

کاربرد مدل تحلیلی آبخوان آزاد-درزه و شکاف دار و روش دیکانولوشن در تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان

محمد مهدی صدقی

استادیار بخش زمین شناسی، دانشگاه پیام نور، شیراز

نوذر سامانی

استاد بخش علوم زمین، دانشگاه شیراز

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۰۷

m.sedghi@pnu.ac.ir

چکیده

تعیین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان پایه مطالعات هیدروژئولوژی در یک دشت می‌باشد. برای انجام این کار استفاده از داده‌های آزمون پمپاژ با کیفیت، یک مدل ریاضی مناسب و یک روش تحلیلی دقیق، ضروری است. هدف این تحقیق ارائه یک روش برای افزایش دقت تحلیل آزمونهای پمپاژ و تخمین پارامترهای آبخوان می‌باشد. در این پژوهش مدل صدقی-سامانی، که برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوانهای دو لایه آزاد-درزه و شکاف دار ارائه شده، به نحوی اصلاح شده که بتوان از آن برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان با استفاده از داده‌های آزمون پمپاژ پله‌ای استفاده کرد. سپس با اتصال این مدل به کد تخمین پارامتر PEST، برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی آزمون پمپاژ آبخوان پلنگان نیریز در استان فارس استفاده شده است. در این مقاله، برای اولین بار در هیدروژئولوژی، کاربرد الگوریتم دیکانولوشن (deconvolution) برای بررسی و صحت سنجی تغییرات دبی آزمون افت پله‌ای نشان داده شده است. کاربرد روش ارائه شده در این مقاله علاوه بر تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان با استفاده از داده‌های آزمون پمپاژ دبی ثابت و افت پله‌ای، تعیین نوع آبخوانی است که در زیر آبخوان اصلی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: آزمون پمپاژ/افت پله‌ای، آبخوان آزاد-درزه و شکاف دار، دیکانولوشن، کد PEST

مقدمه

تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان اساس مطالعات هیدروژئولوژی در یک دشت می‌باشد. روش معمول برای این کار استفاده از داده‌های آزمون پمپاژ می‌باشد. برای استفاده از داده‌های آزمون پمپاژ دو مساله باید مدنظر قرار گیرد: (۱) استفاده از مدل تحلیلی مناسب. به عنوان مثال با مدل تحلیلی آبخوان تحت فشار نمی‌توان آبدی ویژه آبخوان آزاد و یا با مدل تحلیلی آبخوان آزاد نمی‌توان پارامترهای هیدرولیکی آبخوان دو لایه را تخمین زد. (۲) استفاده از روش تخمین پارامتر مناسب. به عنوان مثال بکارگیری روش انطباق منحنی‌ها یا روش کوپر-ژاکوب (Cooper and Jacob, 1946) در مورد آبخوان‌های با پارامترهای متنوع با خطای زیادی همراه خواهد بود.

تا کنون مدل‌های تحلیلی زیادی برای شبیه‌سازی افت در آبخوان‌ها ارائه شده است. از میان این مدل‌ها می‌توان به مدل تاپس اشاره کرد که در آن یک آبخوان تحت فشار با گسترش نامحدود، جریان دو بعدی و چاه نفوذ کامل لحاظ شده است. هانتوش (Hantush, 1964) افت سه بعدی در یک آبخوان نشتی را با مدل تحلیلی شبیه‌سازی نمود. در مدل هانتوش نفوذ ناقص چاه در آبخوان لحاظ شده است. در این مدل نشست نه بصورت یک شرط مرزی در بالا یا پایین آبخوان که بصورت یک منبع به کل ضخامت آبخوان اعمال شده است (Hantush, 1959, Hantush, 1960, Hantush, 1964, Hantush

and Jacob, 1955) هانت (Hunt, 2005) در مدل آبخوان نشتی، نشست را بصورت شرایط مرزی اعمال کرده و بر این اساس یک مدل سه بعدی افت در آبخوان نشتی را تهیه نمود. بر اساس مدل هانت (Hunt, 2005) آکی تارد (لایه محبوس کننده نیمه تراوا) یک واسطه میان آبخوان نشتی و یک منبع بار ثابت آب می‌باشد که جریان آب در آن عمودی است. اگرچه لحاظ نمودن نشست به عنوان یک شرط مرزی نقطه قوت مدل هانت می‌باشد ولی لحاظ منبع بار ثابت نشست در این مدل، مثل مدل هانتوش (Hantush, 1964)، یک نقطه ضعف محسوب می‌شود. زیرا این منبع بار ثابت بجز در مواردی که آبخوان در زیر یک دریاچه قرار گرفته است، توجیه فیزیکی ندارد. این نقطه ضعف بعدها توسط مالاما و همکاران (Malama et al., 2007, Malama et al., 2008) اصلاح گردید. آن‌ها مدلی تحلیلی برای یک آبخوان دو لایه آزاد-نشتی ارائه کردند که جریان در هر دو لایه سه بعدی بوده و منبع بار ثابت نشست لحاظ نشده است. در هیچکدام از مدل‌های ارائه شده در فوق، آبخوان نشتی که در آن نشست از یک لایه آبخوان تخلخل دوگانه در زیر صورت می‌گیرد (شکل ۱) مورد بررسی قرار نگرفته است. این در حالی است که سیستم‌های آبخوان آزاد-تخلخل دوگانه زیادی در کشور (محمدزاده و همکاران، ۱۳۹۶، چیت سازان و همکاران، ۱۳۹۶، Issar, 1969, Milanovic and Aghili, 1990) و جهان (Milanovic and Aghili, 1990, Al-Shaibani, 2008) وجود دارد.

(et al., 2017, Birsoy), در مطالعات آبهای زیرزمینی بجز موارد محدود (Birsoy and Summers, 1980, Chakrabarty and Enachescu, 1997, Neuman and Gardner, 1989) چندان بکار گرفته نشده است.

