

## انتخاب روش مناسب برای تحلیل داده‌های آزمایش پمپاژ

### در سفره‌های کارستی

نوشته: دکتر غلامحسین کرمی\*

## Selecting Appropriate Method for Analyzing Pumping Test Data in Karstic Aquifers

By: Dr. Gh. Karami \*

#### چکیده

داده‌های آزمایش پمپاژ سفره‌های کارستی اغلب با استفاده از روشهای استاندارد، که برای سفره‌های دانه‌ای ارائه شده‌اند، تحلیل می‌شوند. روشهای استاندارد که برای تحلیل داده‌های آزمایش پمپاژ در سفره‌های کارستی مورد استفاده قرار می‌گیرند، غالباً روشهای Theis (1935) و Cooper & Jacob (1946) می‌باشند. بعضی از محققان برای تحلیل داده‌های آزمایش پمپاژ در سفره‌های کارستی از روشهایی که بر پایه نظریه تخلخل دوگانه استوارند، استفاده کرده‌اند. سؤالی که اینجا مطرح است این است که کدام یک از این روشها برای تحلیل داده‌های آزمایش پمپاژ مناسب‌تر هستند. به نظر می‌رسد که در بسیاری از موارد مناسب‌ترین روش برای تحلیل داده‌های آزمایش پمپاژ در سفره‌های کارستی روشهای Theis (1935) و Cooper & Jacob (1946) است. در صورتی که در بعضی از موارد، برای تحلیل داده‌های آزمایش پمپاژ در سفره‌های کارستی باید از روشهایی که اساس آنها نظریه تخلخل دوگانه است، استفاده کرد. در این مقاله بر اساس شکل منحنی افت - زمان مربوط به چند آزمایش پمپاژ در مناطق مختلف کارستی، مناسب‌ترین روش تحلیل داده‌های آزمایش پمپاژ در سفره‌های کارستی ارائه شده است.

**کلید واژه‌ها:** سفره‌های کارستی، آزمایش پمپاژ، نظریه تخلخل دوگانه

#### Abstract

Pumping test data in karstic aquifers are usually analyzed using conventional methods originally developed for granular aquifers. Theis (1935) and Cooper-Jacob (1946) straight-line methods are the most common conventional methods applied to karstic aquifers. Some investigators have utilized double porosity based methods for analyzing pumping test data in karstic aquifers. However, this question might be raised that which method is the most appropriate for analyzing pumping test data in karstic aquifers. It seems that the most appropriate methods for almost all pumping test data in karstic aquifers are Theis (1935) and Cooper-Jacob (1946) methods. However, methods based on double porosity theory should be applied for some of pumping test data. In this paper, the most appropriate method for analyzing pumping test data in karstic aquifers is addressed based on a number of pumping test data obtained from different karstic area.

**Key words:** Karstic aquifers, Pumping test, Double porosity model

#### مقدمه

(Todd, 1980; Walton, 1987). در سفره‌های آبدار ناهمگن (برای مثال سفره‌های کارستی)، ارزیابی میانگین خواص هیدرولیکی سفره آبدار بر اساس اطلاعات به دست آمده از مغزه‌های حفاری تعداد محدودی چاهک آزمایشی دشوار و یا ناممکن است. در چنین سفره‌های آبداری،

آزمایش پمپاژ یکی از معتبرترین و رایج‌ترین روشهای صحرایی برای تعیین ویژگیهای هیدرولیکی سفره‌های آبدار است، چرا که این آزمایش ویژگیهای هیدرولیکی بخش نسبتاً بزرگی از سفره آبدار (بخشی که در آن مخروط افت تشکیل شده است) را بازتاب می‌کند



