

## یک حل تحلیلی برای تجزیه و تحلیل جریان دائمی آب زیرزمینی در آبخوانهای نشتی نامحدود و محدود

ایرج سعید پناه<sup>۱</sup>، سیامک طاهری<sup>۲</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۰۳/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۰۶

مقاله پژوهشی

چکیده

آگاهی از مقادیر و تغییرات پارامترهای هیدرولوژیکی آبخوانها در راستای مدیریت پایدار و حفاظت از منابع آب های زیرزمینی بسیار مهم و حیاتی است. از جمله پارامترهای هیدرولوژیکی آبخوان نشتی در جریان آب های زیرزمینی، ضریب قابلیت انتقال و نشت ویژه می باشد. نوآوری این تحقیق بررسی تاثیر تغییرات این پارامترها بر روی جریان دائمی آب زیرزمینی آبخوان های نشتی محدود و نامحدود با استفاده از روابط دقیق و جدید ارائه شده در این پژوهش می باشد. در این تحقیق آبخوان های نشتی نامحدود و محدود در حالت جریان دائمی آب های زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفتند و با استفاده از یک روش تحلیلی، روابطی جدید و دقیق برای محاسبه مقدار افت سطح پیزومتریک در هر کدام از آبخوان ها به دست آمده است. همچنین با استفاده از این روابط آنالیز حساسیت ضریب قابلیت انتقال و نشت ویژه آبخوان ها انجام شده است.

واژه های کلیدی: تحلیل حساسیت، جریان دائمی آب زیرزمینی، حل تحلیلی، ضریب قابلیت انتقال، نشت ویژه

<sup>۱</sup> استادیار گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، ۰۹۱۲۴۴۳۲۱۸۱ Saeedpanah@znu.ac.ir (نویسنده مسئول)

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی عمران گرایش مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی دانشگاه زنجان، ایمیل: Siamaktaheri@znu.ac.ir



## مقدمه

بیشترین صدمه به آب های زیرزمینی کاهش سطح آب های زیرزمینی است. علاوه بر افت شدید سطح آب در آبخوان ها، فعالیت های کشاورزی، صنعتی و شهری آلاینده های مختلفی را به آبخوان ها تحمیل می کنند که برای جلوگیری از ادامه افت کمی و کیفی، مدیریت بهره برداری و حفاظت از آب های زیرزمینی باید به عنوان یک اصل و پایه در برنامه ریزی های کشور قرار گیرد. آب های زیرزمینی یکی از منابع اصلی و کلیدی آب شرب به شمار می روند که مخزن های آب طبیعی بحساب می آیند که نیاز به سرمایه گذاری ندارند، خود پالایش هستند، آسیب پذیری کمی دارند و منابع مطمئن تری نسبت به آب های سطحی می باشند. بنابراین بررسی هیدرولیک آبخوان ها در مدیریت منابع آب های زیرزمینی بسیار مهم می باشد. از جمله انواع آبخوان ها، آبخوان نشتی می باشد (Lohman 1972). در آبخوان های نشتی در مقایسه با دیگر انواع آبخوان ها، جریان آب زیرزمینی پیچیده تر است (Wen et al. 2016). در زمینه آبخوان های نشتی پژوهش های زیادی صورت گرفته است که می توان به کارهای زیر اشاره نمود:

Jacob (1946) ، Hantush and Jacob (1955) و Hantush (1959) برای حرکت جریان آب زیرزمینی در آبخوان نشتی حل هایی تحلیلی ارائه کردند. Tang and Jiao (2001) برای آبخوان نشتی در کنار مرز آبی با نوسان، حل تحلیلی دو بعدی ارائه دادند و مشاهده کردند که به دلیل نشت، دامنه جزر و مد آب زیرزمینی کاهش می یابد. Li and Jiao (2001) برای جزر و مد آب های زیرزمینی موجود در آبخوان نشتی ساحلی حل های تحلیلی ارائه دادند و تاثیر نشت، جزر و مد و طول گسترش زیر دریا بر روی نوسانات آب های زیرزمینی را مورد بررسی قرار دادند. Lin and Chen (2005) برای برآورد متغیر های آبخوان یک روش شبکه عصبی مصنوعی، بر پایه ترکیب شبکه تابع پایه شعاعی ارائه کردند تا بهترین نقطه انطباق را برای تعیین متغیر های آبخوان نشتی به دست آورند. Chuang and Yeh (2007) برای تحقیق اثر نوسانات جزر و مد و نشت بر روی هد هیدرولیکی آبخوان نشتی یک حل تحلیلی ارائه کردند. نتایج نشان داد زمانی که نشت ویژه بیشتر از ۰,۰۰۱ می شود، اثر ضرایب قابلیت انتقال و ذخیره بر روی نوسانات