هدف از این تحقیق بکارگیری مدل صدقی - سامانی (Sedghi and Samani, 2015) و روش دیکانولوشن برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی منطقه پلنگان آبخوان دشت نیریز از روی آزمون پمپاژ صورت گرفته در منطقه می باشد. در این تحقیق ابتدا مدل تحلیلی صدقی - سامانی (Sedghi and Samani, 2015) به نحوی اصلاح گردید که بتوان از آن برای چاه مشاهده-ای با نفوذ ناقص و برای آزمون پمپاژ افت پلهای استفاده کرد. مدل اصلاح شده پس از برنامه نویسی در محیط فرترن به کد تخمین پارامتر PEST (Doherty et al., 1994) متصل شده و پارامترهای هیدرولیکی آبخوان با استفاده از آن تخمین زده شد. در این تحقیق از روش دیکانولوشن مستقیم (Rouboutsos and Stewart, 1988)، پس از صحت سنجی الگوریتم تهیه شده، برای ارزیابی دقت داده‌های دبی ارائه شده برای آزمون افت پلهای استفاده شد. استفاده از مدل صدقی - سامانی (Sedghi and Samani, 2015) برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان برای اولین بار در این تحقیق صورت گرفته است. همچنین این مقاله اولین استفاده عملی از روش دیکانولوشن در بررسی دبی آزمون‌های پمپاژ افت پلهای در مطالعات هیدروژئولوژی می باشد.

اصول تئوری

مدل نیمه تحلیلی صدقی سامانی

برای تخمین افت بدون بعد در یک سیستم آبخوان آزاد-تخلخل دوگانه (شکل ۱)، صدقی و سامانی (Sedghi and Samani, 2015) معادله زیر را در محیط لاپلاس ارائه کردند:

(رابطه ۱)

$$s_D(a, z_D, p) = \frac{2[\cosh(\eta_1 z_D) - \delta u_D(\eta_1, z_D)]}{p \eta_1^2 \kappa_{zu} (l_D - d_D)} + c_1 \exp(\eta_1 z_D) + c_2 \exp(-\eta_1 z_D)$$

که در این معادله s_D افت بدون بعد، η_1 مقدار ویژه تابع افت تعریف شده در (جدول ۱)، z_D عمق بدون بعد، l_D عمق بالای اسکرین، d_D عمق کف اسکرین، κ_{zu} نسبت تعریف شده در (جدول ۱) و p پارامتر تبدیل لاپلاس می باشد.

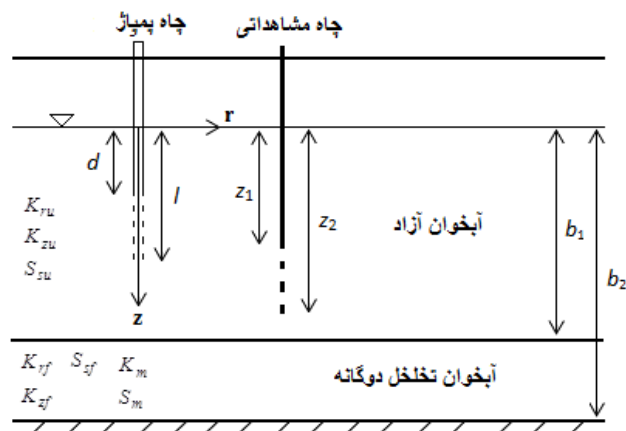
(Subyani, 2004, Wagner, 2011) وجود دارد. مدل تحلیلی این نوع آبخوان دو لایه‌ای توسط صدقی و سامانی (Sedghi and Samani, 2015) ارائه گردید که با استفاده از آن در صورت وجود داده‌های مناسب آزمون پمپاژ می توان پارامترهای هیدرولیکی آبخوان آزاد بالایی و تخلخل دوگانه زیرین را تخمین زد.

تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان با استفاده از داده‌های آزمون پمپاژ با روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد. قدیمی‌ترین این روش‌ها روش انطباق منحنی‌های افت زمان با منحنی تیپ و روش نیمه لگاریتمی ژاکوب می باشد. استفاده از این روش‌ها پس از ارائه به سرعت در تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان مرسوم گردید و بعدها در تخمین پارامترهای دینامیکی مخازن نفتی نیز بکار گرفته شد (Gringarten, 2008). مهم‌ترین محدودیت روش نیمه لگاریتمی ژاکوب این است که باید دوره زمانی را تشخیص داد که منحنی افت-زمان از یک خط صاف در سیستم نیمه لگاریتمی تبعیت کند. از آنجا که تبعیت منحنی نیمه لگاریتمی از خط صاف در رژیم‌های مختلف جریان رخ می‌دهد تعیین نادرست رژیم جریان مربوط به یک دوره زمانی به محاسبه نتایج غلط منجر می‌گردد (Gringarten, 2008).

علاوه بر همه اینها روش انطباق بر مبنای سعی و خطا و بصورت دستی صورت می‌گیرد که محدودیت‌های خود را دارد (Hill, 1998, Hill et al., 2000). برای برطرف کردن برخی محدودیت‌های روش انطباق، روش مشتق فشار (افت) ابتدا برای بررسی مخازن نفتی (Bourdet et al., 1989, Tiab and Puthigai, 1988) و سپس در مطالعه آبخوان‌ها (Samani et al., 1993, Spane and Wurstner, 2006) ارائه گردید. در این روش با مشتق‌گیری از داده‌های افت نسبت به لگاریتم زمان حساسیت این داده‌ها به رژیم جریان افزایش یافته و امکان تفکیک رژیم‌های جریان افزایش می‌یابد. به عنوان مثال می‌توان دوره‌های زمانی که اثر ذخیره چاه و یا دبی تاخیری حاکم است را مشخص نمود. همچنین در زمانی که جریان شعاعی حاکم است منحنی مشتق فشار از خطی افقی تبعیت می‌کند که مقدار آن رابطه مستقیم با ذخیره آبخوان و رابطه عکس با هدایت هیدرولیکی آبخوان دارد. مطالعه (Bourdet et al., 1989, Spane and Wurstner, 1993) برای آشنایی بیشتر با این روش پیشنهاد می‌گردد. اما روش مشتق فشار محدودیت‌هایی دارد. در این روش خطاهای موجود در اندازه‌گیری افت در طی فرایند مشتق‌گیری بزرگ‌نمایی می‌شود. همچنین در مواردی که دبی پمپاژ تغییر نماید از این روش نمی‌توان با اعتماد و اطمینان برای تشخیص رژیم جریان استفاده کرد (Gringarten, 2008).