### داده‌ها و روشهای به کار گرفته شده در این مطالعه

به منظور ارزیابی اجرای روشهای مرسوم و روشهایی که اساس آنها مدل تخلخل دوگانه است، داده‌های آزمایش پمپاژ از سفره‌های آبدار آهکی مختلف، مورد تحلیل قرار گرفت. مجموعه داده‌های آزمایش پمپاژ استفاده شده، محدوده وسیعی از آبدهی و مدت زمان پمپاژ را شامل می‌شوند. همچنین این داده‌ها همان گونه که گفته شد مربوط به سفره‌های کارستی مختلفی هستند که ویژگیهای هیدرولیکی آنها بسیار متفاوت است. برای برآورد ضرایب انتقال با به‌کارگیری روشهای Theis (1935) و Cooper-Jacob (1946) از نرم افزار  $Aquifer^{win32}$  استفاده شده است. در خصوص روشهایی که اساس آنها مدل تخلخل دوگانه است، از روش (1984) Meonch که توانایی ایجاد تعداد بی‌شماری منحنی تیپ را شامل می‌شود، و نرم افزار  $Aquifer^{win32}$  استفاده شده است. ذکر این نکته ضروری است که به منظور حذف اثرات مربوط به ذخیره داخل چاه پمپاژ، بسته به بده پمپاژ، از ۱ تا ۱۰ دقیقه ابتدای داده‌ها صرف نظر شده است (هر قدر بده پمپاژ بیشتر باشد اثر ذخیره داخل چاه کمتر خواهد بود).

### کاربرد روشهای مرسوم برای تحلیل داده‌های آزمایش پمپاژ

همان گونه که در بخش مقدمه اشاره شد، روشهای مرسوم ارائه شده برای سفره‌های آبدار دانه‌ای، به طور گسترده برای تحلیل داده‌های آزمایش پمپاژ در سفره‌های کارستی مورد استفاده قرار می‌گیرند. دلیل این امر این است که رفتار عمومی بیشتر سفره‌های آبدار کارستی، کم و بیش شبیه رفتار سفره‌های آبدار دانه‌ای هستند و نتایج به دست آمده به وسیله استعمال روشهای مرسوم در محدوده قابل قبولی واقع می‌شوند. افزون بر این، در مقدمه ذکر شد که از بین روشهای مرسوم، دو روش (1935) Theis و (1946) Cooper & Jacob رایج‌ترین روشهایی هستند که برای تحلیل داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

به منظور بررسی قابلیت اجرای روشهای (1935) Theis و (1946) Cooper & Jacob برای داده‌های آزمایش پمپاژ سفره‌های کارستی، چند مجموعه داده آزمایش پمپاژ از سفره‌های آهکی مختلف با این روشها تحلیل شده‌اند (شکل‌های ۱ و ۲).

شکل ۱ کاربرد روش (1935) Theis را برای تحلیل تعدادی آزمایش پمپاژ در سفره‌های کارستی نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل دیده می‌شود، به رغم وجود ناهمگنی در این گونه سفره‌ها، تقریباً تمام داده‌های مشاهده شده بر منحنی تیپ (1935) Theis منطبق می‌شوند. بنابراین چنین انطباقی می‌تواند تأییدی بر نتیجه‌گیری محققانی باشد که اظهار کرده‌اند رفتار کلی بیشتر سفره‌های کارستی همانند سفره‌های دانه‌ای است.

آزمایش پمپاژ می‌تواند برآوردهای نسبتاً خوبی از خواص هیدرولیکی ارائه دهد.

بیشتر داده‌های آزمایش پمپاژ در سفره‌های کارستی، با استفاده از روشهای استاندارد ارائه شده برای سفره‌های دانه‌ای، تحلیل می‌شوند. چون رفتار کلی بیشتر سفره‌های آبدار کارستی شبیه سفره‌های آبدار دانه‌ای است، و به کارگیری روشهای دیگر غالباً به اطلاعات ویژه‌ای نیاز دارند که معمولاً در دسترس نمی‌باشند، روشهای استاندارد که برای تحلیل داده‌های آزمایش پمپاژ در سفره‌های آبدار کارستی مورد استفاده قرار می‌گیرند، غالباً روشهای Theis و Cooper & Jacob هستند. برای مثال می‌توان به کارهای Driscoll, 1986; Teutsch, 1991; Michalski & Britton, 1997; Meier et al., 1998; Jones, 1999 و Dillon et al., 2001 اشاره کرد.