هد هیدرولیکی محسوس تر است. (Wen et al. 2011) برای آزمایش هد ثابت در آبخوان نشتی با ضخامت محدود یک مدل ریاضی ارائه کردند. (Yu et al. 2013) یک مدل نیمه تحلیلی برای تحقیق اثر خم شدگی لایه نشتی و نرخ نشت بر روی مقدار افت سطح پیژومتریک تحت اثر پمپاژ با نرخ ثابت در آبخوان نشتی ارائه کردند. نتایج نشان داد که مقدار افت تحت تاثیر اثر خم شدگی لایه نشت و اثر مقدار نشت به ترتیب در ابتدا و انتهای زمان پمپاژ قرار می گیرد. (Li et al. 2014) از طریق روش برازش منحنی اثر مدت پمپاژ بر روی تخمین پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان نشتی را با استفاده از ۲ آزمایش پمپاژ در محل و ۲۴ آزمایش پمپاژ غیردائمی شبیه سازی شده مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدت زمان پمپاژ بر روی دقت تخمین پارامترهای هیدروژئولوژیکی اثر دارد. Feng and Zhan (2015) برای آبخوان نشتی یک مدل تحلیلی ارائه کردند که در آن اثر ترکیبی نفوذ جزئی چاه، ضریب ذخیره لایه نشتی، ناهمسانی آبخوان را در نظر گرفتند. Zhao et al. (2016) یک حل نیمه تحلیلی برای جریان آب زیرزمینی تحت اثر پمپاژ در یک آبخوان منطقه-گسلی شیبدار نشتی ارائه کردند. حل ارائه شده در توافق کامل با حل تاپس ترکیب شده با اصول بر هم نهی و همچنین حل Huang et al. (2014) بود. آن ها دریافتند که مقدار افت با افزایش زاویه شیب آبخوان افزایش می یابد و این اثر زاویه با گذشت مدت زمان طولانی از پمپاژ ناچیز می شود. Lin et al. (2017) برای توصیف پاسخ جریان به پمپاژ با هد ثابت در یک آبخوان نشتی و با در نظر گرفتن جریان نیمه اشباع، یک مدل ریاضی جدید ارائه دادند. نتایج نشان داد که جریان چاه به تغییرات در ضریب نفوذپذیری شعاعی و ضخامت ناحیه اشباع بسیار حساس است. Saeedpanah and Golmohamadi Azar (2017) برای محاسبه جریان های غیردائمی درون یک آبخوان نشتی بین دو جریان موازی با هد های هیدرولیکی ثابت و متغیر حل های تحلیلی جدیدی با استفاده از روش تبدیل لاپلاس ارائه کردند.

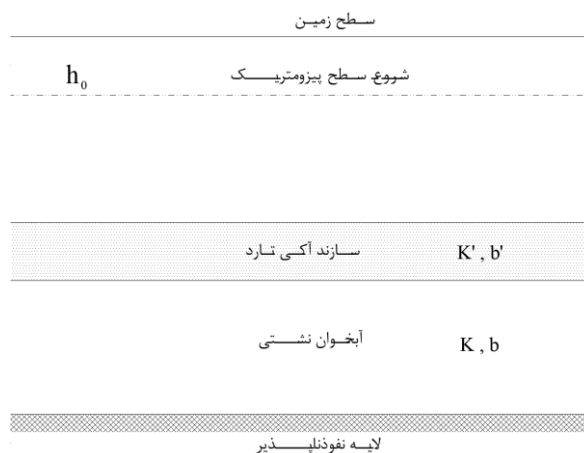
آگاهی از مقادیر و تغییرات پارامترهای هیدرولوژیکی آبخوان ها در راستای مدیریت پایدار و حفاظت از منابع آب های زیرزمینی بسیار مهم و حیاتی است. از جمله

### مواد و روش ها

در این پژوهش یک آبخوان نشستی نامحدود، یک آبخوان نشستی محدود که توسط دو مرز با هد هیدرولیکی ثابت محدود شده است و یک آبخوان نشستی محدود که توسط یک مرز با هد هیدرولیکی ثابت و یک مرز نفوذناپذیر محدود شده است مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. در هر کدام از آبخوان ها با استفاده از رابطه جاکوب و روش تصویر و اصل بر هم نهی روابطی برای محاسبه افت سطح پیزومتریک به دست آمد و با استفاده از روابط به دست آمده تحلیل حساسیت ضرایب هیدرولوژیکی آبخوان ها انجام شد.

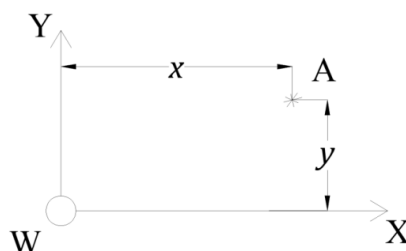
شکل ۱ مقطع شماتیکی از یک آبخوان نشستی را نشان می دهد.

پارامترهای هیدرولوژیکی آبخوان نشستی در جریان آب های زیرزمینی، ضریب قابلیت انتقال و نشت ویژه (Cobb et al. 1982) می باشد. بنابراین هدف از انجام این پژوهش بررسی تاثیر تغییرات این پارامترها بر روی جریان دائمی آب زیرزمینی آبخوان های نشستی محدود و نامحدود می باشد. نوآوری این تحقیق بررسی تاثیر تغییرات این پارامترها بر روی جریان دائمی آب زیرزمینی آبخوان های نشستی محدود و نامحدود با استفاده از روابط دقیق و جدید ارائه شده در این پژوهش می باشد. در این تحقیق آبخوان های نشستی نامحدود و محدود در حالت جریان دائمی آب های زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفتند و با استفاده از یک روش تحلیلی، روابطی جدید و دقیق برای محاسبه مقدار افت سطح پیزومتریک در هر کدام از آبخوان ها به دست آمده است. همچنین با استفاده از این روابط آنالیز حساسیت ضریب قابلیت انتقال و نشت ویژه آبخوان ها انجام شده است.



شکل (۱): مقطع آبخوان نشستی

شکل ۲ پلان آبخوان نشستی نامحدود را نشان می دهد.