برای حذف اثرات تغییر دبی پمپاژ از داده‌های افت روشی ریاضی به نام دیکانولوشن (deconvolution) ارائه شده است (Gringarten, 2008, Kuchuk et al., 1990, Rouboutsos and Stewart, 1988). با این روش می‌توان تغییرات دبی پمپاژ را از روی داده‌های افت و بطور مستقل از نوع آبخوان و چاه برآورد نمود (Levitan, 2003). با حذف اثر تغییرات دبی توسط این روش، می‌توان داده‌های آزمون پمپاژ را با روش‌های مرسوم مثل مشتق افت تحلیل کرد. این روش علی‌رغم کاربرد گسترده در مطالعات مخازن نفتی (Cumming et al., 2013, Liu et al., 2017, Osman)

$$\delta u_{pD}(\eta_1, z_D) = \frac{\sinh(\eta_1 d_D) \frac{1}{\eta_1} \{ \sinh[\eta_1(1+z_{1D})] - \sinh[\eta_1(1+z_{2D})] \} + \sinh[\eta_1(1-l_D)] \cosh(\eta_1 d_D)}{\sinh(\eta_1)}$$



شکل ۱. مدل مفهومی مورد استفاده در معادله ۷.

جدول ۱. پارامترهای بدون بعد

$s_D = \frac{s}{\frac{Q}{4\pi b_1 K_{ru}}}$	$d_D = \frac{d}{b_1}$	$t_D = \frac{K_{ru}}{S_{zu} b_1^2} t$
$z_D = \frac{z}{b_1}$	$\kappa_{ru} = \frac{K_{ru}}{K_{zu}}$	$\xi_{ru} = \frac{K_{ru} S_y}{K_{zu} S_{zu} b_1} p$
$z_{D1} = \frac{z_1}{b_1}$	$l_D = \frac{l}{b_1}$	$\omega = \frac{K_{ru} S_{zu}}{K_{zu} S_m}$
$z_{D2} = \frac{z_2}{b_1}$	$\kappa_{zf} = \frac{K_{zf}}{K_{ru}}$	$\gamma = \frac{3K_m}{\tilde{r}_{mD} K_{ru}} \left\{ \sqrt{\frac{p}{\omega}} \coth \left(\sqrt{\frac{p}{\omega}} \tilde{r}_{mD} \right) - \frac{1}{\tilde{r}_{mD}} \right\}$
$r_D = \frac{r}{b_1}$	$\kappa_{zf} = \frac{K_{zf}}{K_{ru}}$	$\eta_1 = \sqrt{\frac{1}{\kappa_{zu}} (p + a^2)}$
$b_D = \frac{b_2}{b_1}$	$\sigma = \frac{S_{zf}}{S_{zu}}$	

 اگر در معادله ۶ و در ضرایب C_1 و C_2 بجای $\frac{1}{p}$ تابع زیر قرار داده شود می

توان از آن برای شبیه‌سازی افت ناشی از آزمون پمپاژ پله‌ای استفاده کرد (Mishra et al., 2013, Olsthoorn, 2008).

همچنین در این معادله:

(رابطه ۲)

$$\zeta_D = \begin{cases} d_D + z_D & \forall z_D \in (-d_D, 0] \\ 0 & \forall z_D \in [-l_D, -d_D] \\ l_D + z_D & \forall z_D \in [-1, -l_D] \end{cases}$$

(رابطه ۳)

$$Q(p) = \begin{cases} \frac{Q_0}{p} & 0 < t < t_1 \\ \frac{Q_0}{p} + \Delta Q_1 \exp(-t_1 p) & t_1 < t < t_2 \\ \frac{Q_0}{p} + \Delta Q_1 \exp(-t_1 p) + \Delta Q_2 \exp(-t_2 p) & t_2 < t \end{cases}$$

(رابطه ۴)

$$\delta u_D(\eta_1, z_D) = \frac{\sinh(\eta_1 d_D) \cosh[\eta_1(1+z_D)] + \sinh[\eta_1(1-l_D)] \cosh(\eta_1 d_D)}{\sinh(\eta_1)}$$

(رابطه ۵)

$$c_1 = \frac{\sinh(\eta_1(1-b_{D2})) \{ \psi(\xi_{ru} - \eta_1) u_D(a, 1, p) - \xi_{ru} u_D(a, 0, p) \exp(\eta_1) \} + \cosh(\eta_1(1-b_{D2})) \xi_{ru} u_D(a, 0, p) \exp(\eta_1)}{2\psi \sinh(\eta_2(1-b_{D2})) \{ \xi_{ru} \sinh(\eta_1) + \eta_1 \cosh(\eta_1) \} - 2\eta_1 \cosh(\eta_2(1-b_{D2})) \{ \xi_{ru} \cosh(\eta_1) + \eta_1 \sinh(\eta_1) \}}$$

(رابطه ۶)

$$c_2 = \frac{\sinh(\eta_1(1-b_{D2})) \{ -(\xi_{ru} - \eta_1) u_D(a, 1, p) + \xi_{ru} u_D(a, 0, p) \exp(-\eta_1) \} + \cosh(\eta_1(1-b_{D2})) \xi_{ru} u_D(a, 0, p) \eta_1 \exp(\eta_1)}{2\psi \sinh(\eta_2(1-b_{D2})) \{ \xi_{ru} \sinh(\eta_1) + \eta_1 \cosh(\eta_1) \} - 2\eta_1 \cosh(\eta_2(1-b_{D2})) \{ \xi_{ru} \cosh(\eta_1) + \eta_1 \sinh(\eta_1) \}}$$

 که در این معادله Q_0 دبی پله اول، ΔQ_1 و ΔQ_2 تغییرات دبی در پله

 دوم و سوم و t_1 و t_2 زمان آغاز پله های دوم و سوم می‌باشند.