بعضی از محققان برای تحلیل داده‌های آزمایش پمپاژ در سفره‌های آبدار کارستی از روشهایی بر پایه مدل تخلخل دوگانه، استفاده کرده‌اند. در مدل تخلخل دوگانه که برای نخستین بار به وسیله Barenblatt et al. (1960) ارائه شد، درز و شکافها که تخلخل ثانویه را تشکیل می‌دهند، دارای تراوایی بالا و ضریب ذخیره نسبتاً پایین می‌باشند، در حالی که خلل و فرج بین دانه‌ها که عمدتاً از نوع تخلخل اولیه است دارای تراوایی کم و ضریب ذخیره بالاست.

در شرایطی که تخلخل دوگانه حاکم است، در برخی موارد، اطلاعات افت - زمان شامل سه قسمت می‌شود. بخشهای اول و سوم با منحنی نوع تاپس منطبق می‌شوند، در حالی که بخش دوم انحرافی را از تاپس نشان می‌دهد (شیب منحنی افت - زمان در مقایسه با شیب منحنی تیپ تاپس کمتر می‌شود) که دلیل آن افزوده شدن جریان از توده سنگ به درون درز و شکافهاست. یکی از روشهایی که بر اساس مدل تخلخل دوگانه استوار است و برای تحلیل داده‌های آزمایش پمپاژ در سفره‌های کارستی مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش (1984) Moench است.

بیشتر افرادی که با آزمایش پمپاژ در سفره‌های کارستی سروکار دارند، این پرسش مشترک را دارند که برای تحلیل داده‌های آزمایش پمپاژ در سفره‌های کارستی روشهای استاندارد مربوط به سفره‌های دانه‌ای مناسب‌تر است یا روشهایی که اساس آنها مدل تخلخل دوگانه است؟

در این مقاله، روشهای استاندارد (1935) Theis و (1946) Cooper & Jacob (که برای سفره‌های دانه‌ای ارائه شده‌اند) و روش (1984) Moench (که برای سفره‌های درز و شکاف دار ارائه شده) برای تحلیل داده‌های آزمایش پمپاژ به کار گرفته می‌شوند و در نهایت با توجه به مقایسه این روشها و شکل منحنی افت - زمان مناسب‌ترین روش تحلیل داده‌ها آزمایش پمپاژ در سفره‌های کارستی ارائه خواهد شد.



است که از همان روشهای مرسوم استفاده شود (شکلهای ۳a تا ۳d). در موارد نسبتاً کمی، منحنی افت - زمان در سفره‌های کارستی شامل سه بخش می‌شود. به این ترتیب که بخشهای اول و سوم با منحنی تیپ تاپس منطبق می‌شوند، در حالی که بخش دوم یک کاهش شیب (انحراف از منحنی تاپس) را نشان می‌دهد که دلیل آن افزوده شدن جریان از توده سنگ به درون درز و شکافها است (شکلهای ۳e و ۳f). در حقیقت رفتاری تقریباً مشابه با سفره‌های آزاد را شامل می‌شوند که در منحنی افت-زمان این سفره‌ها نیز سه بخش وجود دارد که بخش دوم به علت آبدهی تأخیری (Delayed yield) از منحنی تیپ تاپس انحراف نشان می‌دهد. در شرایطی که داده‌های آزمایش پمپاژ رفتار سه قسمتی (که بیانگر تأثیرگذاری تخلخل دوگانه است) را نشان می‌دهند، استفاده از روشهای مرسوم خطای قابل توجهی را ایجاد خواهد کرد. بنابراین برای چنین داده‌های آزمایش پمپاژ، روش Moench (1984) که قادر است تعداد بی‌شماری منحنی تیپ ایجاد نماید، مناسب‌تر است.

