=AQ_3+CQ_3^n \quad (5)$$

که در آن‌ها، $Q_1 < Q_2 < Q_3$ و $S_1 < S_2 < S_3$ می‌باشد. Miller and Weber با حل این مجموعه معادلات، رابطه زیر را ارائه نموده‌اند:

$$n = \frac{\log \left[\epsilon + (Q_3/Q_2) - (K_2/K_1)(Q_1/Q_2) \right]}{\log(Q_3/Q_2)} \quad \text{و} \quad \epsilon = \frac{K_2}{K_1} \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^n \quad (6)$$

که در آنها $K_2 = S_3 - \frac{Q_3}{Q_2} S_2$ و $K_1 = S_1 - \frac{Q_1}{Q_2} S_2$ می‌باشد، و با مرتبط کردن معادلات فوق یک فرایند حل عددی ساده پیشنهاد نمودند:

$$n_i = \frac{\log \left[\epsilon_i + (Q_3/Q_2) - (K_2/K_1)(Q_1/Q_2) \right]}{\log(Q_3/Q_2)} \quad \text{و} \quad \epsilon_i = \frac{K_2}{K_1} \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^{n_i} \quad (7)$$

که در آنها نشان‌دهنده سطح تکرار در حل عددی است و با حدس اولیه $n=0$ در یک نرم افزار صفحه گسترده یا ماشین حساب قابل برنامه ریزی به‌سادگی قابل حل است.

Karami and Younger (2002) برای محاسبه مستقیم مقدار افت آبخوان و چاه در چاه پمپاژ، روشی ارائه نموده‌اند که براساس معادلات Jacob و Rorabaugh پایه‌ریزی نشده است، در سفره‌های محبوس، آزاد و نشتی قابل اجرا است و آن را می‌توان برای شرایط همگن و ناهمگن به کار برد. در این روش با در نظر گرفتن این که اختلاف بین افت مشاهده شده و افت آبخوان، افت چاه را مقداردهی می‌کند، چنین فرض شده که افت چاه را می‌توان با استفاده از داده‌های افت پله‌ای به طور مستقیم محاسبه نمود. برای این منظور پس از پایدار شدن نرخ افت، سهم افت آبخوان از افت مشاهده شده جدا می‌شود. مقادیر a ، b و c به ترتیب افت آبخوان را برای پله‌های ۱ تا ۳ ارائه می‌کنند و به همین ترتیب Δs_1 ، Δs_2 و Δs_3 نشان‌دهنده افت چاه برای هر پله می‌باشند (شکل ۲).

از این رو مقدار افت چاه می‌تواند به سادگی با استفاده از اجزاء باقیمانده افت ΔS_i و با وارد کردن اصول بر هم نهی (Superposition) مورد محاسبه قرار گیرد. بر اساس معادلات جریان شعاعی ناپایدار Theis، افت تئوریک (یا افت آبخوان) در یک زمان مشخص و یک فاصله شعاعی تعیین شده تنها به نرخ پمپاژ بستگی دارد. در نتیجه برای محاسبه افت آبخوان در یک آزمون افت پله‌ای، لازم است تمامی مقادیر افت همسان‌سازی شود به طوری که نسبت به نرخ پمپاژ اولین گام استاندارد گردد. با استفاده از داده‌های همگن‌سازی شده و محاسبات ریاضی ساده، مقادیر افت آبخوان را می‌توان برای هر دوره‌ای از پمپاژ محاسبه نمود (Karami and Younger, 2002). در روش ارائه شده توسط

و دوم محاسبه می‌شود. افت افزایشی برای پله دوم در هر نقطه همراه با زمان طی شده از شروع پله دوم اندازه‌گیری می‌شود. سپس این مقدار افزایشی به افت پله اول در زمان مساوی با زمان اندازه‌گیری شده از شروع پله دوم اضافه می‌شود. بدین ترتیب هر داده مربوط به پله دوم یا هر پله دیگر به این روش منتقل می‌شود تا کل منحنی افت را در نرخ تخلیه متناسب آن پله بازسازی کند. نقاط مربوط به هر پله با بهترین خطوط مستقیم که تا برخورد با محور افت امتداد پیدا کرده‌اند تطبیق داده می‌شوند. با توجه به اینکه افت به آرامی در یک پله تغییر می‌کند، عامل افت آبخوان نیز می‌بایست متناسب با زمان تغییر نماید (Kruseman and De Ridder, 1990).

$$S_w(t) = (a + b \log t)Q + CQ_2 \quad (3)$$

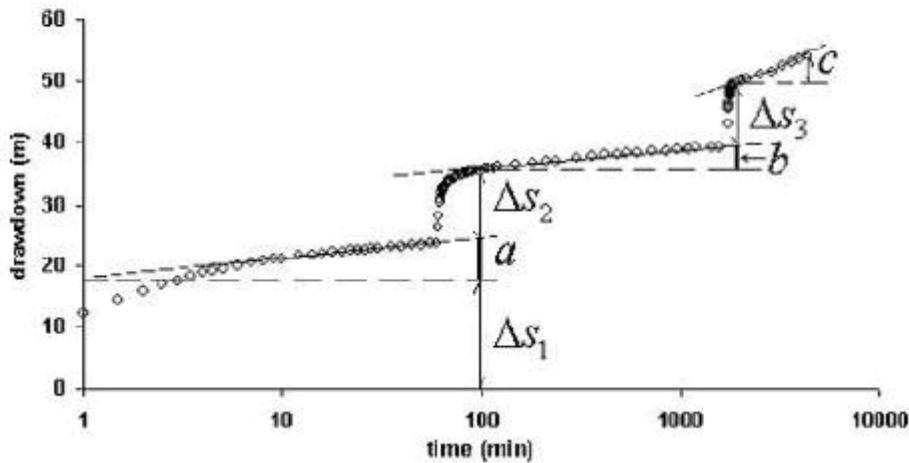
که در آن $b = 2.3/4\pi T$ و $a = 2.3/4\pi T \cdot \log(2.25T/r_w^2 S)$ می‌باشد. شیب هر خط مستقیم برآزش داده شده به داده‌های تثبیت شده هر پله مساوی مقدار افزایشی افت در طول یک سیکل لگاریتمی است (ΔS_{wi}). در نتیجه $b_i = \Delta S_{wi}/Q_i$ و محل تقاطع هر خط مستقیم با محور افت مربوط به زمان $t=1 \text{ min}$ ، مقدار a_i آن گام را ارائه می‌کند. با مشخص بودن b_{is} و a_{is} می‌توان $a_i + b_i \log t$ را برای هر زمان t محاسبه نمود. با بازنویسی معادله افت برای هر پله از آزمون پمپاژ می‌توان نوشت: $S_{wi}(t)/Q_i - a_i = b_i \log t + CQ_i$ و با ترسیم $S_{wi}(t)/Q_i - a_i$ در مقابل Q_i خط مستقیمی نتیجه می‌شود که شیب آن مقدار C و تلاقی آن با محور عمودی عامل افت کل آبخوان $A(t)$ را نتیجه می‌دهد.