از معادله فوق به همراه کد تخمین پارامتر PEST می‌توان برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی به کمک داده‌های آزمون پمپاژ پله‌ای استفاده کرد.

معادله دیکانولوشن مستقیم

می‌توان نشان داد که معادله دیکانولوشن مستقیم بصورت زیر می‌باشد (Rouboutsos and Stewart, 1988):

$$s_2(p) = \frac{Q_2(p)}{Q_1(p)} s_1(p) \quad \text{(رابطه ۹)}$$

در این معادله بدون دانستن ویژگی‌های آبخوان و چاه و صرفاً با داشتن

 داده‌های افت محیط لاپلاس، $s_1(p)$ ، و تابع دبی محیط لاپلاس، $Q_1(p)$ ، می‌توان داده‌های افت محیط لاپلاس جدید، $s_2(p)$ ، را برای تابع دبی مورد نظر، $Q_2(p)$ ، بدست آورد. در استفاده از فرمول بالا چند نکته باید مدنظر قرار گیرد:

الف- داده‌های افت اندازه گیری شده در محیط زمان می‌باشند که باید به محیط لاپلاس انتقال یابند. درباره روش انتقال این داده‌ها به محیط لاپلاس

 در معادلات بالا، ξ_{ru} پارامتر مربوط به زهکشی سطح ایستابی و $\psi = \frac{K_{zf}}{K_{zu}} \eta_2$ سایر پارامترهای معادله در (جدول ۱) ارائه شده است.

 (معادله ۱) را با انتگرال گیری نسبت به پارامتر Z_D می‌توان برای حالتی که چاه مشاهده‌ای بخشی از ضخامت آبخوان را قطع کرده باشد بصورت زیر نوشت

Sedghi and Samani, 2010, Sedghi et al., 2009, Zhan) (and Zlotnik, 2002). (رابطه ۶)

$$s_{pD}(a, z_{1D}, z_{2D}, p) = \frac{2[\cosh(\eta_1 \zeta_D) - \delta u_{pD}(\eta_1, z_D)]}{p \eta_1^2 \kappa_{zu} (l_D - d_D)} + \frac{1}{\eta_1} [c_1 (\exp(\eta_1 z_{2D}) - \exp(\eta_1 z_{1D})) - c_2 (\exp(-\eta_1 z_{2D}) - \exp(-\eta_1 z_{1D}))]$$

 که در این معادله Z_{1D} و Z_{2D} به ترتیب عمق بدون بعد بالا و پایین اسکرین چاه مشاهده‌ای می‌باشند (شکل ۱ و جدول ۱) و

(رابطه ۷)

چاه مشاهده‌ای نفوذ ناقص در فاصله ۷/۵ متری چاه پمپاژ از عمق ۰/۵ متری تا ۳۰/۵ متری اسکرین گذاری شده است. لوگ چاه پمپاژ نشان می‌دهد که در زیر لایه آبخوان آبرفتی به ضخامت اشباع ۶۰/۵ متر لایه‌ای آهکی وجود دارد که رابطه هیدرولیکی آن با لایه بالایی از طریق داده‌های آزمون پمپاژ مورد مطالعه قرار می‌گیرد. طبق گزارش سازمان آب منطقه ای فارس، چاه پمپاژ در مرحله اول با دبی ۶ لیتر در ثانیه (معادل ۵۱۸/۴ متر مکعب در روز) به مدت ۴ ساعت پمپاژ می‌گردد. در ۴ ساعت دوم دبی به میزان ۲ لیتر در ثانیه (معادل ۱۷۲/۸ متر مکعب در روز) و در چهار ساعت سوم دبی به میزان ۱/۵ لیتر در ثانیه (معادل ۱۲۹/۶ متر مکعب در روز) افزایش می‌یابد.

مرحله اول این تحقیق یک الگوریتم دیکانولوشن محیط لاپلاس بر اساس روش معکوس لاپلاس دی هوگ تهیه گردید. سپس این الگوریتم با داده‌های آزمون پمپاژ افت پله‌ای ایجاد شده توسط مدل صدقی - سامانی (Sedghi and Samani, 2015) صحت سنجی گردید که نتایج آن در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطوری که در شکل مشخص است الگوریتم دیکانولوشن بخوبی اثرات تغییر پله‌ای دبی پمپاژ را از داده‌ها حذف کرده است.

مطالعه منابعی مثل (Ahmadi et al., 2017, Roumboutsos and Stewart, 1988) پیشنهاد می‌شود.

ب- داده‌های افت محاسبه شده در محیط لاپلاس می‌باشند که باید به محیط زمان انتقال یابند. برای انتقال این داده‌ها به محیط زمان نمی‌توان الگوریتم‌های سریع و ساده‌ای مثل استفست (Stehfest, 1970) را بکار گرفت بلکه باید از الگوریتم‌های معکوس لاپلاسی استفاده کرد که بر مبنای تبدیلات فوریه می‌باشند (Roumboutsos and Stewart, 1988) مثل الگوریتم‌های کرامپ (Crump, 1976) و دی هوگ (De Hoog et al., 1982).

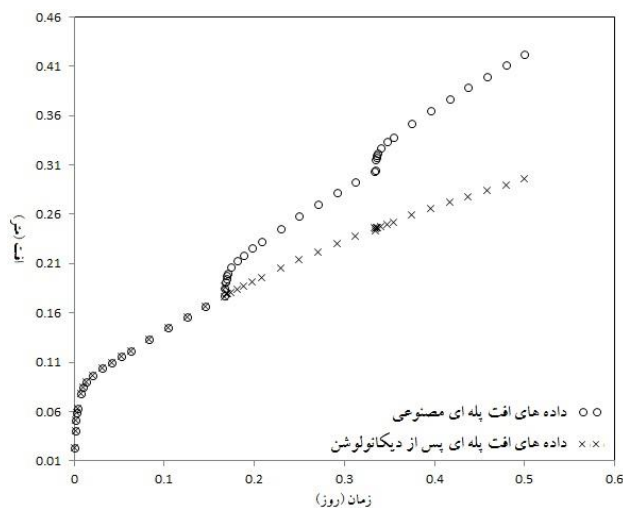
ج- تابع محیط لاپلاس تغییرات دبی پله‌ای در معادله ۸ ارائه شده است.

د- تابع محیط لاپلاس دبی ثابت بصورت زیر می‌باشد:

$$Q_1(p) = \frac{Q_0}{p} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

روش تحقیق

در این تحقیق از داده‌های آزمون پمپاژ منطقه پلنگان نیریز استفاده شده است. آزمون پمپاژ منطقه پلنگان نیریز در یک چاه پمپاژ صورت گرفته که از عمق ۰/۴ متری تا ۶۰/۴ متری سطح ایستابی اسکرین گذاری شده است. یک



شکل ۲. صحت سنجی الگوریتم دیکانولوشن تهیه شده با داده‌های پمپاژ مصنوعی.

پمپاژ با توجه به داده‌های افت، تخمین زده شد. که نتایج آن در (جدول ۲) و (شکل ۴) ارائه شده است.

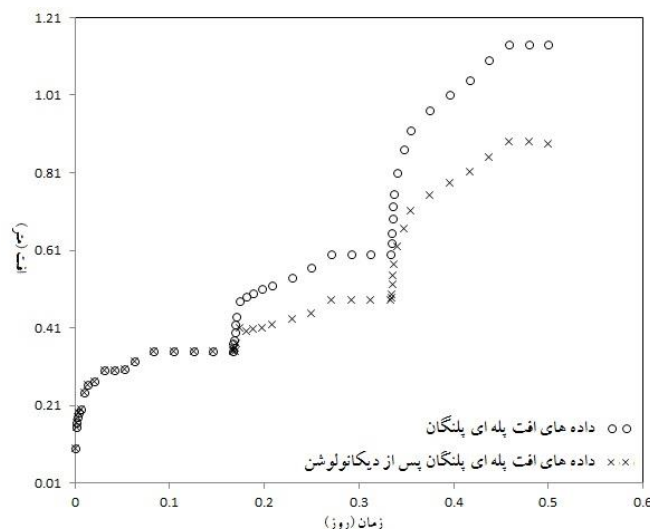
همانطوری که در جدول مشخص شده است، حساسیت مدل به پارامترهای ذخیره دو لایه زیاد می‌باشد. این در حالی است که پارامترهای ذخیره معمولاً پارامترهای با حساسیت اندک و آن هم در زمانهای ابتدایی پمپاژ می‌باشند (Huang and Yeh, 2007). از آنجایی که آزمون پمپاژ بصورت پله‌ای انجام شده است و در این آزمون‌ها با هر بار افزایش دبی، مخروط افت جدیدی بر روی مخروط افت قبلی قرار می‌گیرد، حساسیت مدل به پارامتر ذخیره احیا شده و نتیجه آن افزایش کلی حساسیت مدل به پارامتر ذخیره است (Butler and McElwee, 1990).

پس از صحت سنجی الگوریتم دیکانولوشن از آن برای حذف اثر تغییرات پله‌ای دبی داده‌های آزمون پمپاژ منطقه پلنگان نیریز استفاده شد که نتایج آن در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطوری که در شکل مشخص است الگوریتم دیکانولوشن نتوانسته است که اثر تغییرات دبی پمپاژ را از داده‌های افت حذف کند. از آنجایی که الگوریتم دیکانولوشن فقط به تغییرات دبی بستگی دارد می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های دبی ارائه شده در گزارش سازمان آب با خطا یا حتی اشتباه همراه بوده و باید به نحوی اصلاح گردد.

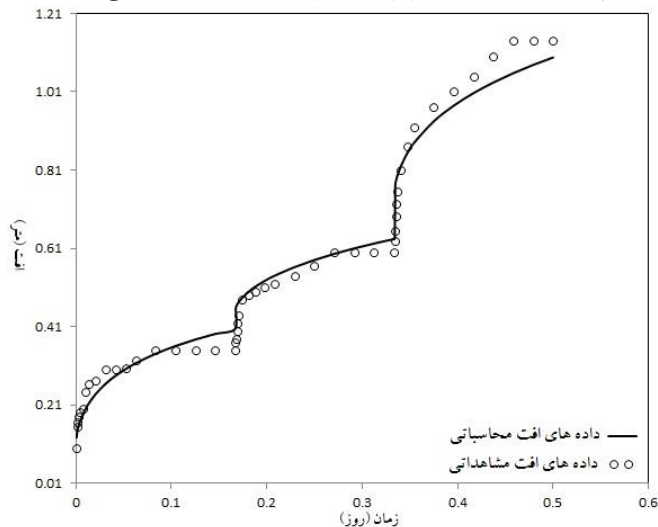
برای اصلاح دبی‌ها و تخمین پارامترهای آبخوان مدل اصلاح شده صدقی - سامانی (Sedghi and Samani, 2015) (معادله ۶) با کد تخمین پارامتر PEST متصل گردید و پارامترهای هیدرولیکی آبخوان و دبی‌های

هیدرولیکی لایه زیرین در واقع مدل صدقی-سامانی را به مدل نویمن تبدیل کرده است. این امر نشان می دهد که حتی در مواردی که احتمال وجود آبخوان تخلخل دوگانه و یا نشتی (مدل صدقی - سامانی شکل کلی تری از مدل آبخوان نشتی مالا و همکاران (Malama et al., 2008) هم می باشد و با کاهش هدایت هیدرولیکی و ذخیره بلوکها به آن مدل تبدیل می گردد) در زیر آبخوان اصلی وجود دارد، استفاده از مدل صدقی - سامانی می تواند فرض وجود آن را تایید و یا رد کند و در صورت تایید، تخلخل دوگانه و یا نشتی بودن آن آبخوان را مشخص نماید.

بررسی پارامترهای تخمین زده شده توسط PEST نشان می دهد که مقادیر ضخامت و پارامترهای هیدرولیکی لایه زیرین بسیار کم تخمین زده شده است. این مساله نشان می دهد که در لایه آهکی زیرین توسعه کارست بسیار اندک بوده و یا اصلا رخ نداده است. شواهد زمین شناسی نیز این مساله را تایید می کند. در گزارش تهیه شده از آزمون پمپاژ منطقه به وجود ترکیبات قرمز رنگ (احتمالا آمیزه رنگی) در لایه آهکی زیرین اشاره شده است. از آنجایی که مدل صدقی - سامانی شکل کلی تری از مدل نویمن (Neuman, 1974) می باشد، مدل معکوس با کاهش ضخامت و کاهش مقادیر هدایت



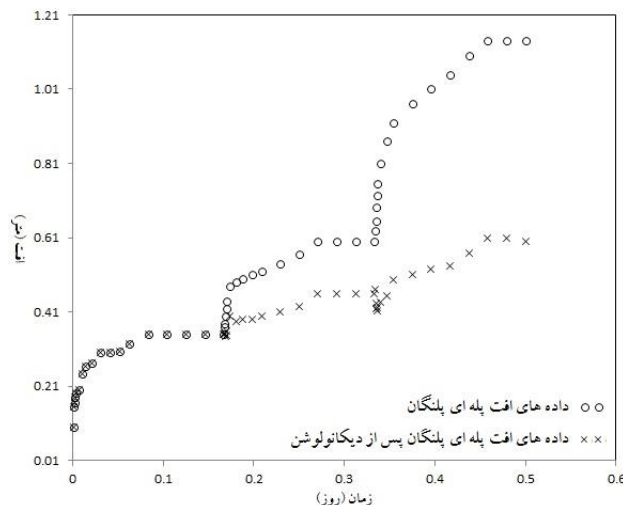
شکل ۳. اعمال الگوریتم دیکانولوشن به داده های پمپاژ منطقه پلنگان نیریز با استفاده از دبی های ارائه شده در گزارش.



شکل ۴-مقایسه داده های افت محاسباتی و مشاهده ای با استفاده از پارامترهای بهینه.

افت با دبی ثابت تبدیل گردید (شکل ۵). از آنجایی که در داده های جدید اثری از تغییرات پله ای افت، ناشی از تغییرات پله ای دبی، دیده نمی شود، بنابراین دبی های تخمین زده شده صحیح می باشند که توانسته اند تغییرات پله ای افت را حذف نمایند.

با توجه به نادرست بودن مقادیر دبی در آزمون پمپاژ (شکل ۳)، در فرایند تخمین پارامتر این مقادیر نیز به عنوان مجهول توسط PEST تخمین زده شد. برای چک کردن مقادیر دبی تخمینی توسط PEST این مقادیر وارد الگوریتم دیکانولوشن شد و با استفاده از آن داده های افت پله ای به داده های



شکل ۵. اعمال الگوریتم دیکانولوشن به داده‌های پمپاژ منطقه پلنگان نیزیز با استفاده از دبی‌های بهینه شده.

جدول ۲. مقادیر بهینه و حساسیت پارامترها (واحد طول متر و واحد زمان روز می باشد).

نام پارامتر	مقدار بهینه	حساسیت
K_{zu}	۱۰/۶۴	$۶/۲۰۱۱۵۲ \times ۱۰^{-۴}$
K_{ru}	۱۱/۱۶	$۶/۶۷۸۲۲۳ \times ۱۰^{-۳}$
S_{su}	$۱/۱۱۲ \times ۱۰^{-۵}$	۷۴۷/۱۵
S_y	$۹/۰ \times ۱۰^{-۲}$	$۸/۱۹۵۸۷۳ \times ۱۰^{-۲}$
K_{zf}	۰/۳۳	$۳/۹۶۲۱۰۷ \times ۱۰^{-۵}$
K_{rf}	۰/۵	$۱/۹۰۰۹۸۹ \times ۱۰^{-۵}$
K_m	۰/۱۹	$۴/۰۹۱۹۶۵ \times ۱۰^{-۵}$
S_{sf}	$۱/۸ \times ۱۰^{-۵}$	۱/۴۹۷۶۴
S_m	$۲/۰ \times ۱۰^{-۴}$	۱/۴۶۴۵۰
b_2	۶۱/۱	$۴/۵۷۰۵۷۱ \times ۱۰^{-۴}$
Q_0	۴۹۹/۴	$۱/۱۴۳۴۵ \times ۱۰^{-۴}$
ΔQ_1	۲۰۰/۸	$۸/۱۲۷۸۷۰ \times ۱۰^{-۵}$
ΔQ_2	۴۹۱/۶	$۴/۳۲۱۴۵۶ \times ۱۰^{-۵}$

نتیجه گیری

در این تحقیق مدل صدقی - سامانی برای استفاده در آزمون‌های پمپاژ پله‌ای و با چاه مشاهده‌ای نفوذ ناقص اصلاح گردید. پس از برنامه نویسی مدل اصلاح شده در کد فرترن ۹۰ و اتصال آن با کد تخمین پارامتر PEST از آن برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان منطقه پلنگان نیزیز با استفاده از داده‌های آزمون پمپاژ صورت گرفته در آن منطقه استفاده گردید. در این مقاله، برای اولین بار در هیدروژئولوژی، کاربرد الگوریتم دیکانولوشن برای بررسی و صحت سنجی تغییرات دبی آزمون افت پله‌ای نشان داده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که چگونه می‌توان از مدل اصلاح شده صدقی - سامانی

برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی یک آبخوان استفاده و در صورت لزوم با روش دیکانولوشن دبی‌های پمپاژ را صحت سنجی نمود. می‌توان مدل اصلاح شده را به عنوان یک ابزار هیدرولیکی برای تشخیص وجود یک آبخوان در زیر آبخوان اصلی و ویژگی‌های آن آبخوان بکار گرفت. روش ارائه شده در این مقاله یک روش کلی بوده و می‌توان از آن برای تحلیل داده‌های آزمون پمپاژ با هر الگوی پمپاژی استفاده کرد. با بکارگیری روش ارائه شده در این تحقیق بجای روش‌های سنتی مثل روش انطباق، می‌توان از پارامترهای هیدرولیکی بیشتری از آبخوان را با دقت بالاتر تعیین کرد و به شناخت دقیق‌تری از آبخوان، بدون افزایش هزینه جمع‌آوری داده‌ها، دست یافت.

معرفی پارامترهای مورد استفاده

K_{ru}	هدایت هیدرولیکی افقی لایه آبخوان آزاد یالایی (LT^{-1})	S	اقت در آبخوان آزاد یالایی (L)
K_{rf}	هدایت هیدرولیکی افقی درزه و شکافهای آبخوان یالایی (LT^{-1})	b_1	فاصله عمودی کف آبخوان یالایی از سطح ایستایی اولیه (L)
K_{zu}	هدایت هیدرولیکی عمودی آبخوان آزاد یالایی (LT^{-1})	b_2	فاصله عمودی کف آبخوان یالایی از سطح ایستایی اولیه (L)
K_{zf}	هدایت هیدرولیکی عمودی درزه و شکافهای آبخوان یالایی (LT^{-1})	l	فاصله عمودی کف اسکرین از سطح ایستایی اولیه (L)
K_m	هدایت هیدرولیکی بلوکهای آبخوان یالایی (LT^{-1})	d	فاصله عمودی یالای اسکرین از سطح ایستایی اولیه (L)
S_{zu}	ذخیره ویژه آبخوان آزاد یالایی (L^{-1})	r	فاصله شعاعی چاه مشاهده ای از چاه پیمایز (L)
S_{zf}	ذخیره ویژه درزه و شکافهای آبخوان زیرین (L^{-1})	Z	فاصله عمودی پیرویتر از سطح ایستایی اولیه (L)
S_{zm}	ذخیره ویژه بلوکهای آبخوان زیرین (L^{-1})	Q_0	دبی اولیه چاه پیمایز (L^3T^{-1})
S_y	آیدهی ویژه آبخوان آزاد یالایی	p	پارامتر تبدیل لایلاس
		a	پارامتر تبدیل هنکل

منابع

- چیت سازان، م، شاجری، س، میرزایی، ی، عبودی، ط، ۱۳۹۶، ارزیابی اختلاط منابع آبی آبخوان های کارستی، مطالعه موردی چشمه کارستی گرو واقع در شرق خوزستان. مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، دوره ۷، شماره ۲۴، تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۶۵-۷۵.
- محمدزاده ح، زندوکیلی، ز، رحیمی، ب، ۱۳۹۶، بررسی پارامترهای ساختاری و الگوی شکستگی ها، معماری زون های گسلی و ساختار نفوذپذیری گسل ها و نقش آن در نفوذ، زهکشی و فرار آب از سازند تیرگان در منطقه قوری میدان. مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، دوره ۷، شماره ۲۴، تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۷۶-۸۶.
- Ahmadi, M., Sartipizadeh, H., Ozkan, E., 2017. A new pressure-rate deconvolution algorithm based on Laplace transformation and its application to measured well responses. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol:157, p: 68-80 .
- Al-Shaibani, A.M., 2008. Hydrogeology and hydrochemistry of a shallow alluvial aquifer, western Saudi Arabia. *Hydrogeology journal*, Vol:16, No:1, p: 155-165 .
- Birsoy, Y.K., Summers, W., 1980. Determination of aquifer parameters from step tests and intermittent pumping data. *Groundwater*, Vol:18, No:2, p:137-146.
- Bourdet, D., Ayoub, J., Pirard, Y., 1989. Use of pressure derivative in well test interpretation. *SPE Formation Evaluation*, Vol:4, No:2, p:293-302 .
- Butler, J.J., McElwee, C.D., 1990. Variable-rate pumping tests for radially symmetric nonuniform aquifers. *Water Resources Research*, Vol:26, No:2, p: 291-306 .
- Chakrabarty, C., Enachescu, C., 1997. Using the deconvolution approach for slug test analysis: theory and application. *Groundwater*, Vol:35, No:5, p: 797-806 .
- Cooper, H.H., Jacob, C.E., 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, Vol:24, No:4, p: 526-534 .
- Crump, K.S., 1976. Numerical inversion of Laplace transforms using a Fourier series approximation. *Journal of the ACM (JACM)*, Vol:23, No:1, p: 89-96 .
- Cumming, J., Wooff, D., Whittle, T., Gringarten, A., 2013. Multiple well deconvolution, SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers .
- De Hoog, F.R., Knight, J., Stokes, A., 1982. An improved method for numerical inversion of Laplace transforms. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, Vol:3, No:3, p:357-366 .
- Doherty, J., Brebber, L., Whyte, P., 1994. PEST: Model-independent parameter estimation. *Watermark Computing*, Corinda, Australia, 122 .
- Gringarten, A.C., 2008. From straight lines to deconvolution: The evolution of the state of the art in well test analysis. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, Vol:11, No:1, p: 41-62 .
- Hantush, M.S., 1959. Nonsteady flow to flowing wells in leaky aquifers. *Journal of Geophysical Research*, Vol:64, No:8, p:1043-1052 .
- Hantush, M.S., 1960. Modification of the theory of leaky aquifers. *Journal of Geophysical Research*, Vol:65, No:11, p:3713-3725 .

- Hantush, M.S., 1964. Hydraulics of wells. *Advances in hydrosience*, Vol:1, p: 281-432 .
- Hantush, M.S., Jacob, C.E., 1955. Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, Vol:36, No:1, p:95-100 .
- Hill, M.C., 1998. *Methods and guidelines for effective model calibration*. US Geological Survey Denver, CO, USA .
- Hill, M.C., Banta, E.R., Harbaugh, A.W., Anderman, E.R., 2000. MODFLOW-2000, the US Geological Survey modular ground-water model, user guide to the observation, sensitivity, and parameter-estimation processes and three post-processing programs. 2331-1258, US Geological Survey, Branch of Information Services distributor.
- Huang, Y.-C., Yeh, H.-D., 2007. The use of sensitivity analysis in on-line aquifer parameter estimation. *Journal of Hydrology*, Vol:335, No:3, p:406-418 .
- Hunt, B., 2005. Flow to Vertical and Nonvertical Wells in Leaky Aquifers. *Journal of Hydrological Engineering*, Vol:10, No:6, p:477-484.
- Issar, A., 1969. The groundwater provinces of Iran. *Hydrological Sciences Journal*, Vol:14, No:1, p: 87-99 .
- Kuchuk, F.J., Carter, R.G., Ayestaran, L., 1990. Deconvolution of wellbore pressure and flow rate. *SPE Formation Evaluation*, Vol:5, No:1, p: 53-59 .
- Levitani, M.M., 2003. Practical application of pressure-rate deconvolution to analysis of real well tests, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers .
- Liu, W., Liu, Y., Han, G., Zhang, J., Wan, Y., 2017. An improved deconvolution algorithm using B-splines for well-test data analysis in petroleum engineering. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol:149, p:306-314 .
- Malama, B., Kuhlman, K.L., Barrash, W., 2007. Semi-analytical solution for flow in leaky unconfined aquifer-aquitard systems. *Journal of Hydrology*, Vol:346, No:1-2, p: 59-68.
- Malama, B., Kuhlman, K.L., Barrash, W., 2008. Semi-analytical solution for flow in a leaky unconfined aquifer toward a partially penetrating pumping well. *Journal of Hydrology*, Vol:356, No:1-2, p: 234-244.
- Milanovic, P., Aghili, B., 1990. Hydrogeological characteristics and groundwater mismanagement of Kazerun karstic aquifer, Zagros, Iran. *IAHS PUBLICATION*. p:163-163 .
- Mishra, P.K., Vessilinov, V., Gupta, H., 2013. On Simulation and Analysis of Variable-Rate Pumping Tests. *Groundwater*, Vol:51, No:3, p: 469-473 .
- Neuman, S.P., 1974. Effect of partial penetration on flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response. *Water Resource Research*, Vol:10, No:2, p: 303-312 .
- Neuman, S.P., Gardner, D.A., 1989. Determination of Aquitard/Aquiclude Hydraulic Properties from Arbitrary Water-Level Fluctuations by Deconvolution. *Groundwater*, Vol:27, No:1, p: 66-76 .
- Olsthoorn, T.N., 2008. Do a bit more with convolution. *Groundwater*, Vol:46, No:1, p:13-22 .
- Osman, Y., Retnanto, A., Samir, M., Fraim, M., 2017. Enhancing Pressure Transient Analysis through the Application of Deconvolution Methods ,Case Study, *SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference*. Society of Petroleum Engineers .
- Rouboutsos, A., Stewart, G., 1988. A direct deconvolution or convolution algorithm for well test analysis, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers .
- Samani, N., Pasandi, M., Barry, D., 2006. Characterizing a heterogeneous aquifer by derivative analysis of pumping and recovery test data. *Geological Society of Iran Journal*, 1(ECOL-ARTICLE-2008-093). p:29-41 .
- Sedghi, M.M., Samani, N., 2010. Three-dimensional semianalytical solutions of groundwater flow to a well in fractured wedge-shaped aquifers. *Journal of Hydrological Engineering*, Vol:15, No12, p: 974-984.
- Sedghi, M.M., Samani, N., 2015. Semi-analytical solutions for flow to a well in an unconfined-fractured aquifer system. *Advances in Water Resources*, Vol:83, p: 89-101.
- Sedghi, M.M., Samani, N., Sleep, B., 2009. Three-dimensional semi-analytical solution to groundwater flow in confined and unconfined wedge-shaped aquifers. *Advances in Water Resources*, Vol:32, No:6, p: 925-935.
- Spane, F., Wurster, S., 1993. DERIV: A computer program for calculating pressure derivatives for use in hydraulic test analysis. *Groundwater*, Vol:31, No:5, p: 814-822 .
- Stehfest, H., 1970. Algorithm 368: Numerical inversion of Laplace transforms [D5]. *Communications of the ACM*, Vol:13, No:1, p:47-49 .
- Subyani, A.M., 2004. Use of chloride-mass balance and environmental isotopes for evaluation of groundwater recharge in the alluvial aquifer, Wadi Tharad, western Saudi Arabia. *Environmental Geology*, Vol:46, No:6-7, p:741-749 .
- Tiab, D., Puthigai, S.K., 1988. Pressure-Derivative Type Curves, for Vertically Fractured Wells. *SPE formation evaluation*, Vol:3, No:1, p:156-158 .
- Wagner, W., 2011. *Groundwater in the Arab Middle East*. Springer Science & Business Media .
- Zhan, H., Zlotnik, V.A., 2002. Groundwater flow to a horizontal or slanted well in an unconfined aquifer. *Water Resource Research*, Vol:38, No7, p:13-1-13-11