#### انتخاب روش مناسب برای تحلیل داده‌های آزمایش پمپاژ

بعضی از محققان به طور صریح یا ضمنی روشهای مرسوم (Theis (1935) و Cooper & Jacob (1946) را برای تحلیل داده‌های آزمایش پمپاژ در سفره‌های کارستی پیشنهاد کرده‌اند (برای مثال Jones ; 1999 1998 و Dillon et al. 2001). بر اساس این توصیه‌ها، روشهای مذکور و همچنین روش Moench (1984) (که برای سفره‌های درز و شکاف‌دار ارائه شده است و اساس آن نظریه تخلخل دوگانه است) برای تعداد زیادی آزمایش پمپاژ در سفره‌های کارستی به کار گرفته شده‌اند و بر اساس مقایسه نتایج به دست آمده و شکل منحنی افت - زمان، پیشنهادات زیر برای ارزیابی و برآورد ویژگیهای هیدرولیکی سفره‌های کارستی ارائه می‌شود:

۱) برای آن دسته از داده‌های آزمایش پمپاژ که در آنها منحنی افت - زمان در سیستم نیمه لگاریتمی یک خط چند شیبی (Multi-slope line) را ارائه می‌دهد (که بازتاب‌کننده ناهمگنی سفره است)، کاربرد روش Moench (1984)، به دلیل اینکه تعداد بی‌شماری منحنی تیپ را شامل می‌شود و انتخاب یک منحنی تیپ منحصرنفرد از میان آنها برای داده‌های مورد نظر بسیار مشکل است، مناسب نیست. افزون بر این، در شرایطی که درجه ناهمگنی بسیار بالا است تغییرات منحنی افت - زمان در انتخاب یک منحنی تیپ از بین تعداد زیاد منحنیهای تیپ این روش می‌تواند باعث گمراهی کاربر شود. بنابراین در چنین شرایطی، مناسب‌ترین روشها، روشهای مرسوم است.

به هر حال، بخشی از داده‌ها (بویژه داده‌های کوتاه مدت آزمایش پمپاژ) بر منحنی تیپ (Theis (1935) منطبق نمی‌شوند. چنین بخشهایی اختلافهای بین خواص هیدرولیکی محدوده کوچک اطراف چاه (منعکس‌کننده داده‌های کوتاه مدت آزمایش پمپاژ) با محدوده بزرگ‌تری است که در زمانهای طولانی‌تر تحت تأثیر پمپاژ قرار می‌گیرند و در حقیقت داده‌های مربوط به زمانهای طولانی‌تر میانگین دقیق‌تری را ارائه نمایند.

شکل ۲ کاربرد روش Cooper & Jacob (1946) را برای تحلیل تعدادی آزمایش پمپاژ در سفره‌های کارستی نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل دیده می‌شود، روند کلی بیشتر داده‌های مشاهده شده در سیستم نیمه لگاریتمی (زمان بر روی محور لگاریتمی) خط راست است و ناهمگنیهای موجود در این گونه سفره‌ها باعث شده که اغلب یک خط چند شیبی (Multi-slope line) ایجاد شود. همان گونه که برخی از محققان اظهار کرده‌اند (برای مثال، Sanchez-Vila et al., 1999)، در روش Cooper & Jacob (1946)، روند کلی داده‌ها در یک سفره آبدار ناهمگن می‌تواند یک متوسط خوبی از خواص هیدرولیکی را ارائه دهد.

در هر حال، بخشی از داده‌های مشاهده شده از روند کلی خط راست پیروی نمی‌کنند. چنین بخشهایی، ناهمگنیهای موجود در سفره کارستی را منعکس می‌کنند. در مورد انحراف داده‌های کوتاه مدت از روند کلی خط راست، افزون بر تأثیر ناهمگنیهای موجود در سفره، می‌تواند به برآورده شدن شرط روش Cooper & Jacob (1946) یعنی کوچک بودن تابع  $u$  نیز مربوط شود.