شکل (۲): پلان آبخوان نشستی نامحدود

که در این رابطه  $S$  مقدار افت سطح پیزومتریک،  $Q$  مقدار دبی خروجی از چاه (با علامت مثبت) یا ورودی به چاه (با علامت منفی)،  $T$  ضریب قابلیت انتقال،  $K_0$  تابع بسط اصلاح شده نوع دوم مرتبه صفر،  $r$  فاصله نقطه  $A$  از چاه،  $B$  فاکتور نشت،  $L$  نشت ویژه،  $b'$  ضخامت لایه نشت،  $K'$  ضریب هدایت هیدرولیکی لایه نشت،  $b$  ضخامت آبخوان نشتی و  $K$  ضریب هدایت هیدرولیکی آبخوان نشتی می‌باشد.

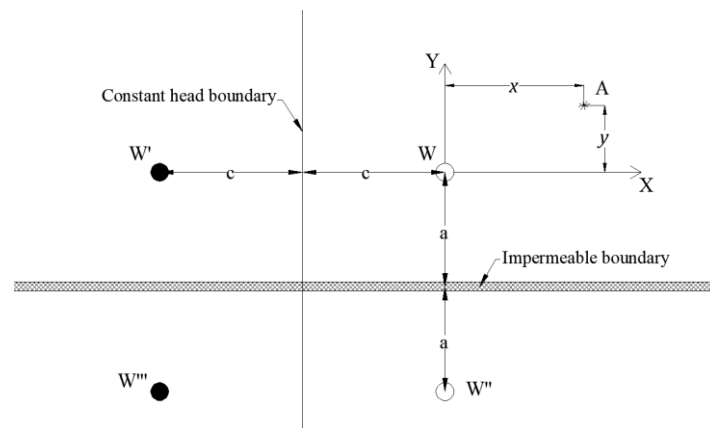
شکل ۳ پلان آبخوان نشتی محدودی که توسط دو مرز با هد هیدرولیکی ثابت محدود شده است و به فواصل  $a$  و  $c$  از مرزهای با هد هیدرولیکی ثابت قرار دارد را نشان می‌دهد.

در شکل ۲ مقدار افت سطح پیزومتریک در نقطه  $A$  در آبخوان نامحدود در صورتی که آبخوان، نشتی و جریان، دائمی باشد با استفاده از رابطه جاکوب (1946) Jacob به صورت زیر به دست می‌آید:

$$s = \frac{Q}{2\pi T} K_0 \left( \frac{r}{B} \right) \quad (1)$$

که در این رابطه داریم:

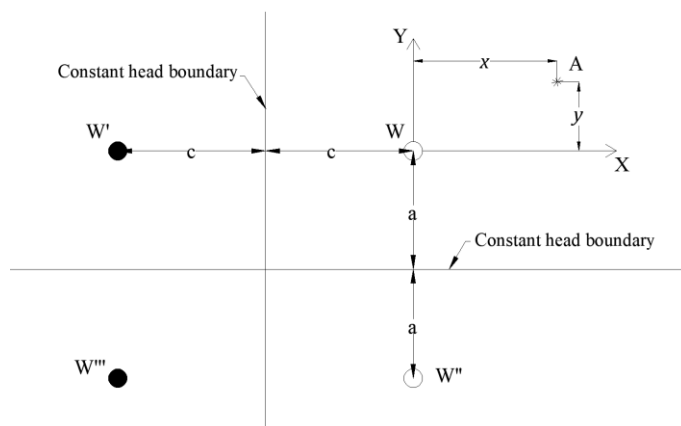
$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, B = \sqrt{\frac{T}{L}}, L = \frac{K'}{b'}, T = Kb$$



شکل (۳): پلان آبخوان نشتی محدود

مجازی ۲ و مجازی ۳ طبق روش تصویر، چاه های مجازی سیستم روش تصویر را نمایش می‌دهند (Ferris et al. 1962). در شکل های ۲ تا ۴ چاه های توخالی چاه پمپاژ و چاه های توپر چاه تغذیه می‌باشند.

شکل ۴ پلان یک آبخوان نشتی محدود را نشان می‌دهد که توسط یک مرز با هد هیدرولیکی ثابت و یک مرز نفوذناپذیر محدود شده است و به فاصله  $a$  از مرز نفوذناپذیر و  $c$  از مرز با هد هیدرولیکی ثابت قرار دارد. چاه های مجازی ۱،



شکل (۴): پلان آبخوان نشستی محدود ۲

$$B = \sqrt{\frac{T}{L}}, L = \frac{K'}{b'}, T = Kb$$

$$r_1 = \sqrt{x^2 + y^2}, r_2 = \sqrt{(2c + x)^2 + y^2}, r_3 = \sqrt{x^2 + (2a + y)^2}, r_4 = \sqrt{(2c + x)^2 + (2a + y)^2}$$

که در این رابطه پارامترهای  $r_1, r_2, r_3, r_4$  به ترتیب فاصله چاه های واقعی، مجازی ۱، مجازی ۲ و مجازی ۳ تا نقطه A می باشد. در جدول های ۱ و ۲ مقادیر پارامترها برای تحلیل حساسیت ضریب قابلیت انتقال (T) و نشت ویژه (L) آبخوان های نشستی نامحدود و محدود در شکل های ۲ تا ۴ آمده است.

مقدار افت سطح پیزومتریک در نقطه A در آبخوان های محدود ۱ و ۲ در شکل های ۳ و ۴ در صورتی که آبخوان، نشستی و جریان، دائمی باشد با استفاده از رابطه Jacob (1946)، روش تصویر و اصل برهم نهی به ترتیب از روابط ۲ و ۳ به صورت زیر دست می آید:

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \left( K_0 \left( \frac{r_1}{B} \right) - K_0 \left( \frac{r_2}{B} \right) + K_0 \left( \frac{r_3}{B} \right) - K_0 \left( \frac{r_4}{B} \right) \right) \quad (2)$$

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \left( K_0 \left( \frac{r_1}{B} \right) - K_0 \left( \frac{r_2}{B} \right) - K_0 \left( \frac{r_3}{B} \right) + K_0 \left( \frac{r_4}{B} \right) \right) \quad (3)$$

جدول (۱): مقادیر پارامترها برای تحلیل حساسیت T و L در آبخوان نشستی نامحدود شکل ۲

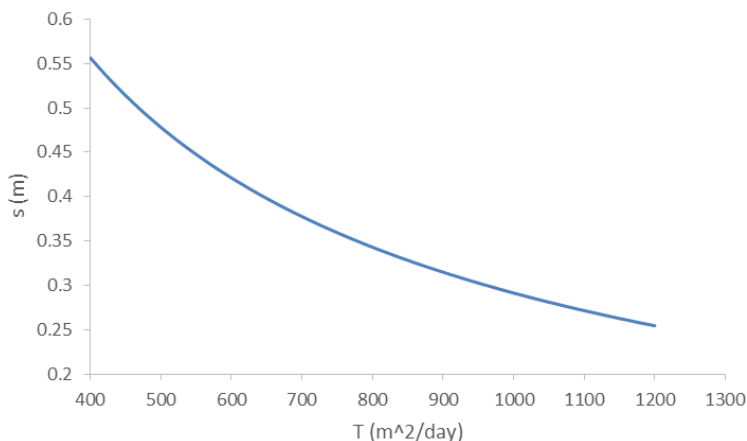
متغیرها	آنالیز حساسیت T	آنالیز حساسیت L
Q (m <sup>3</sup> /day)	1000	1000
T (m <sup>2</sup> /day)	400 تا 1200	600
L (1/day)	0.010	0.001 تا 0.02
x (m)	50	50
y (m)	30	30

جدول (۲): مقادیر پارامترها برای تحلیل حساسیت T و L در دو آبخوان نشتی محدود شکل های ۳ و ۴

متغیرها	آنالیز حساسیت T	آنالیز حساسیت L
Q (m <sup>3</sup> /day)	1000	1000
T (m <sup>2</sup> /day)	400 تا 1200	600
L (1/day)	0.010	0.001 تا 0.02
a (m)	300	300
c (m)	200	200
x (m)	50	50
y (m)	30	30

کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، مقدار افت سطح پیزومتریک در آبخوان های نشتی نامحدود با ضرایب قابلیت انتقال ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ متر مربع بر روز به ترتیب برابر با ۰،۴۲۱، ۰،۳۴۳ و ۰،۲۹۱ متر می باشد.

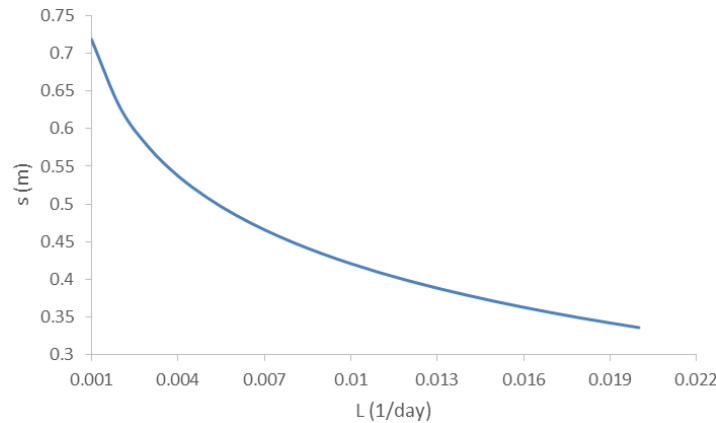
تغییرات افت سطح پیزومتریک نسبت به تغییرات ضریب قابلیت انتقال آبخوان نشتی نامحدود (تحلیل حساسیت T در جدول ۱) در شکل ۵ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌کنیم با افزایش ضریب قابلیت انتقال آبخوان نشتی نامحدود، مقدار افت سطح پیزومتریک



شکل (۵): تغییرات افت سطح پیزومتریک نسبت به تغییرات ضریب قابلیت انتقال آبخوان نشتی نامحدود

افت سطح پیزومتریک در آبخوان های نشتی نامحدود با نشت ویژه ۰،۰۰۵، ۰،۰۱۰ و ۰،۰۱۵ بر روز به ترتیب برابر با ۰،۵۰۹، ۰،۴۲۱ و ۰،۳۷۱ متر می باشد.

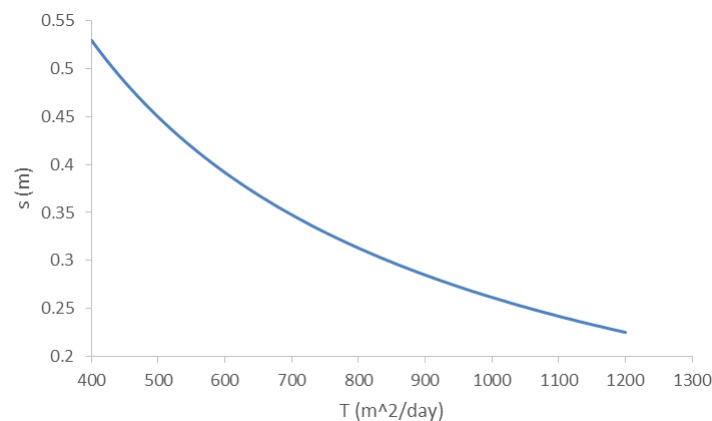
تغییرات افت سطح پیزومتریک نسبت به تغییرات نشت ویژه آبخوان نشتی نامحدود (تحلیل حساسیت L در جدول ۱) در شکل ۶ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌کنیم با افزایش نشت ویژه آبخوان نشتی نامحدود، مقدار افت سطح پیزومتریک کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، مقدار



شکل (۶): تغییرات افت سطح پیزومتریک نسبت به تغییرات نشت ویژه آبخوان نشتی نامحدود

نشتی محدود ۱، مقدار افت سطح پیزومتریک کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، مقدار افت سطح پیزومتریک در آبخوان های نشتی محدود ۱، با ضرایب قابلیت انتقال ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ متر مربع بر روز به ترتیب برابر با ۰،۳۹۲، ۰،۳۱۳ و ۰،۲۶۲ متر می‌باشد.

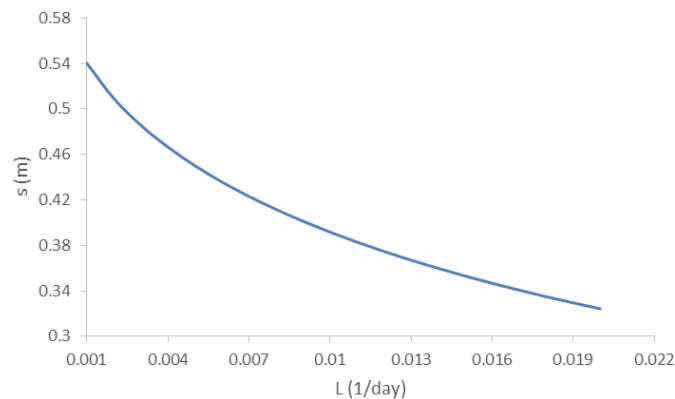
تغییرات افت سطح پیزومتریک نسبت به تغییرات ضریب قابلیت انتقال آبخوان نشتی محدود ۱ (تحلیل حساسیت T در جدول ۲) در شکل ۷ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌کنیم با افزایش ضریب قابلیت انتقال آبخوان



شکل (۷): تغییرات افت سطح پیزومتریک نسبت به تغییرات ضریب قابلیت انتقال آبخوان نشتی محدود ۱

افت سطح پیزومتریک کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، مقدار افت سطح پیزومتریک در آبخوان های نشتی محدود ۱، با نشت ویژه ۰،۰۰۵، ۰،۰۱۰ و ۰،۰۱۵ بر روز به ترتیب برابر با ۰،۴۵۰، ۰،۳۹۲ و ۰،۳۵۳ متر می‌باشد

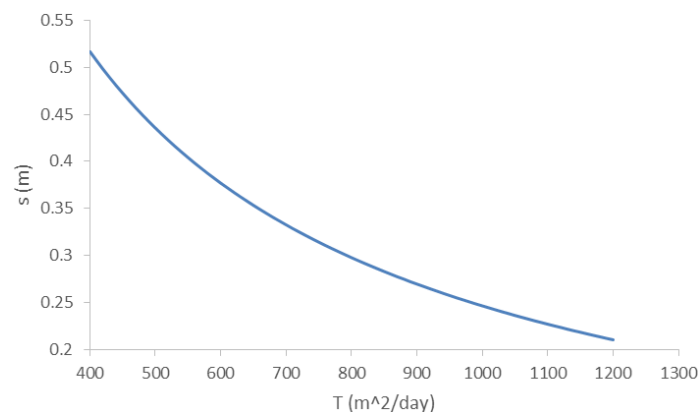
تغییرات افت سطح پیزومتریک نسبت به تغییرات نشت ویژه آبخوان نشتی محدود ۱ (تحلیل حساسیت L در جدول ۲) در شکل ۸ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌کنیم با افزایش نشت ویژه آبخوان نشتی محدود ۱، مقدار



شکل (۸): تغییرات افت سطح پیزومتریک نسبت به تغییرات نشت ویژه آبخوان نشتی محدود ۱

نشتی محدود ۲، مقدار افت سطح پیزومتریک کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، مقدار افت سطح پیزومتریک در آبخوان های نشتی محدود ۲، با ضرایب قابلیت انتقال ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ متر مربع بر روز به ترتیب برابر با ۰،۳۷۷، ۰،۲۹۸ و ۰،۲۴۶ متر می‌باشد.

تغییرات افت سطح پیزومتریک نسبت به تغییرات ضریب قابلیت انتقال آبخوان نشتی محدود ۲ (تحلیل حساسیت T در جدول ۲) در شکل ۹ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌کنیم با افزایش ضریب قابلیت انتقال آبخوان

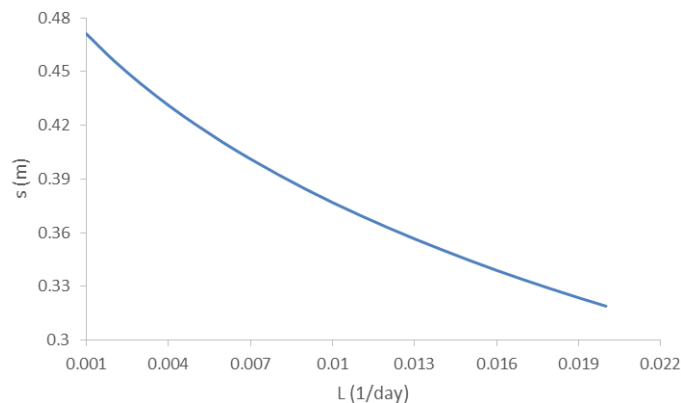


شکل (۹): تغییرات افت سطح پیزومتریک نسبت به تغییرات ضریب قابلیت انتقال آبخوان نشتی محدود ۲

افت سطح پیزومتریک کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، مقدار افت سطح پیزومتریک در آبخوان های نشتی محدود ۲، با نشت ویژه ۰،۰۰۵، ۰،۰۱۰ و ۰،۰۱۵ بر روز به ترتیب برابر با ۰،۴۲۰، ۰،۳۷۷ و ۰،۳۴۵ متر می‌باشد.

تغییرات افت سطح پیزومتریک نسبت به تغییرات نشت ویژه آبخوان نشتی محدود ۲ (تحلیل حساسیت L در جدول ۲) در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌کنیم با افزایش نشت ویژه آبخوان نشتی محدود ۲، مقدار

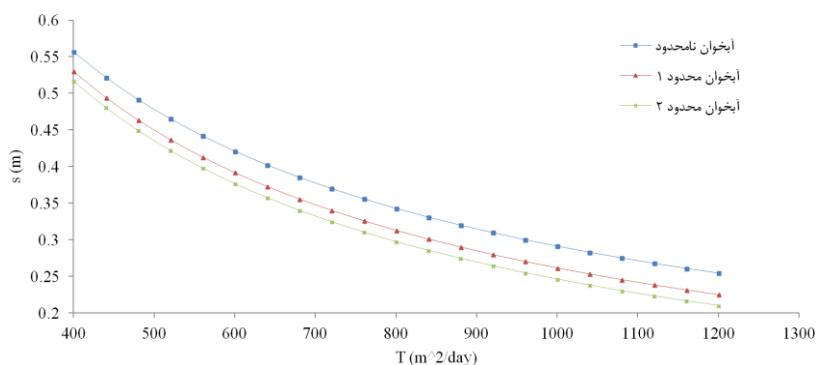




شکل (۱۰): تغییرات افت سطح پیزومتريک نسبت به تغییرات نشت ویژه آبخوان نشتی محدود ۲

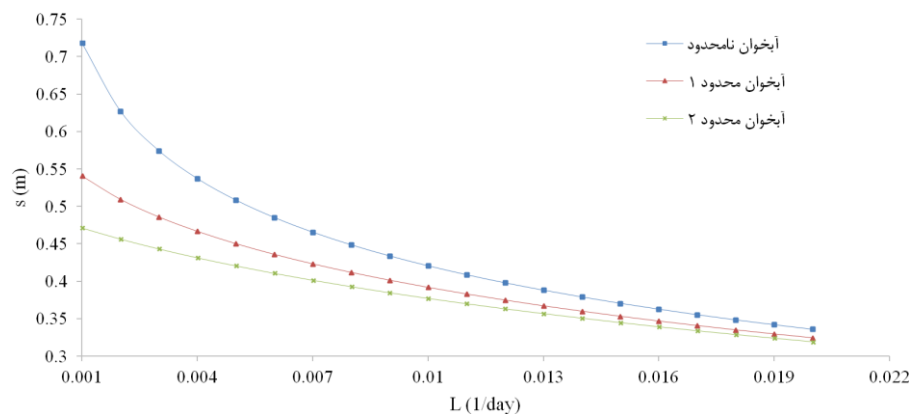
۲ نسبت به آبخوان محدود ۱ افت سطح پیزومتريک کمتری دارد. به عنوان مثال، مقدار افت سطح پیزومتريک در آبخوان های نامحدود، محدود ۱ و محدود ۲ با ضریب قابلیت انتقال ۷۰۰ متر مربع بر روز به ترتیب برابر با ۰,۳۷۸، ۰,۳۴۸ و ۰,۳۳۳ متر می باشد.

مقایسه تغییرات افت سطح پیزومتريک نسبت به تغییرات ضریب قابلیت انتقال آبخوان های نشتی نامحدود، محدود ۱ و محدود ۲ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می کنیم که در ضرایب قابلیت انتقال یکسان، مقدار افت سطح پیزومتريک در آبخوان نامحدود بیشتر از آبخوان های محدود ۱ و ۲ است و همچنین آبخوان محدود



شکل (۱۱): مقایسه تغییرات افت سطح پیزومتريک نسبت به تغییرات ضریب قابلیت انتقال آبخوان های نشتی نامحدود، محدود ۱ و محدود ۲

مقایسه تغییرات افت سطح پیزومتريک نسبت به تغییرات نشت ویژه آبخوان های نشتی نامحدود، محدود ۱ و محدود ۲ در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می کنیم که در نشت ویژه یکسان، مقدار افت سطح پیزومتريک در آبخوان نامحدود بیشتر از آبخوان های محدود ۱ و ۲ است و همچنین آبخوان محدود ۲ نسبت به آبخوان محدود ۱ مقدار افت سطح پیزومتريک کمتری دارد. به عنوان مثال، مقدار افت سطح پیزومتريک در آبخوان های نامحدود، محدود ۱ و محدود ۲ با نشت ویژه ۰,۰۱۲ بر روز به ترتیب برابر با ۰,۳۹۸، ۰,۳۷۵ و ۰,۳۶۳ متر می باشد.



شکل (۱۲): مقایسه تغییرات افت سطح پیزومتریک نسبت به تغییرات نشت ویژه آبخوان های نشتی نامحدود، محدود ۱ و محدود ۲

### نتیجه گیری

با توجه به روابط به دست آمده و تحلیل نتایج خروجی و تحلیل حساسیت ضرایب هیدرولوژیکی برای هر کدام از آبخوان ها، مشاهده شد که مقدار افت سطح پیزومتریک با افزایش ضریب قابلیت انتقال و نشت ویژه آبخوان نشتی نامحدود و محدود کاهش می یابد. همچنین در نشت های ویژه یکسان و یا در ضرایب قابلیت انتقال یکسان، آبخوان های محدود ۱ و ۲ در مقایسه با آبخوان نامحدود مقدار افت سطح پیزومتریک کمتری دارند و همچنین آبخوان محدود ۱ نسبت به آبخوان محدود ۲ مقدار افت سطح پیزومتریک بیشتری دارد.

با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل حساسیت می توان نتیجه گرفت که مرزهای محدود کننده در آبخوان های نشتی محدود ۱ و ۲ موجب کاهش مقدار افت سطح پیزومتریک در مقایسه با آبخوان نامحدود می شوند و همچنین مرز با هد هیدرولیکی ثابت نسبت به مرز نفوذناپذیر اثر بیشتری بر روی کاهش مقدار افت سطح پیزومتریک را دارد.

در یک جمع بندی کلی با توجه به تحلیل حساسیت ضرایب قابلیت انتقال و نشت ویژه آبخوان های نشتی نامحدود و محدود، در حالت جریان دائمی آب های زیرزمینی که با استفاده از ارائه یک روش تحلیلی جدید در این پژوهش انجام شد، نتیجه گیری می شود:

- افزایش ضرایب قابلیت انتقال و نشت ویژه آبخوان های نشتی نامحدود و محدود

موجب کاهش مقدار افت سطح پیزومتریک می شود.

- در ضرایب قابلیت انتقال یکسان، مقدار افت سطح پیزومتریک در آبخوان نامحدود بیشتر از آبخوان های محدود ۱ و ۲ است و همچنین آبخوان محدود ۲ نسبت به آبخوان محدود ۱ افت سطح پیزومتریک کمتری دارد. به عنوان مثال، مقدار افت سطح پیزومتریک در آبخوان های نامحدود، محدود ۱ و محدود ۲ با ضریب قابلیت انتقال ۷۰۰ متر مربع بر روز به ترتیب برابر با ۰,۳۷۸، ۰,۳۴۸ و ۰,۳۳۳ متر می باشد.

- در نشت ویژه یکسان، مقدار افت سطح پیزومتریک در آبخوان نامحدود بیشتر از آبخوان های محدود ۱ و ۲ است و همچنین آبخوان محدود ۲ نسبت به آبخوان محدود ۱ مقدار افت سطح پیزومتریک کمتری دارد. به عنوان مثال، مقدار افت سطح پیزومتریک در آبخوان های نامحدود، محدود ۱ و محدود ۲ با نشت ویژه ۰,۰۱۲ بر روز به ترتیب برابر با ۰,۳۹۸، ۰,۳۷۵ و ۰,۳۶۳ متر می باشد.

- مرزهای محدود کننده در آبخوان های نشتی محدود ۱ و ۲ موجب کاهش مقدار افت سطح پیزومتریک در مقایسه با آبخوان



اثر بیشتری بر روی کاهش مقدار افت  
سطح پیزومتریک دارد.

نامحدود می شوند و همچنین مرز با هد  
هیدرولیکی ثابت نسبت به مرز نفوذ ناپذیر

## منابع

- Cobb, P., C. McElwee, and M. Butt. 1982. Analysis of leaky aquifer pumping test data: An automated numerical solution using sensitivity analysis. *Ground Water*. 20(3): 325-333.
- Ferris, J.G., et al. 1962. *Theory of aquifer tests*: US Government Printing Office Washington.
- Feng, Q. and H. Zhan. 2015. On the aquitard-aquifer interface flow and the drawdown sensitivity with a partially penetrating pumping well in an anisotropic leaky confined aquifer. *Journal of Hydrology*. 521: 74-83.
- Jacob, C.E. 1946. Radial flow in a leaky artesian aquifer. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 27(2): 198-208.
- Hantush, M.S. and C.E. Jacob. 1955. Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 36(1): 95-100.
- Hantush, M.S. 1959. Nonsteady flow to flowing wells in leaky aquifers. *Journal of Geophysical Research*. 64(8): 1043-1052.
- Huang, C.S., S.Y. Yang, and H.D. Yeh. 2014. Groundwater flow to a pumping well in a sloping fault zone unconfined aquifer. *Water Resources Research*. 50(5): 4079-4094.
- Li, H. and J.J. Jiao. 2001. Tide-induced groundwater fluctuation in a coastal leaky confined aquifer system extending under the sea. *Water Resources Research*. 37(5): 1165-1171.
- Lin, G.F. and G.R. Chen. 2005. Determination of aquifer parameters using radial basis function network approach. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*. 28(2): 241-249
- Lin, Y.-C., M.-H. Li, and H.-D. Yeh. 2017. An analytical model for flow induced by a constant-head pumping in a leaky unconfined aquifer system with considering unsaturated flow. *Advances in Water Resources*
- Li, P., et al. 2014. Determining the optimal pumping duration of transient pumping tests for estimating hydraulic properties of leaky aquifers using global curve-fitting method: a simulation approach. *Environmental earth sciences*. 71(1): 293-299
- Lohman, S.W. 1972. *Ground-water hydraulics*: US Government Printing Office.
- Chuang, M.-H. and H.-D. Yeh. 2007. An analytical solution for the head distribution in a tidal leaky confined aquifer extending an infinite distance under the sea. *Advances in water resources*. 30(3): 439-445.
- Tang, Z. and J.J. Jiao. 2001. A two-dimensional analytical solution for groundwater flow in a leaky confined aquifer system near open tidal water. *Hydrological processes*. 15(4): 573-585.
- Saeedpanah, I. and R. Golmohamadi Azar. 2017. New Analytical Solutions for Unsteady Flow in a Leaky Aquifer between Two Parallel Streams. *Water Resources Management*. 31(7): 2315-2332.
- Yu, C.-C., S.-Y. Yang, and H.-D. Yeh. 2013. Semi-analytical solution of groundwater flow in a leaky aquifer system subject to bending effect. *Journal of hydrology*. 486: 395-402.



- Wen, Z., et al. 2011. Constant-head test in a leaky aquifer with a finite-thickness skin. *Journal of hydrology*. 399(3): 326-334
- Wen, Z., F. Wu, and Q. Feng. 2016. Non-Darcian Flow to a Partially Penetrating Pumping Well in a Leaky Aquifer Considering the Aquitard–Aquifer Interface Flow. *Journal of Hydrologic Engineering*. 21(12): 06016011.
- Zhao, Y., Y.-K. Zhang, and X. Liang. 2016. Analytical solutions of three-dimensional groundwater flow to a well in a leaky sloping fault-zone aquifer. *Journal of Hydrology*. 539: 204-213.



## Analytical solution for steady groundwater flow analysis in infinite and finite leakage aquifers

Iraj Saeedpanah<sup>1</sup>, Siamak Taheri<sup>2</sup>

### Abstract

Knowing the values and changes of hydrological parameters of aquifers for sustainable management and conservation of groundwater resources is very important and crucial. Among the hydrological parameters of leakage aquifer in groundwater flow are transmissibility coefficient and specific leakage. The innovation of this research is to study the effect of changes in these parameters on the steady flow of groundwater of finite and infinite leakage aquifers using the new and accurate solutions provided in this investigation. In this research, infinite and finite leakage aquifers in steady state of groundwater flow were studied and with using a new analytical method, new and exact solutions for calculating the drawdown in each of the aquifers were achieved. Also using these solutions, the sensitivity analysis of transmissibility coefficient and specific leakage of aquifers were done.

**Keywords:** Sensitivity analysis, Steady groundwater flow, Analytical solution, Transmissibility coefficient, Specific leakage

---

<sup>1</sup>Assistant Professor, Department of Civil Engineering ,University of Zanjan, Iran, E-mail: Saeedpanah@znu.ac.ir (corresponding author)

<sup>2</sup>M.Sc. Student Civil Engineering ,University of Zanjan, Iran, E-mail: Siamaktaheri@znu.ac.ir



## An analytical solution for steady groundwater flow analysis in infinite and finite leakage aquifers

Iraj Saeedpanah<sup>3</sup>, Siamak Taheri<sup>4</sup>

### Introduction

The role of groundwater as an important source of water supply is very vital. The management of this key and main source, because of the excessive extraction from this resource for drinking, industry, agriculture, and ... as well as pollution by various factors is very important. The greatest direct impact of groundwater destruction is the reduction of groundwater level. Groundwater exist in aquifers and survey of aquifers hydraulic is very important in managing of groundwater resources. In addition to a sharp drawdown in aquifers, agricultural, industrial and urban activities impose different pollutants on aquifers which, in order to prevent quantitative and qualitative drop continuation, management of exploitation and protection of groundwater should be considered as a principle and basis in planning of the country. Knowing the values and changes of hydrological parameters of aquifers for sustainable management and conservation of groundwater resources is very important and crucial. Among the hydrological parameters of leakage aquifer in groundwater flow are transmissibility coefficient and specific leakage. The innovation of this research is to study the effect of changes in these parameters on the steady flow of groundwater of finite and infinite leakage aquifers using the new and accurate selotions provided in this investigation. In this research, infinite and finite leakage aquifers in steady state of groundwater flow were studied and with using a new analytical method, new and exact solutions for calculating the drawdown in each of the aquifers were achieved. Also using these selotions, the sensitivity analysis of transmissibility coefficient and specific leakage of aquifers were done.

### Methodology

In this study, an infinite leakage aquifer, a finite leakage aquifer bounded by two boundaries with constant hydraulic head, and a finite leakage aquifer bounded by a boundary with constant hydraulic head and an impermeable boundary were studied and compared. Solutions were obtained for calculating the drawdown in each of the aquifers using Jacob's solution and the image method and the principle of superposition and using the obtained solutions, sensitivity analysis of the hydrodynamic coefficients of the aquifers was done.

### Discussion and Conclusion

According to the obtained relations and analysis of the output results and the sensitivity analysis of hydrodynamic coefficients for each of aquifers, it was observed that with increasing transmissibility coefficient and specific leakage of infinite and finite leakage aquifers the drawdown decreases. Also, in the same specific leakage or in the same transmissibility coefficient, the finite aquifers 1 and 2, in comparison with the infinite aquifer, have less drawdown, and also the finite aquifer 1 in comparison with the finite aquifer 2 has a higher drawdown. According to the obtained results of the sensitivity analysis, it can be concluded that the bounding boundaries in finite leakage aquifers 1 and 2 cause the drawdown reduces in comparison with the infinite aquifer, and also the constant hydraulic head boundary relative to the impermeable boundary has a greater effect on reducing the drawdown.

### The most important references

1. Jacob, C.E. 1946. Radial flow in a leaky artesian aquifer. Eos, Transactions American Geophysical Union. 27(2): 198-208.

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Civil Engineering ,University of Zanjan, Iran, E-mail: Saeedpanah@znu.ac.ir (corresponding author)

<sup>4</sup>M.Sc. Student Civil Engineering ,University of Zanjan, Iran, E-mail: Siamaktaheri@znu.ac.ir



2. Hantush, M.S. 1959. Nonsteady flow to flowing wells in leaky aquifers. *Journal of Geophysical Research*. 64(8): 1043-1052.

**Keywords:** Sensitivity analysis, Steady groundwater flow, Analytical solution, Transmissibility coefficient, Specific leakage