Rorabaugh, 1953 برای شرایطی که n برابر با ۲ نباشد، روشی تحلیلی برای محاسبه B ، C و n توسعه داده است. در این شرایط معادله $S_w/Q = B + CQ$ به صورت $S_w/Q = B + CQ_n$ - نوشته می‌شود و با آرایش دوباره معادله و لگاریتم‌گیری از آن، آن را می‌توان به صورت $\log[S_w/Q - B] = \log C + (n-1)\log Q$ نوشت و بر اساس این معادله می‌توان با رسم $S_w/Q - B$ در مقابل Q بر روی کاغذ لوگ-لوگ، خط مستقیمی را با شیب مشخص معادل $n-1$ بدست آورد و مقدار C را با امتداد دادن خط مستقیم تا برخورد به محور $Q=1$ قرائت نمود (Kruseman and De Ridder, 1990). Kasenow (1998) روشی جایگزین و غیرگرافیکی را بسط داده است که به وسیله آن می‌توان هر دو ضریب B و C را بدون انتقال داده‌ها و مستقیماً محاسبه نمود. بر اساس روش Kasenow، محاسبه ضرایب برای هر پله بر اساس مقادیر دبی چاه و افت چاه در آن پله و پله بعدی به کمک روابط ۴ محاسبه می‌شود. در این روش توصیه شده که از این روابط برای محاسبه ضرایب در هر پله استفاده شود و میانگین آنها تعیین گردد.

$$B = \frac{S_n Q_{n+1}^2 - S_{n+1} Q_n^2}{Q_n Q_{n+1}^2 - Q_{n+1} Q_n^2} \quad \text{و} \quad C = \frac{S_{n+1} Q_n - S_n Q_{n+1}}{Q_n Q_{n+1}^2 - Q_{n+1} Q_n^2} \quad (4)$$

که در آن Q_n ، تخلیه در پله n ام، s_n افت در پله n ام، Q_{n+1} تخلیه در پله $n+1$ ام و s_{n+1} افت در پله $n+1$ ام است. Miller and Weber (1983) با فرض اینکه ضرایب افت در

$$\begin{aligned} L_{w(1)} &= a & L_{w(1)} &= \Delta s_1 \\ L_{w(2)} &= a + b & L_{w(2)} &= \Delta s_1 + \Delta s_2 \\ L_{w(3)} &= a + b + c & L_{w(3)} &= \Delta s_1 + \Delta s_2 + \Delta s_3 \end{aligned}$$



شکل ۲. روش پیشنهادی توسط Karami and Younger برای تحلیل آزمون افت پله‌ای. مقادیر a و b و c به ترتیب افت آبخوان را برای پله‌های ۱ تا ۳ ارائه می‌کنند و به همین ترتیب Δs_1 ، Δs_2 و Δs_3 نشان‌دهنده افت چاه برای هر پله می‌باشند (Karami and Younger, 2002).

معادل افت چاه برای اولین پله می‌باشد.

همچنین برای بررسی داده‌های افت مشاهده شده در چاه پمپاژ، از دو تصحیح تحلیلی (Jacob (1944) برای تبدیل افت در یک آبخوان آزاد به افت معادل در یک آبخوان تحت فشار و تصحیح Kozeny (1933) برای تبدیل افت در یک چاه ناقص به افت معادل در یک چاه با نفوذ کامل استفاده می‌شود (Kruseman and De Ridder, 1990).

$$s = s - \frac{s^2}{2b} \quad (9)$$

که s در آن افت اندازه‌گیری شده در چاه تحت پمپاژ، و b ضخامت اشباع اولیه آبخوان می‌باشد.

تصحیح Kozeny نیز به صورت زیر تعریف می‌شود (Kruseman and De Ridder, 1990):

$$s_c = s \frac{L}{b} \left[1 + 7(r_w / 2L)^{1/2} \cos \left(\pi \frac{L}{2b} \right) \right] \quad (10)$$

که در آن s_c افت تصحیح شده $[L]$ و s افت اندازه‌گیری شده در چاه می‌باشد $[L]$.

آزمایش روش‌های مختلف و تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به آزمون‌های پمپاژ سه‌گانه در چاه‌های اکتشافی جدید حفر شده در دشت مشهد

سه چاه چنبر غربال، کلات کریمخان و کنه بیست در راستای این مطالعه در دشت مشهد و در مجاورت پیژومتر حفاری شده و آزمون پمپاژ به روش پله‌ای (با سه پله) در شرایطی در آنها انجام گرفته است که افت آب در داخل چاه و پیژومتر مجاور اندازه‌گیری شده است (اسدیان و همکاران، ۱۳۸۹). پمپاژ در چاه اکتشافی چنبر غربال به صورت پله‌ای و در سه پله با دبی‌های ۶۲۰

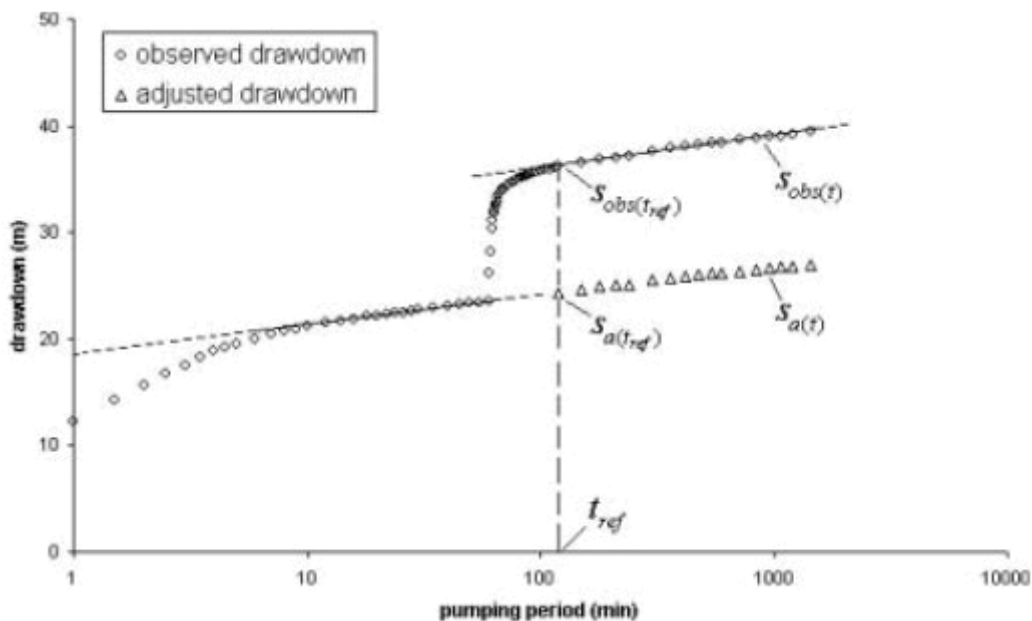
(Karami and Younger (2002)، نرخ تغییرات افت پایدار شده، شامل هر دو جمله BQ و CQ^2 می‌باشد در حالی که پس از پایدارسازی (Stabilization)، نرخ تغییرات در افت (یعنی زمانی که در آن داده‌ها بر روی منحنی نیمه لگاریتمی یک خط راست تبعیت می‌کنند)، تنها منعکس کننده سهم BQ (افت تئوریک) می‌باشد. تشخیص اثرات هتروژنیتهی و آماده کردن یک معادله عمومی که محاسبه مقادیر افت آبخوان را در هر زمان و برای هر نرخ پمپاژی امکان‌پذیر سازد، دو علتی است که برای همگن‌سازی داده‌های افت پله‌ای بر پایه نرخ پمپاژ مبناء ارائه شده است.

برای همگن‌سازی داده‌های افت پله‌ای بر پایه یک نرخ پمپاژ مبناء اولین گام به عنوان مبناء انتخاب می‌گردد افت سایر گام‌ها را با استفاده از رابطه تنظیم‌کننده زیر که به هر دو افت آبخوان و چاه مربوط می‌شود می‌توان همگن نمود.

$$S_{a(t)} = \frac{[S_{obs(t)} - S_{obs(t_{ref})}]}{(Q_{obs}/Q_{ref})} + S_{a(t_{ref})} \quad (8)$$

که در آن: $S_{a(t)}$ افت تنظیم شده در زمان t و $S_{obs(t)}$ مشاهده شده در زمان t و $S_{obs(t_{ref})}$ مشاهده شده در زمان t_{ref} و $S_{a(t_{ref})}$ افت تنظیم شده در زمان t_{ref} شروع بخش پایدار شده از هر پله (یعنی زمانی که در آن داده‌ها از یک خط راست بر روی منحنی نیمه لگاریتمی ژاکوب تبعیت می‌کنند)، Q_{obs} ، نرخ پمپاژ مشاهده شده و Q_{ref} نرخ پمپاژ مبناء می‌باشند.

برای محاسبه افت چاه (CQ^2) به کمک روش ارائه شده ابتدا خطی با بهترین انطباق برای کلیه پله‌ها، از بخش همگن شده هر پله در روی کاغذ نیمه لگاریتمی رسم می‌شود. سپس خط مستقیم کشیده شده از بخش همگن شده اولین پله امتداد داده می‌شود تا محور افت را قطع نماید ($\log t = 1$) می‌باشد. مقدار افت در نقطه



شکل ۳. نمایش پارامترهای کلیدی معادله ۸ (Karami and Younger, 2002)

۱۷۰۷ و ۲۰۷۹ متر مکعب در روز انجام شده است. میزان افت آب در چاه پمپاژ در انتهای آزمون بالغ بر ۹۷/۴ متر و در پیرومتر ۲/۰۲ متر می‌باشد.

به کمک اطلاعات ثبت شده در پیرومتر و به کمک روش عددی تخمین پارامتر، قابلیت انتقال آبخوان محاسبه شده است. سپس افت تئوریک چاه پمپاژ یا افت در آبخوان به کمک پارامترهای هیدرودینامیک محاسبه شده از مرحله اول و به کارگیری روش عددی شبیه سازی شده و ضرایب افت چاه به عنوان داده‌های کنترلی مستقل برای تصحیح داده‌های افت زمان با استفاده از روش‌های آنالیتیک مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات چاه‌ها و نتایج محاسبه قابلیت انتقال آبخوان به روش حل عددی-برآورد پارامتر با استفاده از کدهای MODFLOW (Harbaugh et al., 2000) و PEST (Doherty & Hunt, 2010) در جدول ۱ ارائه شده است. مقادیر بار هیدرولیکی تئوریک یا افت آبخوان شبیه‌سازی شده و افت چاه CQ^n در زمان‌های مختلف در محل هر چاه در شکل ۴ ارائه شده است. برای انجام تصحیح در

۹۷۰ و ۱۰۶۳ متر مکعب در روز انجام شده است. اندازه‌گیری افت در هر دو چاه پمپاژ و پیرومتر مجاور که در فاصله ۱۶/۵ متری از آن واقع شده، صورت گرفته است. عمق پیرومتر مذکور ۱۰۵ متر می‌باشد. میزان افت آب در چاه پمپاژ در انتهای آزمون، ۱۰۶/۶۲ متر اندازه‌گیری شده است. مقدار افت در چاه پیرومتری ۶۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. چاه اکتشافی کلات کریم خان در شمال شرق دشت مشهد واقع شده است. حفاری این چاه به علت ریزشی بودن لایه‌ها با کندی مواجه بوده و به مدت ۶۹ روز ادامه داشته است و در آن از روش تلسکوپي بهره گرفته شده است. پمپاژ به صورت پله‌ای و در سه پله با دبی‌های ۱۸۱۸، ۲۲۳۵ و ۲۵۳۸ متر مکعب در روز انجام شده است. میزان افت آب در چاه پمپاژ در پایان آزمون، ۶۲/۸ متر اندازه‌گیری شده است. این در حالی است که تغییرات بار هیدرولیکی در چاه پیرومتری در پایان این دوره ۲/۱۹ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. چاه کنه بیست در جنوب شرقی دشت مشهد و در انتهای دشت قرار دارد. پمپاژ در این چاه به صورت پله‌ای و در سه پله با دبی‌های ۱۵۲۱،

جدول ۱. نام و مشخصات حفاری چاه‌های اکتشافی دشت مشهد و قابلیت انتقال محاسبه شده در هر یک با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در پیرومتر

نام چاه	عمق چاه m	عمق آب m	قطر حفاری (اینچ)	قطر لوله جدار (اینچ)	طول لوله مشبک m	دانه بندی رسوبات	T m ^۲ /d
چاه اکتشافی جنب غربال	۲۵۵	۸۹.۵	۱۴	-	فاقد لوله جدار	رس ۴۰-۷۰، گراول ۲۰۰-۱۰۰۰ ماسه-۱۰۰۰ ماسه سیلت	۶۰۹
چاه اکتشافی کلات کریمخان	۲۰۰	۴۱	۲۴	۱۲-۱۶-۲۰	۱۵۶	تناوبی از رس ماسه دار و ماسه و گراول سیلتی-رسی	۵۷۳
چاه اکتشافی کنه بیست	۱۷۴	۶۴	۱۶	۱۲	۸۶	رس سیلتی در سطح تا رس خالص در عمق ۱۷۴ متری	۴۷۶

می‌توان مشاهده نمود. از لحظه آغاز پمپاژ تا دقیقه چهارم سرعت افت آب در چاه زیاد بوده و سپس تا دقیقه ۱۲ به طور نسبی وارد مرحله تثبیت می‌گردد و روند داده‌های افت زمان از شیب کمتری برخوردار است. در ادامه و از دقیقه ۱۲ تا ۹۰ مجدداً سرعت افت آب در چاه افزایش می‌یابد و این مرحله به مدت ۷۸ دقیقه ادامه پیدا می‌کند تا پمپاژ وارد مرحله تثبیت نهایی گردد. در این مرحله که ۱۲۶۰ دقیقه ادامه دارد، ۱۱ اندازه‌گیری صورت گرفته در انتهای دوره پمپاژ به طور نسبی تراز آب زیرزمینی ثابتی را نشان می‌دهند. برآورد CQ^n به روش Karami-Younger با توجه به زمان پایدار شدن داده‌ها که از دقیقه ۹۰ شروع شده است معادل $۱۵/۸۹$ متر برآورد گردیده است. در چاه کنه بیست یک افت شدید و تثبیت را می‌توان در آن مشاهده نمود. از لحظه آغاز پمپاژ تا دقیقه نهم، سرعت افت آب در چاه زیاد بوده و سپس تا دقیقه ۱۳۲۱ وارد مرحله تثبیت می‌گردد. در این مرحله روند داده‌های افت زمان از شیب کمتری برخوردار است. در این مرحله که ۱۳۱۲ دقیقه ادامه دارد، ۱۲ اندازه‌گیری صورت گرفته در انتهای دوره پمپاژ به طور نسبی تراز آب زیرزمینی ثابتی را نشان می‌دهند. افت چاه معادل $۴۱/۲۷$ متر برآورد گردیده است (شکل ۸).

نتایج حاصله از شبیه‌سازی مولفه‌های افت چاه نشان می‌دهند که CQ^n عملاً مستقل از زمان نبوده و نوساناتی از خود نشان می‌دهد که این نوسانات در اوایل پمپاژ زیاد می‌باشند و در انتها به حداقل مقدار خود می‌رسند.

افت‌های غیرخطی در چاه‌های چنبر غربال، کلات کریمخان، کنه بیست براساس روش‌های Hantush-Biershenk، Eden-Ha- zel و Kasinow بر اساس پله اول آزمون پمپاژ و مقدار $n=2$ مورد محاسبه قرار گرفته و با داده‌های کنترلی حاصل از مدل‌سازی مستقیم مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. تعداد ۱۰ داده افت-زمان تئوریک که دربرگیرنده محدوده زمانی دقایق ۵۰ تا ۳۶۰ می‌باشند در چاه چنبر غربال، تعداد ۱۲ داده افت-زمان تئوریک که دربرگیرنده محدوده زمانی دقایق ۱۸ تا ۱۳۵۰ می‌باشند در چاه کلات کریمخان و تعداد ۱۸ داده افت-زمان دربرگیرنده محدوده زمانی دقایق ۳۶ تا ۱۳۶۶ در چاه کنه بیست به عنوان مبنا جهت محاسبه مجدد پارامترهای هیدرودینامیک و آزمون دقت داده‌های موخره پمپاژ در محاسبه ضرایب بکار گرفته شده‌اند (جدول

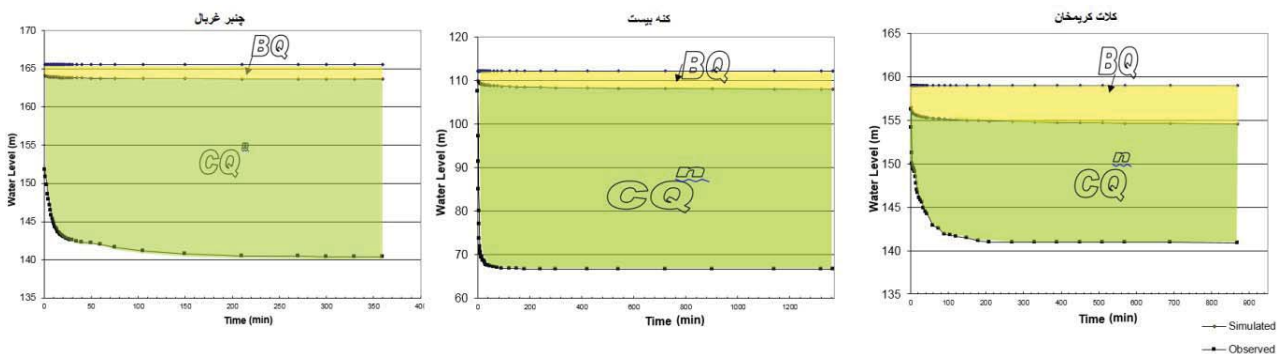
داده‌های افت-زمان ثبت شده در چاه پمپاژ از پنج روش تحلیلی Eden-Hazel, Hantush-Biershenk, Kasenow, Miller -Weber و همچنین Karami -Younger استفاده شده است و دقت برآورد افت چاه و قابلیت انتقال محاسبه شده پس از تصحیح داده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. محاسبه افت چاه و ضرایب B و C با کمک روش‌های Eden-Hazel و Hantush-Biershenk با استفاده از نرم‌افزار Step Master انجام شده است (شکل‌های ۵ و ۶). نتایج محاسبه ضرایب B, C چاه‌های سه‌گانه اکتشافی دشت مشهد به روش Kasenow نیز در شکل ۷ ارائه شده است.

همان‌گونه که از نتایج ارائه شده مشخص است، ضرایب محاسبه شده در پله‌های مختلف آزمون پمپاژ با این روش، تنها در چاه کلات کریمخان از یکنواختی و روند مشخصی برخوردار است. مقدار ضرایب B, C و n با توسعه یک فرایند حل عددی در نرم افزار اکسل، برای هر سه چاه به روش Miller-Weber محاسبه شده است. نتایج حاصله برای هر سه چاه مقادیر غیر قابل استناد برای تک تک پارامترها و افت چاه CQ^n حاصل شده است به طوری که مقدار افت چاه برای چاه‌های چنبر غربال، کنه بیست و کلات کریمخان به ترتیب معادل $۰,۰۷$ متر، $۸/۲۹ \times ۱۰^{۱۳}$ متر و $۱/۹۳ \times ۱۰^{۱۱}$ متر نتیجه شده است.

برآورد مستقیم CQ^n به روش Karami-Younger در چاه‌های دشت مشهد

روند افت آب در داده‌های جمع آوری شده از آزمون پمپاژ پله‌ای چاه چنبر غربال به گونه‌ای است که سرعت افت آب در چاه از دقیقه ۵ افزایش یافته است. این روند تا دقیقه ۱۴ ادامه می‌یابد. سپس روند افت تا دقیقه ۵۰ با شیب کمتری ادامه یافته و پس از آن مجدداً روند افزایش شیب تا دقیقه ۲۱۰ و سپس روند پایدار شدگی افت تا آخرین برداشت از پله اول یعنی ۳۶۰ ادامه می‌یابد. در صورتی که تفسیر بر اساس معیارهای گرافیکی انجام گیرد، برازش افت پس از طی روند تثبیت که از دقیقه ۲۲ شروع شده است و تا پایان آزمون ادامه می‌یابد و برآورد افت چاه (CQ^n) به روش Karami-Younger با توجه به زمان پایدار شدن داده‌ها معادل $۱۹/۷۶۹$ متر برآورد شده است.

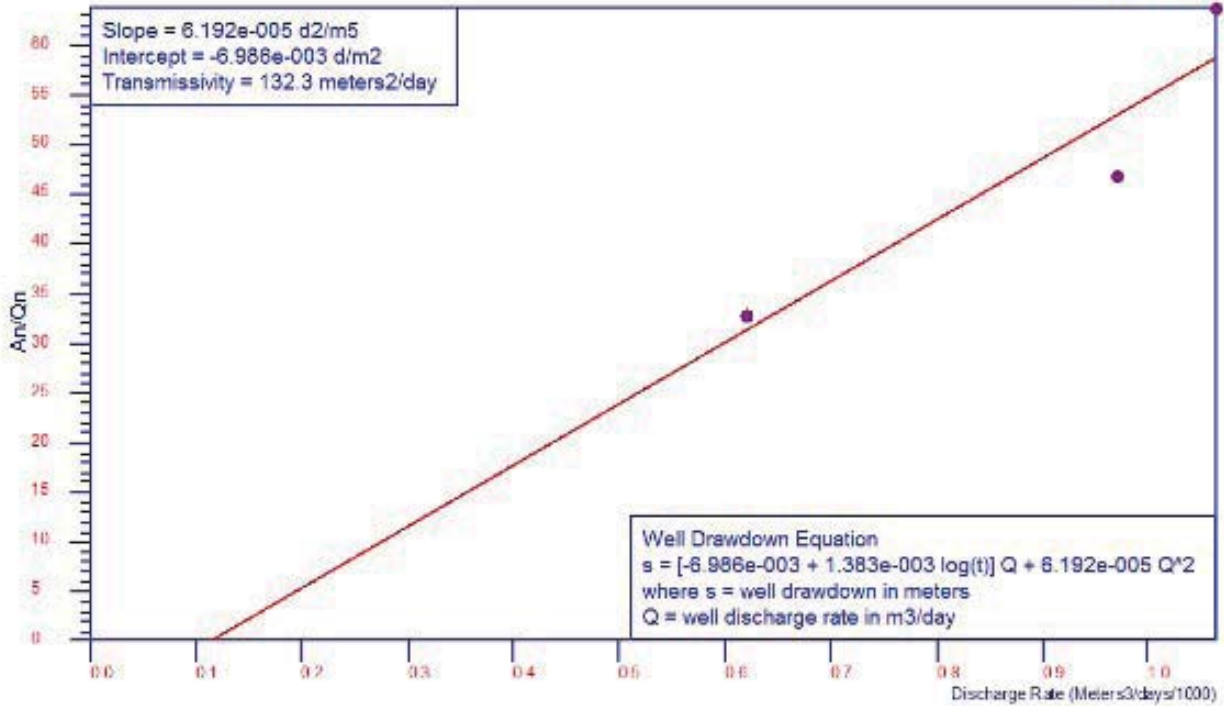
در چاه کلات کریمخان دو سیکل افت شدید و تثبیت را



شکل ۴. مقایسه تغییرات افت خطی و غیرخطی در چاه کنه بیست نسبت به زمان

CHGH

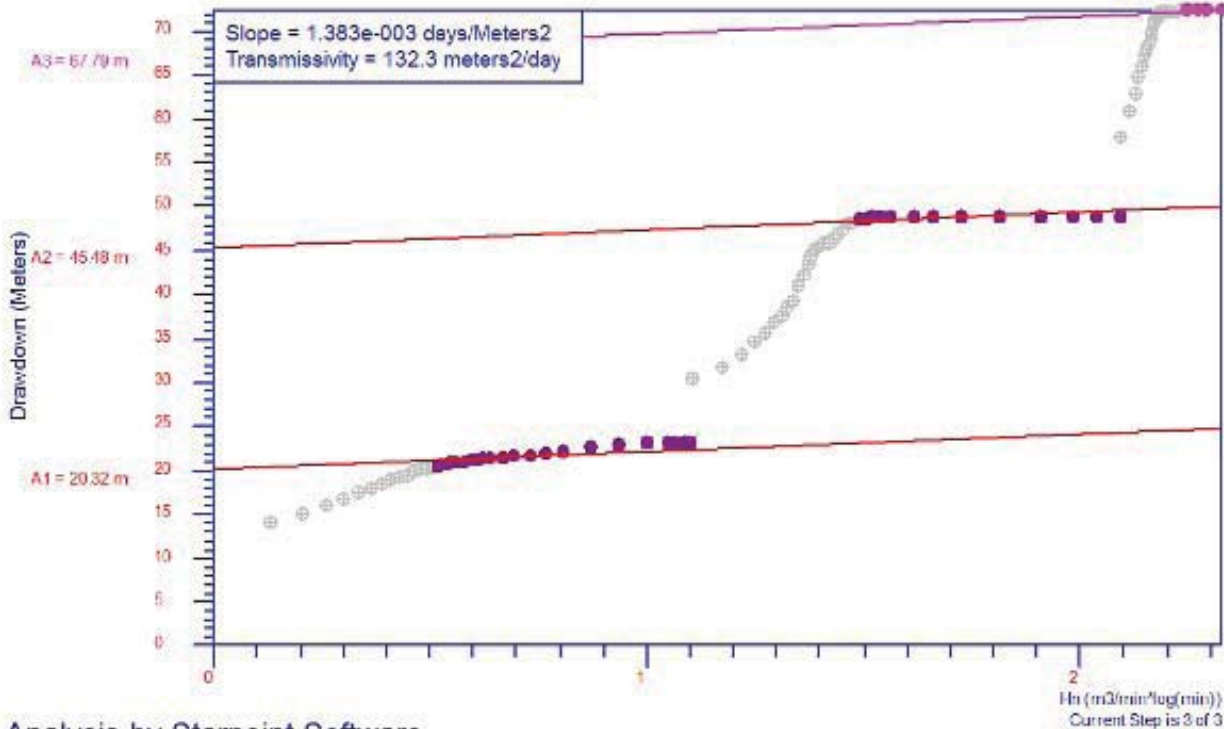
Eden-Hazel Part 2
Well CG



Analysis by Starpoint Software

CHGH

Eden-Hazel Part 1
Well CG



Analysis by Starpoint Software

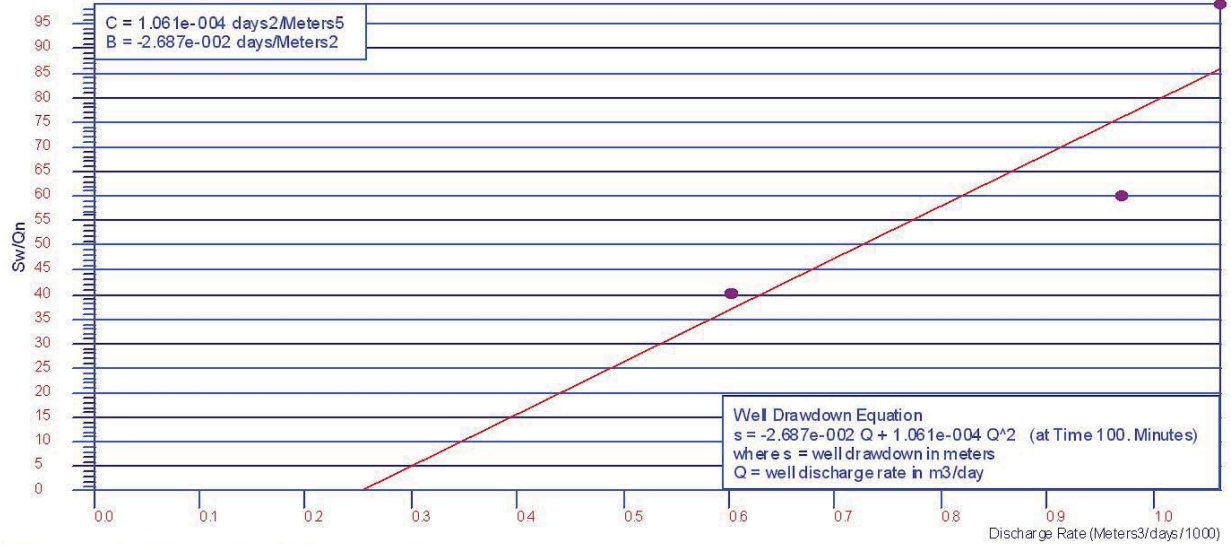
شکل ۵. نتایج محاسبه افت چاه و ضرایب افت (B, C) در چاه چنبر غربال با کمک روش Eden-Hazel

ChanbarGhrbal

Hantush-Bierschenk Graph

Mashad 1387

Well CG



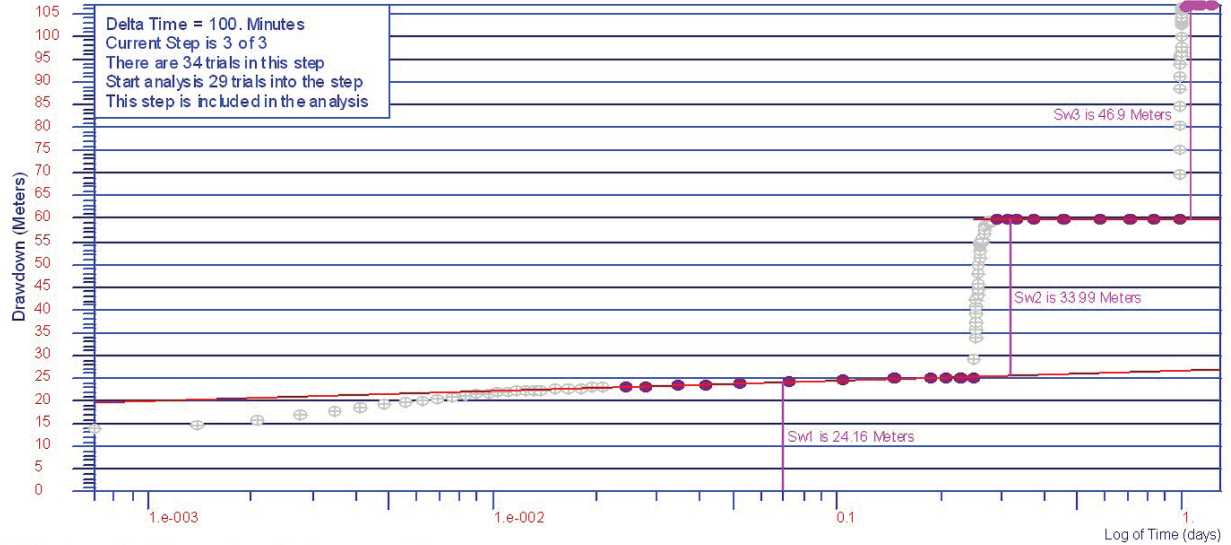
Client:: Abe Mantagheie Khorasane Razavi
 Analysis by Starpoint Software

ChanbarGhrbal

Step-Drawdown Determination

Mashad 1387

Well CG



Client:: Abe Mantagheie Khorasane Razavi
 Analysis by Starpoint Software

شکل ۶. نتایج محاسبه افت چاه و ضرایب افت (B, C) در چاه چنبر غربال با کمک روش Hantush-Bierschenk براساس روش گرافیکی - برآورد ضرایب افت چاه

Step Drawdown Test, Kasenow's Solution			Q (m ³ /day)	s (m)	B ₁₂	B ₂₃	C ₁₂	C ₂₃	
$B = \frac{s_n Q_{n+1}^2 - s_{n+1} Q_n^2}{Q_n Q_{n+1}^2 - Q_{n+1} Q_n^2}$	کنه بیست	Step 1	1521.8	45.36	-0.1489	0.073674	0.000117	-1.2902E-05	
		Step 2	1707.8	88.19					
		Step 3	2078.9	97.40					
$C = \frac{s_{n+1} Q_n - s_n Q_{n+1}}{Q_n Q_{n+1}^2 - Q_{n+1} Q_n^2}$	کلات کریمخان		Q (m ³ /day)	s (m)	B ₁₂	B ₂₃	C ₁₂	C ₂₃	
		Step 1	1818.2	18.06	-0.03274	-0.01722	2.35E-05	1.6528E-05	
		Step 2	2235.6	44.11					
Step 3	2538.0	62.76							
where, for consistent units,									
Q _n	= discharge at step n		Q (m ³ /day)	s (m)	B ₁₂	B ₂₃	C ₁₂	C ₂₃	
s _n	= drawdown at step n	چنبر غریبال	Step 1	620.568	25.13	0.003209	-0.34632	6.01E-05	0.00042029
Q _{n+1}	= discharge at step n+1		Step 2	970.368	59.69				
s _{n+1}	= drawdown at step n+1		Step 3	1062.72	106.62				

شکل ۷. محاسبه ضرایب B, C چاه‌های سه‌گانه اکتشافی دشت مشهد به روش Kasenow

همان‌طور که از این جدول مشخص می‌باشد، اختلاف بار هیدرولیکی محاسبه شده با مقادیر ارائه شده توسط داده‌های کنترلی قابل توجه بوده و اعمال تصحیح موجب بروز خطا در نتایج حاصله خواهد شد.

۲. همان‌طور که از این جدول مشخص می‌باشد، اختلاف بار هیدرولیکی محاسبه شده با مقادیر ارائه شده توسط داده‌های کنترلی قابل توجه بوده و اعمال تصحیح موجب بروز خطا در نتایج حاصله خواهد شد.

۲. همان‌طور که از این جدول مشخص می‌باشد، اختلاف بار هیدرولیکی محاسبه شده با مقادیر ارائه شده توسط داده‌های کنترلی قابل توجه بوده و اعمال تصحیح موجب بروز خطا در نتایج حاصله خواهد شد.

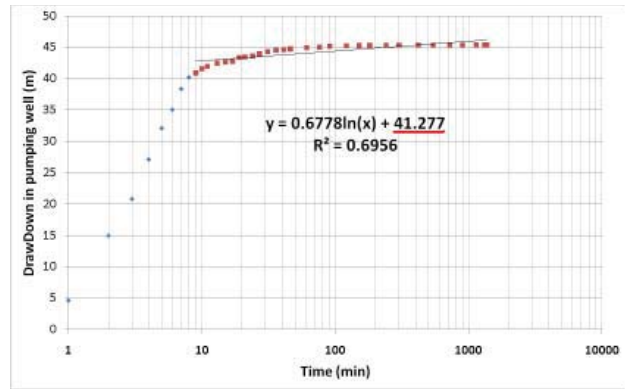
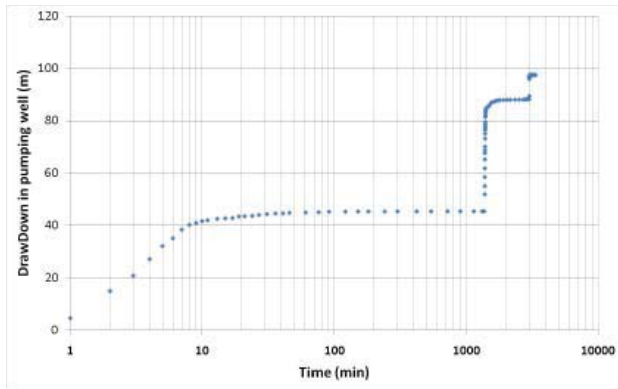
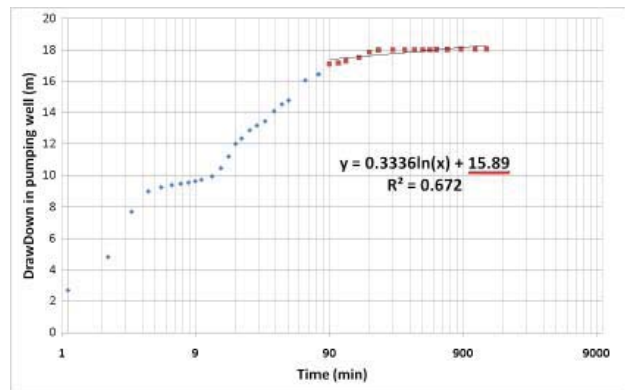
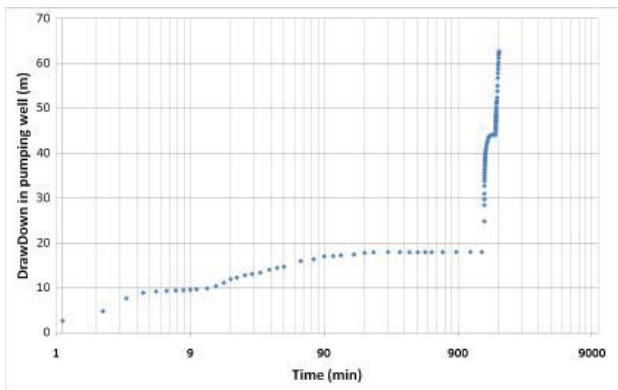
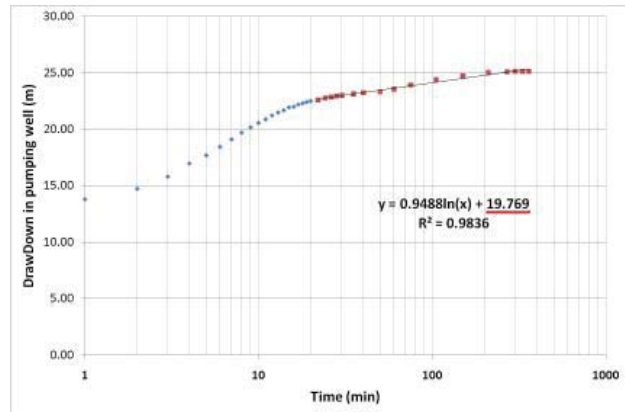
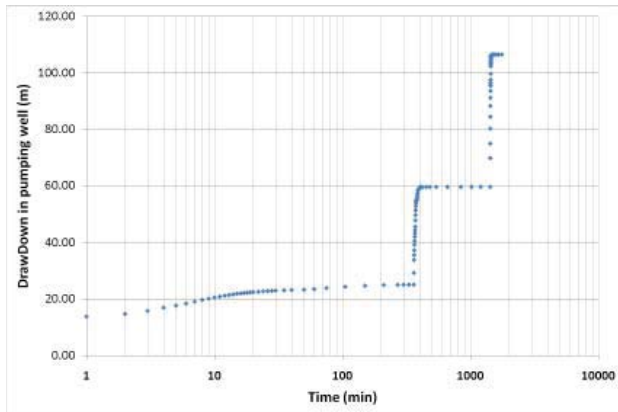
به‌کارگیری روش Karami-Younger در برآورد مستقیم CQⁿ آزمون‌های پمپاژ پله‌ای دشت سریشه و درمیان اسدآباد (خراسان جنوبی)

روش Karami-Younger (2002) بر روی نتایج آزمایش‌های پمپاژ چهار چاه اکتشافی دستگرد، دستقیچ، چاچاخو و حجت‌آباد سریشه واقع در دشت‌های درمیان اسدآباد و سریشه خراسان جنوبی (شرکت آب منطقه‌ای خراسان جنوبی، ۱۳۸۸) نیز به‌کار گرفته شده است. مشخصات این چاه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. در طول پمپاژ، افت آب در هر دو چاه اکتشافی و پیژومتر قرائت شده است. براساس داده‌های افت-زمان اندازه‌گیری شده در پیژومتر، قابلیت انتقال آبخوان مورد محاسبه قرار گرفته و تغییرات افت مربوط به چاه (CQⁿ) شبیه‌سازی شده است (جدول ۴) سپس با استفاده از روش Karami-Younger، مقدار CQⁿ محاسبه شده (شکل‌های ۹ و ۱۰) و با تصحیح داده‌های افت اندازه‌گیری شده در چاه پمپاژ، قابلیت انتقال آبخوان در محدوده هر چاه بر اساس داده‌های اصلاح شده موخره آزمون پمپاژ به روش عددی مجدداً مورد محاسبه قرار گرفته‌اند و با داده‌های بدست آمده به کمک افت در پیژومتر مورد مقایسه قرار گرفته است.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از به‌کارگیری روش‌های مختلف برای محاسبه مولفه افت چاه (CQⁿ) جهت تصحیح داده‌های قرائت شده از چاه‌ای دشت مشهد و برآورد پارامترهای هیدرودینامیک آبخوان توسط افت اندازه‌گیری شده در چاه پمپاژ، نتایج حاصل از به‌کارگیری روش‌های غیرمستقیم Eden-Hazel, Hantush-

در چاه‌هایی که افت در آنها تثبیت شده، مقادیر CQⁿ محاسبه شده به روش Karami-Younger انطباق بیشتری با مقادیر شبیه‌سازی شده از خود نشان می‌دهند. این در حالی است که دقت بالا در برآورد CQⁿ به تنهایی کافی نبوده و حساسیت دقت قابلیت انتقال محاسبه شده با تصحیح داده‌های چاه پمپاژ به کمک CQⁿ محاسبه شده، به نوع رسوبات و افت چاه در طول آزمون بستگی دارد. به‌طوری‌که در رسوبات با تراوایی زیاد که افت چاه در آنها کم می‌باشد و به‌خصوص مقدار CQⁿ چاه در مقایسه با BQ ناچیز می‌باشد، حتی محاسبه دقیق مقدار CQⁿ می‌تواند به برآورد قابلیت انتقال با اختلاف چند برابر مقدار واقعی منجر شود بررسی‌های انجام شده در این مطالعه نشان داده است که بر اساس داده‌های افت زمان و استفاده از محورهای غیرلگاریتمی در روش Karami-Younger می‌توان افت چاه (CQⁿ) را مستقیماً و متناسب با زمان CQⁿ=f(t) برآورد نمود. برای این منظور، انتخاب صحیح داده‌ها در بخش‌های ابتدایی، میانی و انتهایی پله اول



شکل ۸. منحنی نیمه لگاریتمی افت-زمان آزمون افت پله‌ای چاه چنبر غربال(بالا) کلات کریمخان (وسط) و کنه بیست (پایین) با برآورد افت چاه به روش Karami-Younger (2002)

به همگنی داده‌ها و شرایط تغییر احتمالی روند افت ناشی از آبخوان‌های ناشی، تغییر در دور موتور پمپ و دبی خروجی از چاه و تراکم داده‌های برداشت شده از چاه خصوصاً زمان‌های اولیه ضروری است.

حساسیت زیاد نتایج حاصله نسبت به ضرایب افت برآورد شده و تغییر قابل توجه مولفه افت ناشی از چاه نسبت به زمان (CQ^n) می‌تواند به شدت بر روی نتایج تأثیر گذاشته و امکان حصول نتایج مناسب را از کارشناس سلب نمایند.

برخلاف روش گرافیکی Karami-Younger که از زمان‌های انتهایی پمپاژ در هر پله و مرحله تثبیت افت پس از نقطه عطف (منطقه کم شیب) در منحنی نیمه لگاریتمی افت-زمان برای استخراج معادله لگاریتمی و استخراج افت چاه استفاده می‌شود،

منحنی افت-زمان از اهمیت زیادی برخوردار است. بر خلاف نمودارهای نیمه لگاریتمی، استخراج داده‌ها و تحلیل بخش‌های مختلف منحنی‌های افت-زمان را بر روی منحنی‌های غیرلگاریتمی با سهولت و دقت بیشتری می‌توان انجام داد.

به‌کارگیری یک روش مستقیم برای محاسبه CQ^n مزیت بزرگی محسوب می‌شود. همچنین بررسی روش‌های مختلف گرافیکی محاسبه ضرایب افت چاه و آبخوان در این مطالعه نشان داده است که نتایج حاصله تا حدود زیادی متأثر از قضاوت کارشناس بوده و می‌تواند موجب جابجایی نتایج شود. به‌کارگیری روش Karami-Younger به همراه قضاوت کارشناسی دقیق جهت تصحیح داده‌ها می‌تواند به نتایج مناسبی در برآورد CQ^n در آزمون‌های پمپاژ تک چاهی منجر شود. برای این منظور توجه

جدول ۲. مقایسه افت‌های غیرخطی چاه‌ها که با استفاده از روش‌های مختلف در پله اول آزمون محاسبه شده‌اند.

چاه جنب غربال					چاه کلات کریمخان				
	C	Q m ³ /day	n	CQ ⁿ (m)		Q m ³ /day	n	CQ ⁿ (m)	
Hantush-Bierschenk	1.061E-04	620.57	2	38.366	Hantush-Bierschenk	2.044E-05	1818.2	2	67.57
Eden-Hazel	1.057E-04	620.57	2	38.221	Eden-Hazel	2.343E-05	1818.2	2	77.45
Kasenow	2.402E-04	620.57	2	86.853	Kasenow	2.354E-05	1818.2	2	77.81
Forward Simulation *	6.272E-05	620.57	2	22.681	Forward Simulation *	-	1818.2	-	13.76
Miller&Weber	8.86E-37	620.57	12	0.076	Miller&Weber	106E06	1818.2	1	1.93E-11
Karami-Younger	-	620.57	-	19.769	Karami-Younger	-	1818.2	-	15.89

* Averaged for Last 10 Data

* Averaged for Last 12 Data

چاه کنه بیست				
	C	Q m ³ /day	n	CQ ⁿ (m)
Hantush-Bierschenk	2.351E-05	1521.8	2	60.636
Eden-Hazel	2.417E-05	1521.8	2	62.338
Kasenow	1.174E-04	1521.8	2	302.857
Forward Simulation *	-	1521.8	-	41.534
Miller&Weber	545E08	1521.8	1	8.29E13
Karami-Younger	-	1521.8	-	41.27

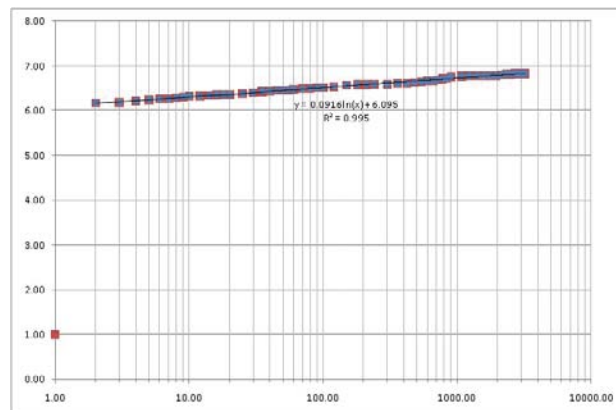
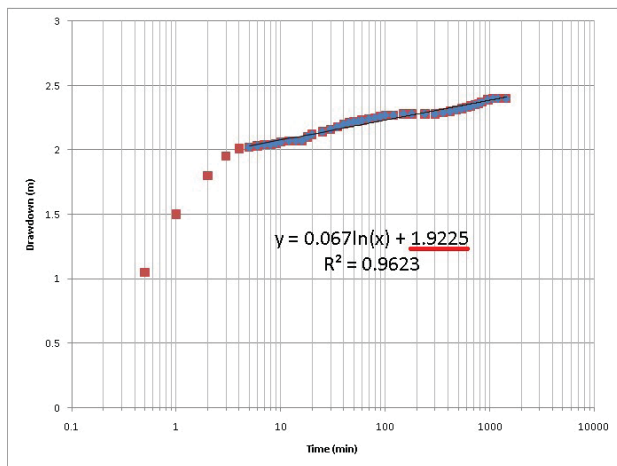
* Averaged for Last 18 Data

جدول ۳. مشخصات چاه‌های اکتشافی دستگرد و سربیشه و قابلیت انتقال محاسبه شده به کمک افت اندازه‌گیری شده در پیرومتر

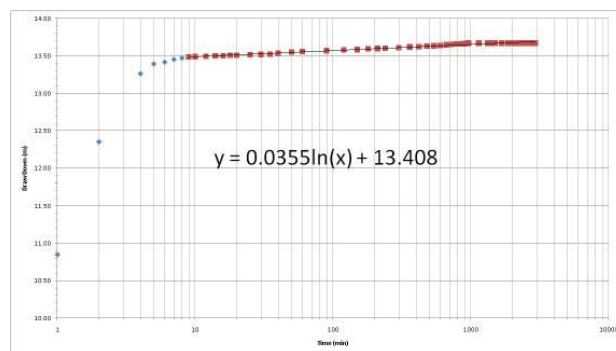
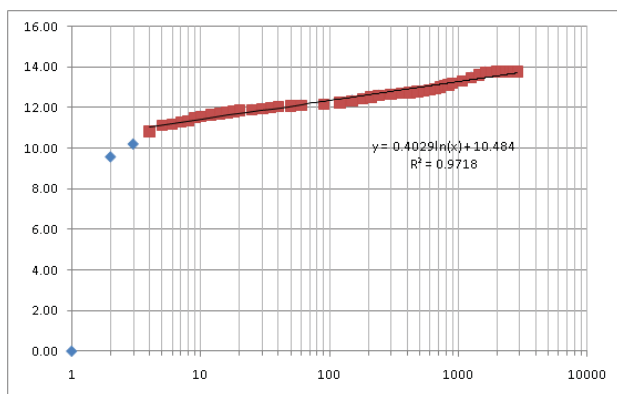
نام چاه	عمق چاه m	عمق آب m	قطر حفاری (اینچ)	قطر لوله جدار (اینچ)	قطر لوله آبد (اینچ)	طول لوله مشبک m	دانه بندی رسوبات	T m ² /d
چاه اکتشافی دستگرد	۷۳	۸۵	۱۶	۱۲	۶	۶۶	دانه بندی درشت، ۴۰-۵۰ گراول ۳۰-۴۰ ماسه کمی سیلت	۶۵۶۲
چاه اکتشافی راه دستفیع	۱۲۵	۸۳	۱۶	۱۲	۶	۴۲	دانه بندی درشت، بیش از ۴۰-۶۰ درصد گراول	۳۹۷۳
چاچاخو	۱۶۰	۱۳۰	۱۶	۱۲	۶	۳۰	دانه بندی درشت، بیش از ۷۰-۸۰ درصد گراول و ماسه	۱۵۴۳
حجت آباد سربیشه	۸۹	۱۶	۱۶	۱۲	۶	۷۲	لایه های سطحی گراول و ماسه، کاهش اندازه دانه ها با افزایش عمق	۲۸۳۷

جدول ۴. مقایسه مقدار افت چاه و قابلیت انتقال محاسبه شده به کمک تحلیل داده‌های پیرومتری و شبیه سازی و همچنین داده‌های تصحیح شده چاه پمپاژ به روش Karami - Younger (2002) و تحلیل بخش تثبیت شده داده‌های درون چاهی

نام چاه	افت چاه و قابلیت انتقال محاسبه شده به کمک روش مستقیم با استفاده از پیرومتر		افت چاه و قابلیت انتقال محاسبه شده به کمک روش کریمی-یانگر	
	CQ ⁿ	T m ² /d	CQ ⁿ	T m ² /d
چاه اکتشافی دستگرد	1.36	6562	1.922	12689
چاه اکتشافی راه دستفیع	5.04	3973	6.095	7036
چاچاخو	10.45	1543	10.484	653
حجت آباد سربیشه	11.6	2837	13.408	8363



شکل ۹. منحنی نیمه لگاریتمی افت-زمان آزمون افت پله‌ای چاه دستگرد (چپ) و دستیغ (راست) با برآورد افت چاه به روش (Karami - Younger (2002)



شکل ۱۰. منحنی نیمه لگاریتمی افت-زمان آزمون افت پله‌ای چاه چاچاخو (چپ) و حجت آباد سریشه (راست) با برآورد افت چاه به روش Karami Younger (2002)

ical analysis of variable discharge pumping test of wells. Inst. Engrs. Australia, Civil Engng. Trans., 5-10.

- Hantush, M.S. 1964. Hydraulics of wells. In: V.T. Chow (editor). Advances in hydroieience, 281-432. Academic Press, New York and London.

- Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., and McDonald, M.G. 2000. MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model - User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process, 121.

- Hazel, C.P., 1973, Lecture Notes on Groundwater Hydraulics: Presented to Australian Water Resources Council, Fourth Groundwater School, Adelaide.

- Jacob, C.E. 1947. Drawdown test to determine effective radius of artesian well. Trans. Amer. Soc. of Civil. Engrs., 112, 2321, 1047-1064

- Karami G. H. and Younger P. L. 2002. Analysing step drawdown test in heterogeneous aquifers, Journal of engineering geology and hydrogeology, 35, 295-303.

بخشی از داده‌های واقع در پیش از مرحله تثبیت افت نیز می‌بایست در استخراج معادله در نظر گرفته شوند. گستره این بخش از داده‌ها به شرایط آبخوان و فواصل زمانی برداشت داده‌ها بستگی دارد.

منابع

- اسدیان ف.، هاتفی ر.، دلخواهی ب.، خدایی ک. و شهسواری ع.ا.، ۱۳۸۹. بهینه‌یابی متد تحلیل اطلاعات پمپاژ تک چاهی در وصول پارامترهای هیدرودینامیکی سفره‌های آب زیرزمینی، پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی.

- شرکت آب منطقه‌ای خراسان جنوبی، دفتر مطالعات پایه منابع آب، ۱۳۸۸. گزارش تفسیر نتایج آزمایش پمپاژ آبخوان سریشه و درمیان اسد آباد.

- Doherty, J.E., and Hunt, R.J. 2010. Approaches to Highly Parameterized Inversion—A Guide to Using PEST for Groundwater-Model Calibration: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5169, 59.

- Eden, R.N. and Hazel, C.P. 1973. Computer and graph-

- Kasenow, M.C., 1998, Analysis and Design of Step-Drawdown Tests. Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, Colorado.

- Kruseman G. P. and De Ridder N.A., 1990. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, 2nd edition, International Institute for Land Reclamation and Improvement

(ILRI), Wageningen, ISBN 90-70754-20-7.

- Miller C.T. and Weber W.J., 1983. Rapid solution of nonlinear step-drawdown equation, Ground Water, 21, 5.

- Step Master, 2. 1. 0. 0., 2013. Software Inc., www.Pointstar.com.