#### کاربرد روش Moench (1984)

روش Moench (1984) که بر اساس نظریه تخلخل دوگانه است، شامل

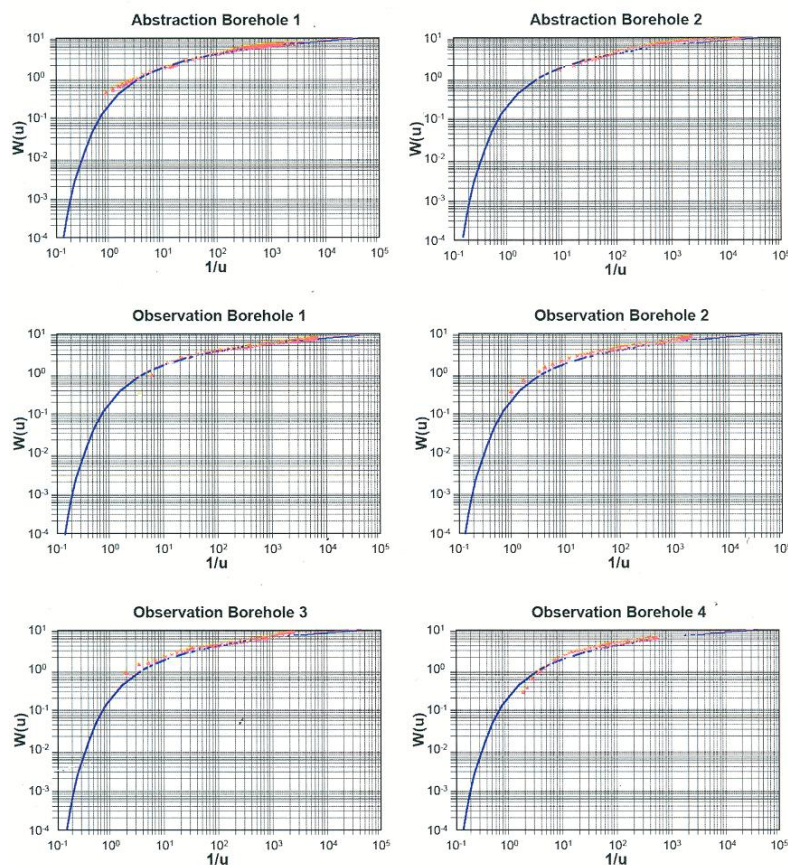
تعداد زیادی منحنی تیپ (Type Curve) می‌شود که برخی از آنها به منحنی تیپ Theis (1935) نزدیک هستند. همان گونه که در بخش قبل گفته شد، در بیشتر موارد، داده‌های آزمایش پمپاژ در سفره‌های آبدار کارستی از منحنی تیپ Theis (1935) پیروی می‌کنند. چنانچه برای تحلیل چنین داده‌هایی از روش Moench (1984) استفاده شود، داده‌های آزمایش پمپاژ بر روی منحنی از منحنیهای تیپ این روش منطبق خواهد شد که آن منحنی یا همان منحنی تیپ Theis (1935) است و یا به منحنی تاپس بسیار نزدیک است. به این ترتیب که برای این گونه داده‌های آزمایش پمپاژ، نتایج به دست آمده از روشهای مرسوم و روش Moench (1984) تقریباً یکسان هستند. در چنین شرایطی راحت‌تر و مناسب‌تر این

### نتیجه گیری

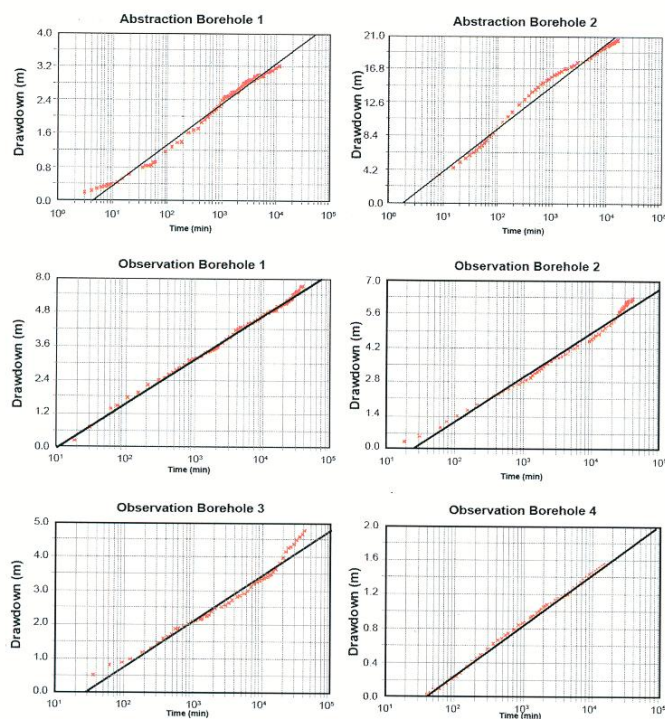
بر اساس مطالب مندرج در مراجع، داده‌های آزمایش پمپاژ مربوط به سفره‌های کارستی اغلب با استفاده از روشهای مرسوم، (Theis (1935 و (Cooper & Jacob (1946)، که برای سفره‌های آبدار دانه‌ای ارائه شده‌اند، تحلیل می‌شوند. اگرچه در بسیاری موارد، رفتار کلی سفره‌های کارستی همانند سفره‌های آبدار دانه‌ای است، و به کارگیری این روشها برای تحلیل داده‌های آزمایش پمپاژ در سفره‌های کارستی از دقت کافی برخوردار است. در هر حال، در بعضی از موارد که منحنی افت-زمان شامل سه بخش می‌شود، کاربرد روشهای مرسوم برای تحلیل داده‌های آزمایش پمپاژ در سفره‌های کارستی خطاهای قابل توجهی ایجاد خواهد کرد. در این گونه سفره‌ها، منحنی افت-زمان از الگو سه بخشی نظریه تخلخل دوگانه پیروی می‌کند و به همین دلیل داده‌های آزمایش پمپاژ باید با روشهایی که اساس آنها نظریه مذکور می‌باشد (مانند Moench (1984)، تحلیل شوند.

۲) در شرایطی که منحنی افت-زمان از الگوی نظریه تخلخل دوگانه پیروی می‌کند و یا به عبارت دیگر منحنی افت-زمان شامل سه بخش می‌شود، در چنین مواردی، مناسب‌ترین روش برای تحلیل داده‌ها، روش Moench (1984) است که شامل تعداد بی‌شماری منحنی تیپ می‌شود و منحنی افت-زمان مشاهده شده با یکی از این منحنیهای تیپ منطبق می‌شود (شکلهای ۳e و ۳f).

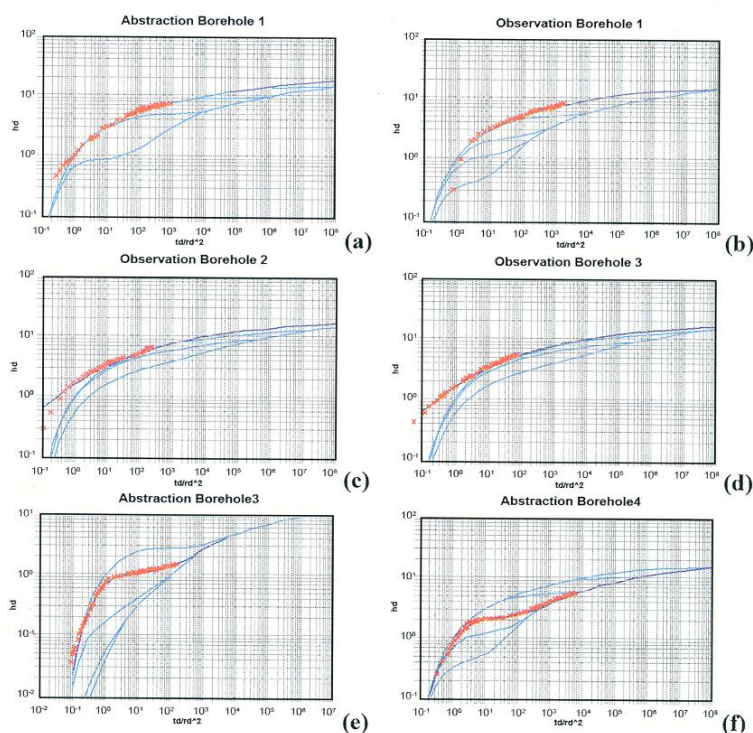
۳- برای تشخیص ناهمگنیهای موجود در سفره، مناسب‌ترین روش، روش خط راست Cooper & Jacob (1946) است که در آن ناهمگنیها به صورت تغییرات متوالی شیب منحنی افت-زمان در سیستم نیمه لگاریتمی ظاهر می‌شوند (شکل ۲).



شکل ۱- کاربرد روش Theis (1935) برای تحلیل داده‌های آزمایش پمپاژ در سفره‌های کارستی



شکل ۲- کاربرد روش Cooper-Jacob (1946) برای تحلیل داده‌های آزمایش پمپاژ در سفره‌های کارستی



شکل ۳- کاربرد روش Moench (1984) برای تحلیل داده‌های آزمایش پمپاژ در سفره‌های کارستی

## References

- Barenblatt, G. E., Zheltov, I. P. & Kochina, I. N. , 1960- Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics* **24**:1286-1303.
- Cooper, H. H. & Jacob, C. E. , 1946- A generalised graphical method for evaluating formation constants and summarising well field history. *American Geophysical Union Transactions* **27**:526-534.
- Dillon, P., Pavelic, P., Wright, M., Peter, P. & Nefiodovas, A., 2001- Small-scale heterogeneity and anisotropy of a confined carbonate aquifer from triaxial tests on core samples. Pages 815-819 in S. a. wohnlich, editor. *New Approaches Characterising Groundwater Flow*. Swets and Zeitlinger Lisse.
- Driscoll, F. G. ,1986- *Groundwater and wells*. Johnson Division, Minnesota, USA.
- Jones, W. K., 1999- Pump tests of wells at the national training centre near Shepherdstown. Pages 259-261 in A. N. Palmer, M. V. Palmer, and I. D. Sasowsky, editors. *Karst Modelling*, West Virginia
- Meier, P.M., Carrera, J. & Sanchez-Vila, X., 1998- An evaluation of Jacob's method for the interpretation of pumping tests in heterogeneous formations.:1011-1025.
- Michalski, A., & Britton, R.,1997- The role of bedding fractures in the hydrogeology of sedimentary bedrock- Evidence from the Newark Basin, New Jersey. *Ground Water* **35**:318-327.
- Moench, A. F., 1984- Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin. *Water Resour. Res.* **20**:831-846.
- Teutsch, G., & Sauter, M., 1991- Groundwater modelling in karst terranes: scale effects, data acquisition and field validation. Pages 17-35 in *Third Conference on Hydrogeology, Ecology, Monitoring, and Management of Ground Water in Karst Terranes*. National Ground Water Association, Dublin, Ohio.
- Theis, C. V., 1935- The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Transactions of American Geophysical Union* **16**:519-524.
- Todd, D. K., 1980- *Groundwater hydrology*, 2 edition. John Wiley & sons, New York.
- Walton, W. C., 1987- *Groundwater pumping tests*. Lewis Publishers, Inc., U.S.A.

\*دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود

\*Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology