

بررسی جامع اثر ضرایب هیدرودینامیکی آبخوانهای نشتی نامحدود و محدود بر هیدرولیک جریان غیردائمی آب زیرزمینی

ایرج سعید پناه^۱، سیامک طاهری^۲

تاریخ ارسال: ۱۳۹۷/۱۲/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۷

مقاله پژوهشی

چکیده

در این پژوهش یک حل تحلیلی جدید به منظور مقایسه اثر ضریب قابلیت انتقال، ضریب ذخیره و نشت ویژه آبخوان های نشتی نامحدود و محدود در حالت جریان غیر دائمی آب های زیرزمینی با به دست آوردن یک حل دقیق ارائه شده است و این نتایج حاصل شد: ۱- افزایش ضریب قابلیت انتقال، ضریب ذخیره و نشت ویژه آبخوان نشتی نامحدود و محدود، موجب کاهش مقدار افت سطح پیزومتریک می شود. ۲- در همه آنالیزهای حساسیت بررسی شده مشاهده شد که در ضریب قابلیت انتقال، ضریب ذخیره و یا نشت ویژه یکسان، مقدار افت سطح پیزومتریک آبخوان نشتی نامحدود نسبت به آبخوان های نشتی محدود بیشتر است و مقدار افت سطح پیزومتریک آبخوان نشتی محدود ۲ نسبت به محدود ۱ بیشتر است. ۳- افزایش ضریب قابلیت انتقال و نشت ویژه آبخوان نشتی نامحدود و محدود موجب می شود که جریان آب زیرزمینی زودتر به حالت دائمی برسد. ۴- افزایش ضریب ذخیره آبخوان نشتی نامحدود و محدود موجب می شود که جریان آب زیرزمینی دیرتر به حالت دائمی برسد. ۵- در ضریب قابلیت انتقال، ضریب ذخیره و یا نشت ویژه یکسان، آبخوان نشتی نامحدود نسبت به محدود دیرتر به حالت دائمی می رسد و آبخوان نشتی محدود ۱ نسبت به محدود ۲ زودتر به حالت دائمی می رسد.

واژه های کلیدی: آبخوان نشتی، جریان غیر دائمی، ضریب قابلیت انتقال، ضریب ذخیره، نشت ویژه

^۱ استادیار گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، ۰۹۱۲۴۴۳۲۱۸۱@saeedpanah@znu.ac.ir (نویسنده مسئول)

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



مقدمه

با توجه به نقش آب های زیرزمینی به عنوان یک منبع مهم تامین آب در مناطق مختلف دنیا و برداشت بی رویه از این منابع برای مصارف شرب، کشاورزی، صنعت و ... مدیریت این منبع مهم تامین آب و همچنین جلوگیری از آلودگی آن توسط عوامل مختلف، حائز اهمیت می باشد. آب زیرزمینی موضوع تحقیقات فنی بسیاری از محققان در طی دهه های اخیر بوده است. آب زیرزمینی در آبخوان ها یافت می شود و از جمله انواع آبخوان ها، آبخوان نشتی (Leaky Aquifer) می باشد و همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است آبخوانی است که در یک طرف به مرز نفوذناپذیر و از طرف دیگر به لایه نشتی (Aquitard) محدود می شود. جریان آب زیرزمینی در آبخوان های نشتی در مقایسه با دیگر انواع آبخوان ها نسبتاً پیچیده تر است چرا که بایستی پارامترهای لایه نشتی را نیز در نظر بگیریم. در اغلب مطالعات آبخوان نشتی، حل معادله حرکت آب زیرزمینی با این فرضیات به دست آمده است: جریان در آبخوان داری و افقی و در لایه نشتی به صورت عمودی است.

Chuang and Yeh (2007) یک حل تحلیلی برای تحقیق اثر نوسانات جزر و مد و نشت بر روی هد هیدرولیکی آبخوان نشتی ارائه کردند و مشاهده کردند زمانی که نشت ویژه از $0/001$ بیشتر می شود، اثر ضرایب ذخیره و آبگذری بر روی نوسانات هد هیدرولیکی محسوس تر است. (Zhou et al. (2009) حل های نیمه تحلیلی برای آنالیز نرخ و حجم نشت در یک آبخوان نشتی با در نظر گرفتن ضریب ذخیره لایه نشتی به دست آوردند. (Wen et al. (2011) یک مدل ریاضی برای آزمایش هد ثابت در آبخوان نشتی ارائه دادند. (Yu et al. (2013) یک مدل نیمه تحلیلی برای تحقیق اثر خم شدگی لایه نشتی و نرخ نشت بر روی مقدار افت سطح پیرومتریک 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.

Feng and Zhan (2015) یک مدل تحلیلی برای آبخوان نشتی توسعه دادند که در آن اثر ترکیبی نفوذ جزئی چاه، ضریب ذخیره لایه نشتی، ناهمسانی آبخوان را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. Li and Zhou (2015) یک حل تحلیلی برای محاسبه افت در آبخوان نشتی با شرایط مرزی وابسته به زمان را ارائه دادند. Saeedpanah and Golmohamadi Azar (2017) برای جریان های غیردائمی درون یک آبخوان نشتی حل های تحلیلی جدیدی ارائه کردند. Zhao et al. (2016) برای جریان آب زیرزمینی تحت اثر پمپاژ در یک آبخوان منطقه-گسلی شیدار نشتی حلی نیمه تحلیلی به دست آوردند. Saeedpanah and Golmohamadi Azar (2019) حل های تحلیلی جدیدی برای جریان غیر دائمی در آبخوان بسته مجاور با رودخانه و با شرایط مرزی جدید کاهش نمایی در سطح رودخانه را ارائه دادند. مقایسه نتایج تحلیلی ارائه شده توسط آنها و مادفلو تطابق مناسبی را نشان می دهد. (Lin et al. (2017) یک مدل ریاضی جدید برای توصیف پاسخ جریان به پمپاژ با هد ثابت در یک آبخوان نشتی با در نظر گرفتن جریان نیمه اشباع ارائه کردند. نتایج آنالیز حساسیت آنها نشان داد که جریان چاه به تغییرات در ضریب هدایت هیدرولیکی شعاعی و ضخامت ناحیه اشباع بسیار حساس است.

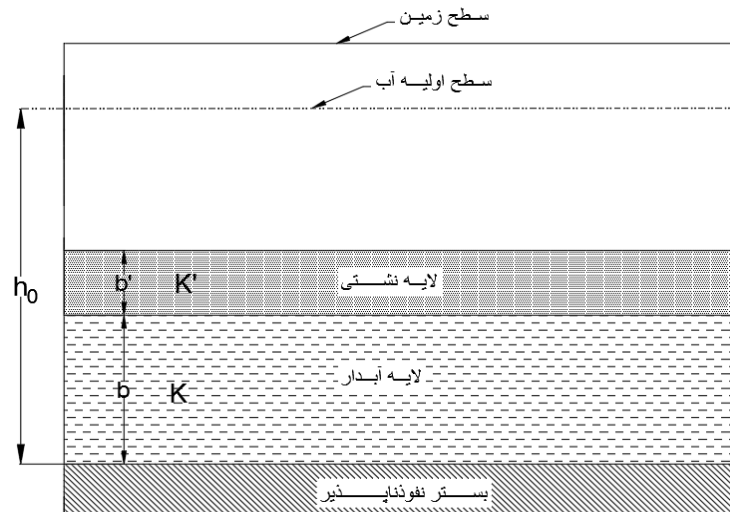
ضریب قابلیت انتقال، ضریب ذخیره و نشت ویژه (Specific Leakage) از جمله پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان نشتی می باشند (Cobb et al. 1982). این پژوهش دارای نوآوری در زمینه استخراج روابط تحلیلی و مدل های ریاضی در هیدرولیک جریان آبهای زیرزمینی و همچنین تاثیر تغییرات پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان بر روی جریان آب زیرزمینی آبخوان های نشتی محدود و نامحدود در حالت جریان غیردائمی می باشد. بنابراین در این تحقیق با استفاده از حل های تحلیلی جدید ارائه شده، تاثیر تغییرات پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان

آبخوان نشستی محدود را نشان می دهد 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، مجازی ۲ و مجازی ۳ طبق روش تصویر (Walton 1962) چاه های مجازی اند. در شکل های ۲ تا ۴ چاه های توخالی چاه پمپاژ و چاه های توپر چاه تغذیه می باشند.

بر روی جریان آب زیرزمینی آبخوان های نشستی محدود و نامحدود در حالت جریان غیردائمی بررسی شده است.

روش تحقیق

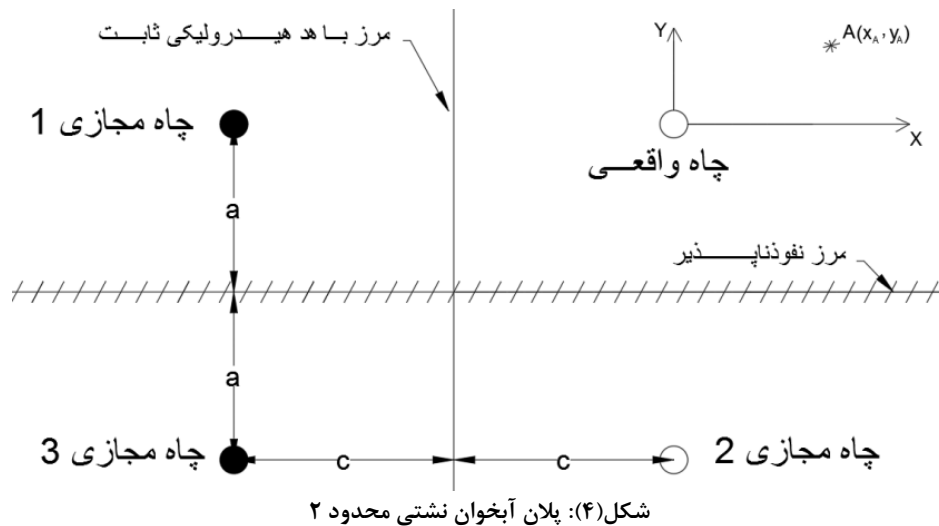
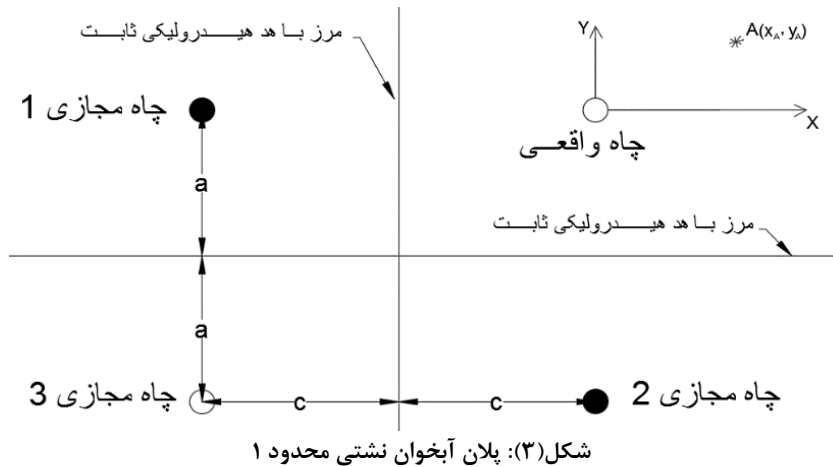
شکل ۱ مقطع شماتیکی از یک آبخوان نشستی، شکل ۲ پلان آبخوان نشستی نامحدود، شکل ۳ پلان آبخوان نشستی محدودی که توسط دو مرز با هد هیدرولیکی ثابت محدود شده است و به فواصل a و c از مرزهای با هد هیدرولیکی ثابت قرار دارد و شکل ۴ پلان یک



شکل (۱): مقطع آبخوان نشستی



شکل (۲): پلان آبخوان نشستی نامحدود



$$u = \frac{r^2 S}{4tT}, B = \sqrt{\frac{T}{L}}, L = \frac{K'}{b'}, T$$

$$= Kb, W\left(u, \frac{r}{B}\right)$$

$$= \int_0^{\infty} \frac{e^{-z - \frac{r^2}{4B^2 z}}}{z} dz, r$$

$$= \sqrt{x^2 + y^2}$$

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، r فاصله نقطه A از چاه، S ضریب ذخیره، t مقدار زمان پمپاژ یا تغذیه چاه می باشد، B فاکتور نشت، L نشت ویژه، b' ضخامت لایه نشت، K' ضریب هدایت

مقدار افت آب در نقطه A در آبخوان نامحدود شکل ۲ در صورتی که آبخوان، نشتی و جریان، غیر دائمی باشد از رابطه (Hantush and Jacob 1955) به صورت زیر دست می آید:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(u, \frac{r}{B}\right) \quad (1)$$



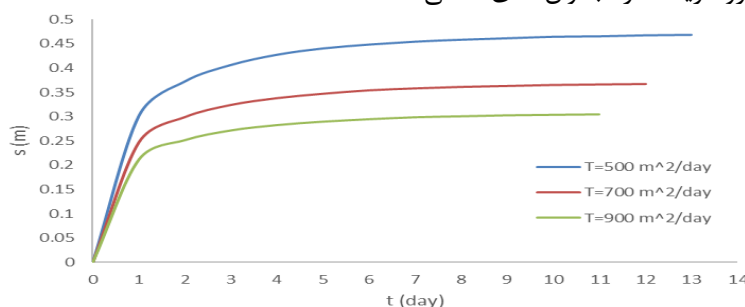
جدول (۲): مقادیر پارامترها برای تحلیل حساسیت T، S و L در دو آبخوان نشتی محدود شکل های ۳ و ۴

حالت های تحلیل حساسیت L			حالت های تحلیل حساسیت S			حالت های تحلیل حساسیت T			متغیرها
3	2	1	3	2	1	3	2	1	
900	900	900	900	900	900	900	900	900	Q (مترمکعب بر روز)
600	600	600	600	600	600	900	700	500	T (مترمربع بر روز)
0.05	0.05	0.05	0.1	0.05	0.01	0.05	0.05	0.05	S
0.05	0.01	0.001	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	L (یک بر روز)
200	200	200	200	200	200	200	200	200	a (متر)
150	150	150	150	150	150	150	150	150	c (متر)
30	30	30	30	30	30	30	30	30	x (متر)
40	40	40	40	40	40	40	40	40	y (متر)

نامحدود با ضرایب آبگذری ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ متر مربع بر روز به ترتیب برابر با ۰/۴۴۹، ۰/۳۵۴ و ۰/۲۹۴ متر می باشد. همچنین جریان آب زیرزمینی در آبخوان نشتی نامحدودی که دارای ضریب قابلیت انتقال بیشتری است زودتر به حالت دائمی می رسد و مشاهده شد که جریان آب زیرزمینی در آبخوان های نشتی نامحدود با ضرایب آبگذری ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ متر مربع بر روز به ترتیب در ۱۳، ۱۲ و ۱۱ روز به حالت دائمی می رسد.

تحلیل نتایج

در شکل ۵ تغییرات افت سطح پیژومتریک نسبت به زمان برای حالت های تحلیل حساسیت T (جدول ۱) در آبخوان نشتی نامحدود شکل ۱ آمده است. با توجه به شکل ۵ مشاهده شد که افزایش ضریب قابلیت انتقال آبخوان نشتی نامحدود موجب کاهش افت سطح پیژومتریک می شود، به عنوان مثال در زمان ۶ روز، مقدار افت سطح پیژومتریک در آبخوان های نشتی



شکل (۵): تغییرات افت سطح پیژومتریک نسبت به زمان برای تحلیل حساسیت ضریب قابلیت انتقال آبخوان نشتی نامحدود



حساسیت T در جدول ۱ (برای آبخوان نشتی نامحدود) آمده است.

برای همه حالات جداول ۱ و ۲ محاسبات تا زمانی که اختلاف افت سطح پیژومتریک کم تر از $0/001$ متر شود انجام گرفته است.

در جداول ۳ تا ۵ مقادیر افت سطح پیژومتریک در زمان های مختلف برای حالت های ۱ تا ۳ تحلیل

جدول (۳): مقادیر افت سطح پیژومتریک در زمان های مختلف برای حالت ۱ تحلیل حساسیت T در جدول ۱

(روز) t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
(متر) s	0.000	0.302	0.373	0.407	0.428	0.441	0.449	0.455	0.459	0.462	0.465	0.466	0.468	0.469

جدول (۴): مقادیر افت سطح پیژومتریک در زمان های مختلف برای حالت ۲ تحلیل حساسیت T در جدول ۱

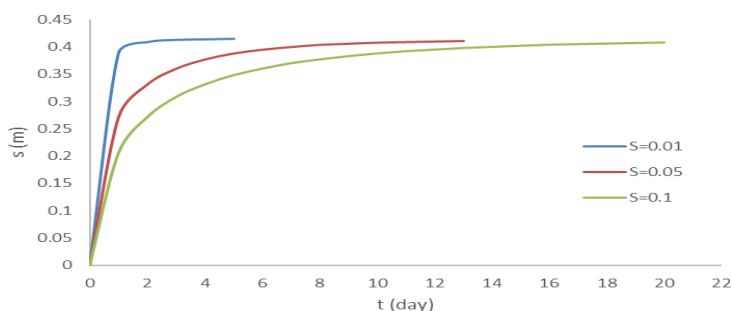
(روز) t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
(متر) s	0.000	0.247	0.299	0.324	0.338	0.347	0.354	0.358	0.361	0.363	0.365	0.366	0.367

جدول (۵): مقادیر افت سطح پیژومتریک در زمان های مختلف برای حالت ۳ تحلیل حساسیت T در جدول ۱

(روز) t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
(متر) s	0.000	0.211	0.251	0.271	0.282	0.289	0.294	0.298	0.300	0.302	0.303	0.304

ضرایب ذخیره $0/01$ ، $0/05$ و $0/1$ به ترتیب برابر با $0/413$ ، $0/377$ و $0/331$ متر می باشد. همچنین جریان آب زیرزمینی در آبخوان نشتی نامحدودی که دارای ضریب ذخیره بیشتری است دیرتر به حالت دائمی می رسد و مشاهده شد که جریان آب زیرزمینی در آبخوان های نشتی نامحدود با ضرایب ذخیره $0/01$ ، $0/05$ و $0/1$ به ترتیب در ۵، ۱۳ و ۲۰ روز به حالت دائمی می رسد.

در شکل ۶ تغییرات افت سطح پیژومتریک نسبت به زمان برای حالت های تحلیل حساسیت S (جدول ۱) در آبخوان نشتی نامحدود شکل ۱ آمده است. با توجه به شکل ۶ مشاهده شد که افزایش ضریب ذخیره آبخوان نشتی نامحدود موجب کاهش افت سطح پیژومتریک می شود، به عنوان مثال در زمان ۴ روز، مقدار افت سطح پیژومتریک در آبخوان های نشتی نامحدود با



شکل (۶): تغییرات افت سطح پیزومتریک نسبت به زمان برای تحلیل حساسیت ضریب ذخیره آبخوان نشتی نامحدود

در جداول ۶ تا ۸ مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان‌های مختلف برای حالت‌های ۱ تا ۳ تحلیل حساسیت S در جدول ۱ (برای آبخوان نشتی نامحدود) آمده است.

جدول (۶): مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان‌های مختلف برای حالت ۱ تحلیل حساسیت S در جدول ۱

t (روز)	0	1	2	3	4	5
s (متر)	0.000	0.388	0.408	0.412	0.413	0.414

جدول (۷): مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان‌های مختلف برای حالت ۲ تحلیل حساسیت S در جدول ۱

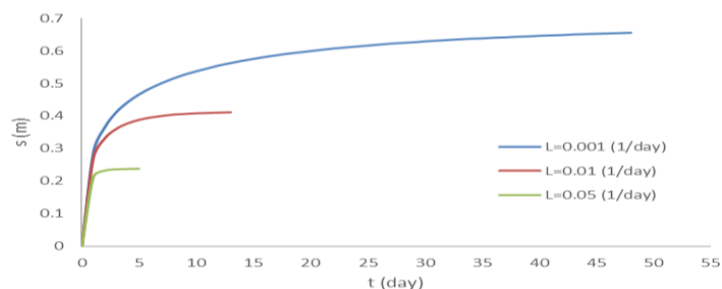
t (روز)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
s (متر)	0.000	0.271	0.331	0.360	0.377	0.388	0.395	0.400	0.404	0.406	0.408	0.409	0.410	0.411

جدول (۸): مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان‌های مختلف برای حالت ۳ تحلیل حساسیت S در جدول ۱

t (روز)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
s (متر)	0.000	0.205	0.271	0.308	0.331	0.348	0.360	0.370	0.377	0.383	0.388
t (روز)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
s (متر)	0.392	0.395	0.398	0.400	0.402	0.404	0.405	0.406	0.407	0.408	0.408

نامحدود با نشت‌های ویژه ۰/۰۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۰۵ بر روز به ترتیب برابر با ۰/۴۴۲، ۰/۳۷۷ و ۰/۲۳۸ متر می‌باشد. همچنین جریان آب زیرزمینی در آبخوان نشتی نامحدودی که دارای نشت ویژه بیشتری است زودتر به حالت دائمی می‌رسد و مشاهده شد که جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های نشتی نامحدود با نشت‌های ویژه ۰/۰۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۰۵ بر روز به ترتیب در ۱۳، ۴۸ و ۵ روز به حالت دائمی می‌رسد.

در شکل ۷ تغییرات افت سطح پیزومتریک نسبت به زمان برای حالت‌های تحلیل حساسیت L (جدول ۱) در آبخوان نشتی نامحدود شکل ۱ آمده است. با توجه به شکل ۷ مشاهده شد که افزایش نشت ویژه آبخوان نشتی نامحدود موجب کاهش افت سطح پیزومتریک می‌شود، به عنوان مثال در زمان ۴ روز، مقدار افت سطح پیزومتریک در آبخوان‌های نشتی



شکل (۷): تغییرات افت سطح پیزومتریک نسبت به زمان برای تحلیل حساسیت نشت ویژه آبخوان نشتی نامحدود

در جداول ۹ تا ۱۱ مقادیر افت سطح پیزومتریک در حساسیت L در جدول ۱ (برای آبخوان نشتی نامحدود) زمان های مختلف برای حالت های ۱ تا ۳ تحلیل آمده است.

جدول (۹): مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان های مختلف برای حالت ۱ تحلیل حساسیت L در جدول ۱

t (روز)	0	1	2	3	4	5
s (متر)	0.000	0.214	0.233	0.237	0.238	0.239

جدول (۱۰): مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان های مختلف برای حالت ۲ تحلیل حساسیت L در جدول ۱

t (روز)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
s (متر)	0.000	0.271	0.331	0.360	0.377	0.388	0.395	0.400	0.404	0.406	0.408	0.409	0.410	0.411

جدول (۱۱): مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان های مختلف برای حالت ۳ تحلیل حساسیت L در جدول ۱

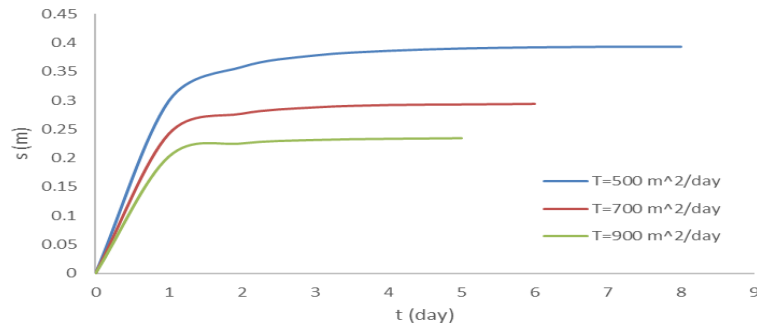
t (روز)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
s (متر)	0.00	0.28	0.36	0.41	0.44	0.46	0.48	0.50	0.51	0.52	0.53	0.54	0.55	0.56	0.56	0.57
t (روز)	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
s (متر)	0.58	0.58	0.59	0.59	0.59	0.60	0.60	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.62	0.62	0.62	0.63
t (روز)	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
s (متر)	0.63	0.63	0.63	0.63	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.65	0.65	0.65	0.65
t (روز)	3	5	7	8	8	7	6	6	4	3	1	0	1	2	3	4

افزایش ضریب آبگذری آبخوان نشتی محدود موجب کاهش افت سطح پیزومتریک می شود، به عنوان مثال در زمان ۵ روز، مقدار افت سطح پیزومتریک برای آبخوان های نشتی محدود ۱ با ضرایب آبگذری ۵۰۰،

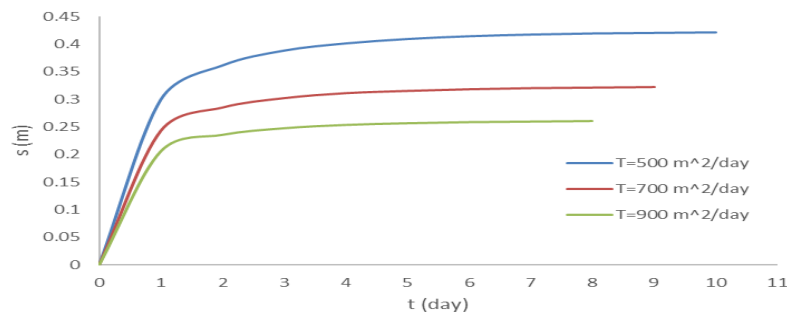
در شکل های ۸ و ۹ تغییرات افت سطح پیزومتریک نسبت به زمان برای حالت های تحلیل حساسیت T (جدول ۲) در دو آبخوان نشتی محدود ۱ و ۲ آمده است. با توجه به شکل های ۸ و ۹ مشاهده شد که

در ۸، ۶ و ۵ روز و جریان آب زیرزمینی در آبخوان های نشستی محدود ۲ با ضرایب آبگذری ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ متر مربع بر روز به ترتیب در ۱۰، ۹ و ۸ روز به حالت دائمی می رسد. همچنین با مقایسه دو آبخوان نشستی محدود ۱ و ۲ مشاهده شد که مقدار افت سطح پیزومتريک در آبخوان محدود ۲ از آبخوان محدود ۱ بیشتر است و جریان آب زیرزمینی در آبخوان نشستی محدود ۱ زودتر از آبخوان نشستی محدود ۲ به حالت دائمی می رسد.

۷۰۰ و ۹۰۰ متر مربع بر روز به ترتیب برابر با ۰/۳۹۰، ۰/۲۹۳ و ۰/۲۳۵ متر و برای آبخوان های نشستی محدود ۲ با ضرایب آبگذری ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ متر مربع بر روز به ترتیب برابر با ۰/۴۱۰، ۰/۳۱۵ و ۰/۲۵۷ متر می باشد. همچنین جریان آب زیرزمینی در آبخوان نشستی محدودی که دارای ضریب قابلیت انتقال بیشتری است زودتر به حالت دائمی می رسد و مشاهده شد که جریان آب زیرزمینی در آبخوان های نشستی محدود ۱ با ضرایب آبگذری ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ متر مربع بر روز به ترتیب



شکل (۸): تغییرات افت سطح پیزومتريک نسبت به زمان برای تحلیل حساسیت ضریب قابلیت انتقال آبخوان نشستی محدود ۱



شکل (۹): تغییرات افت سطح پیزومتريک نسبت به زمان برای تحلیل حساسیت ضریب قابلیت انتقال آبخوان نشستی محدود ۲

حساسیت T در جدول ۲ (برای آبخوان های نشستی محدود ۱ و ۲) آمده است.

در جداول ۱۲ تا ۱۷ مقادیر افت سطح پیزومتريک در زمان های مختلف برای حالت های ۱ تا ۳ تحلیل

جدول (۱۲): مقادیر افت سطح پیزومتريک در زمان های مختلف برای حالت ۱ تحلیل حساسیت T در جدول ۲ (آبخوان نشستی

محدود ۱)

t (روز)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
s (متر)	0.000	0.299	0.358	0.378	0.386	0.390	0.392	0.393	0.393

جدول (۱۳): مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان های مختلف برای حالت ۲ تحلیل حساسیت T در جدول ۲ (آبخوان نشتی محدود ۱)

t (روز)	0	1	2	3	4	5	6
s (متر)	0.000	0.242	0.277	0.288	0.292	0.293	0.294

جدول (۱۴): مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان های مختلف برای حالت ۳ تحلیل حساسیت T در جدول ۲ (آبخوان نشتی محدود ۱)

t (روز)	0	1	2	3	4	5
s (متر)	0.000	0.203	0.226	0.232	0.234	0.235

جدول (۱۵): مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان های مختلف برای حالت ۱ تحلیل حساسیت T در جدول ۲ (آبخوان نشتی محدود ۲)

t (روز)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
s (متر)	0.000	0.300	0.362	0.389	0.402	0.410	0.415	0.418	0.420	0.421	0.422

جدول (۱۶): مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان های مختلف برای حالت ۲ تحلیل حساسیت T در جدول ۲ (آبخوان نشتی محدود ۲)

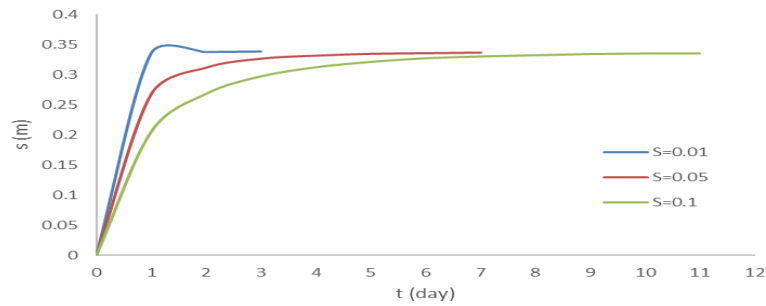
t (روز)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
s (متر)	0.000	0.243	0.285	0.302	0.311	0.315	0.318	0.320	0.321	0.322

جدول (۱۷): مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان های مختلف برای حالت ۳ تحلیل حساسیت T در جدول ۲ (آبخوان نشتی محدود ۲)

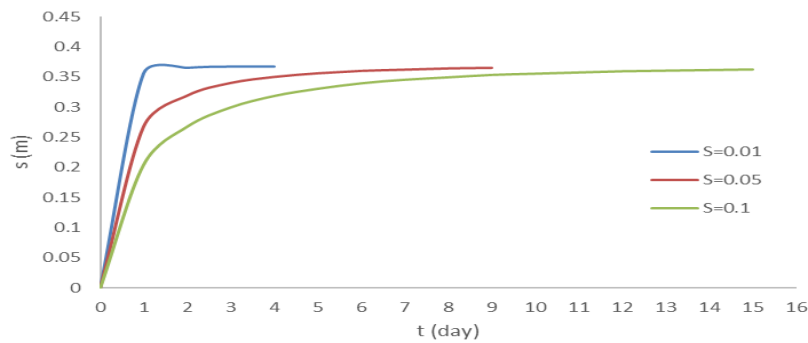
t (روز)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
s (متر)	0.000	0.206	0.236	0.248	0.254	0.257	0.259	0.260	0.261

زیرزمینی در آبخوان نشتی محدودی که دارای ضریب ذخیره بیشتری است دیرتر به حالت دائمی می رسد و مشاهده شد که جریان آب زیرزمینی در آبخوان های نشتی محدود ۱ با ضرایب ذخیره ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱ به ترتیب در ۳، ۷ و ۱۱ روز و جریان آب زیرزمینی در آبخوان های نشتی محدود ۲ با ضرایب ذخیره ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱ به ترتیب در ۴، ۹ و ۱۵ روز به حالت دائمی می رسد. همچنین با مقایسه دو آبخوان نشتی محدود ۱ و ۲ مشاهده شد که مقدار افت سطح پیزومتریک در آبخوان محدود ۲ از آبخوان محدود ۱ بیشتر است و جریان آب زیرزمینی در آبخوان نشتی محدود ۱ زودتر از آبخوان نشتی محدود ۲ به حالت دائمی می رسد.

در شکل های ۱۰ و ۱۱ تغییرات افت سطح پیزومتریک نسبت به زمان برای حالت های تحلیل حساسیت S (جدول ۲) در دو آبخوان نشتی محدود ۱ و ۲ آمده است. با توجه به شکل های ۱۰ و ۱۱ مشاهده شد که افزایش ضریب ذخیره آبخوان نشتی محدود موجب کاهش افت سطح پیزومتریک می شود، به عنوان مثال در زمان ۳ روز، مقدار افت سطح پیزومتریک برای آبخوان های نشتی محدود ۱ با ضرایب ذخیره ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱ به ترتیب برابر با ۰/۳۳۸، ۰/۳۲۷ و ۰/۲۹۷ متر و برای آبخوان های نشتی محدود ۲ با ضرایب ذخیره ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱ به ترتیب برابر با ۰/۳۶۷، ۰/۳۴۰ و ۰/۳۰۰ متر می باشد. همچنین جریان آب



شکل (۱۰): تغییرات افت سطح پیزومتریک نسبت به زمان برای تحلیل حساسیت ضریب ذخیره آبخوان نشتی محدود ۱



شکل (۱۱): تغییرات افت سطح پیزومتریک نسبت به زمان برای تحلیل حساسیت ضریب ذخیره آبخوان نشتی محدود ۲

حساسیت S در جدول ۲ (برای آبخوان های نشتی محدود ۱ و ۲) آمده است.

در جداول ۱۸ تا ۲۳ مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان های مختلف برای حالت های ۱ تا ۳ تحلیل

جدول (۱۸): مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان های مختلف برای حالت ۱ تحلیل حساسیت S در جدول ۲ (آبخوان نشتی محدود ۱)

t (روز)	0	1	2	3
s (متر)	0.000	0.335	0.337	0.338

جدول (۱۹): مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان های مختلف برای حالت ۲ تحلیل حساسیت S در جدول ۲ (آبخوان نشتی محدود ۱)

t (روز)	0	1	2	3	4	5	6	7
s (متر)	0.000	0.268	0.312	0.327	0.332	0.335	0.336	0.337

جدول (۲۰): مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان های مختلف برای حالت ۳ تحلیل حساسیت S در جدول ۲ (آبخوان نشتی محدود ۱)

t (روز)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
s (متر)	0.000	0.205	0.268	0.297	0.312	0.321	0.327	0.330	0.332	0.334	0.335	0.335

جدول (۲۱): مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان های مختلف برای حالت ۱ تحلیل حساسیت S در جدول ۲ (آبخوان نشتی محدود ۲)

t (روز)	0	1	2	3	4
s (متر)	0.000	0.356	0.365	0.367	0.367

جدول (۲۲): مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان های مختلف برای حالت ۲ تحلیل حساسیت S در جدول ۲ (آبخوان نشتی محدود ۲)

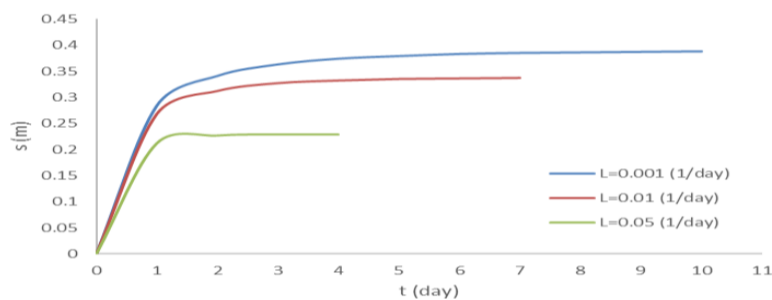
t (روز)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
s (متر)	0.000	0.268	0.319	0.340	0.350	0.356	0.360	0.362	0.364	0.365

جدول (۲۳): مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان های مختلف برای حالت ۳ تحلیل حساسیت S در جدول ۲ (آبخوان نشتی محدود ۲)

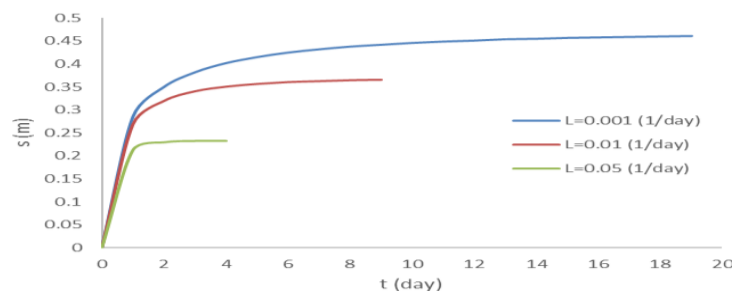
روز) t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
مت) s	0.00	0.20	0.26	0.30	0.31	0.33	0.34	0.34	0.35	0.35	0.35	0.35	0.36	0.36	0.36	0.36

جریان آب زیرزمینی در آبخوان نشتی محدودی که دارای نشت ویژه بیشتری است زودتر به حالت دائمی می رسد و مشاهده شد که جریان آب زیرزمینی در آبخوان های نشتی محدود ۱ با نشت های ویژه ۰/۰۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۰۵ بر روز به ترتیب در ۱۰، ۷ و ۴ روز و جریان آب زیرزمینی در آبخوان های نشتی محدود ۲ با نشت های ویژه ۰/۰۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۰۵ بر روز به ترتیب در ۱۹، ۹ و ۴ روز به حالت دائمی می رسد. همچنین با مقایسه دو آبخوان نشتی محدود ۱ و ۲ مشاهده شد که مقدار افت سطح پیزومتریک در آبخوان محدود ۲ از آبخوان محدود ۱ بیشتر است و جریان آب زیرزمینی در آبخوان نشتی محدود ۱ زودتر از آبخوان نشتی محدود ۲ به حالت دائمی می رسد.

در شکل های ۱۲ و ۱۳ تغییرات افت سطح پیزومتریک نسبت به زمان برای حالت های تحلیل حساسیت L (جدول ۲) در دو آبخوان نشتی محدود ۱ و ۲ آمده است. با توجه به شکل های ۱۲ و ۱۳ مشاهده شد که افزایش نشت ویژه آبخوان نشتی محدود موجب کاهش افت سطح پیزومتریک می شود، به عنوان مثال در زمان ۴ روز، مقدار افت سطح پیزومتریک برای آبخوان های نشتی محدود ۱ با نشت های ویژه ۰/۰۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۰۵ بر روز به ترتیب برابر با ۰/۳۷۴، ۰/۳۳۲ و ۰/۲۲۹ متر و برای آبخوان های نشتی محدود ۲ با نشت های ویژه ۰/۰۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۰۵ بر روز به ترتیب برابر با ۰/۴۰۲، ۰/۳۵۰ و ۰/۲۳۲ متر می باشد. همچنین



شکل (۱۲): تغییرات افت سطح پیزومتریک نسبت به زمان برای تحلیل حساسیت نشت ویژه آبخوان نشتی محدود ۱



شکل (۱۳): تغییرات افت سطح پیزومتریک نسبت به زمان برای تحلیل حساسیت نشت ویژه آبخوان نشتی محدود ۲

در جداول ۲۴ تا ۲۹ مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان های مختلف برای حالت های ۱ تا ۳ تحلیل حساسیت L در جدول ۲ (برای آبخوان های نشتی محدود ۱ و ۲) آمده است.

جدول (۲۴): مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان های مختلف برای حالت ۱ تحلیل حساسیت L در جدول ۲ (آبخوان نشتی محدود ۱)

t (روز)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
s (متر)	0.000	0.284	0.341	0.363	0.374	0.379	0.383	0.385	0.386	0.387	0.388

جدول (۲۵): مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان های مختلف برای حالت ۲ تحلیل حساسیت L در جدول ۲ (آبخوان نشتی محدود ۱)

t (روز)	0	1	2	3	4	5	6	7
s (متر)	0.000	0.268	0.312	0.327	0.332	0.335	0.336	0.337

جدول (۲۶): مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان های مختلف برای حالت ۳ تحلیل حساسیت L در جدول ۲ (آبخوان نشتی محدود ۱)

t (روز)	0	1	2	3	4
s (متر)	0.000	0.212	0.227	0.229	0.229

جدول (۲۷): مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان های مختلف برای حالت ۱ تحلیل حساسیت L در جدول ۲ (آبخوان نشتی محدود ۲)

t (روز)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
s (متر)	0.000	0.285	0.350	0.382	0.402	0.415	0.425	0.432	0.438	0.442
t (روز)	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
s (متر)	0.446	0.449	0.451	0.454	0.455	0.457	0.458	0.459	0.460	0.461

جدول (۲۸): مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان های مختلف برای حالت ۲ تحلیل حساسیت L در جدول ۲ (آبخوان نشتی محدود ۲)

t (روز)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
s (متر)	0.000	0.268	0.319	0.340	0.350	0.356	0.360	0.362	0.364	0.365

جدول (۲۹): مقادیر افت سطح پیزومتریک در زمان های مختلف برای حالت ۳ تحلیل حساسیت L در جدول ۲ (آبخوان نشتی محدود ۲)

t (روز)	0	1	2	3	4
s (متر)	0.000	0.212	0.229	0.232	0.232

نتایج

این پژوهش دارای نوآوری در زمینه استخراج روابط تحلیلی و مدل های ریاضی در هیدرولیک جریان آبهای زیرزمینی و همچنین تاثیر تغییرات پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان بر روی جریان آب زیرزمینی آبخوان های نشتی محدود و نامحدود در حالت جریان غیردائمی می باشد. بنابراین در این تحقیق مقایسه اثر ضرایب هیدرودینامیکی (ضریب قابلیت انتقال، ضریب ذخیره و نشت ویژه) بر هیدرولیک جریان غیردائمی آب

زیرزمینی در آبخوانهای نشتی نامحدود و محدود در حالت جریان غیر دائمی با استفاده از روش تحلیلی ارائه شده انجام گرفت و نتایج زیر به دست آمد:
مقایسه اثر ضرایب هیدرودینامیکی بر هیدرولیک جریان غیردائمی آب زیرزمینی در آبخوانهای نشتی نامحدود و محدود:

- با افزایش ضریب قابلیت انتقال، ضریب ذخیره و نشت ویژه آبخوان نشتی نامحدود و

• با افزایش ضریب ذخیره آبخوان نشتی نام محدود و محدود، جر بیان آب زیرزمینی دیرتر به حالت دائمی می رسد و در حالات بررسی شده مشاهده می شود که جریان آب زیرزمینی در آبخوان های نشتی با ضرایب ذخیره ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱ برای آبخوان نام محدود به ترتیب در ۵، ۱۳ و ۲۰ روز، و برای آبخوان محدود ۱ به ترتیب در ۳، ۷ و ۱۱ روز و برای آبخوان محدود ۲ به ترتیب در ۴، ۹ و ۱۵ روز به حالت دائمی می رسد. با توجه به نتایج، مشاهده می شود که در ضریب ذخیره یک سان، آبخوان نشتی نام محدود نسبت به محدود دیرتر به حالت دائمی می رسد و همچون آبخوان نشتی محدود ۱ نسبت به محدود ۲ زودتر به حالت دائمی می رسد.

• با افزایش نشت و ویژه آبخوان نشتی نام محدود و محدود، جر بیان آب زیرزمینی زودتر به حالت دائمی می رسد و در حالات بررسی شده مشاهده می شود که جریان آب زیرزمینی در آبخوان های نشتی با نشت های ویژه ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱ بر روز برای آبخوان نام محدود به ترتیب در ۴۸، ۱۳ و ۵ روز، و برای آبخوان محدود ۱ به ترتیب در ۱۰، ۷ و ۴ روز و برای آبخوان محدود ۲ به ترتیب در ۱۹، ۹ و ۴ روز به حالت دائمی می رسد. با توجه به نتایج مشاهده می شود که در نشت و ویژه یک سان، آبخوان نشتی نام محدود نسبت به محدود دیرتر به حالت دائمی می رسد و همچون آبخوان نشتی محدود ۱ نسبت به محدود ۲ زودتر به حالت دائمی می رسد.

محدود، مقدار افت سطح پیزومتریک کاهش می یابد.

• در همه حالات های تحلیل حساسیت بررسی شده مشاهده می شود که در ضریب قابلیت انتقال، ضریب ذخیره و نشت و ویژه یکسان، مقدار افت سطح پیزومتریک آبخوان نشتی نامحدود نسبت به آبخوان های نشتی محدود بیشتر است که با توجه به وجود مرز با هد و یدرولیکی ثابت در هر دو آبخوان نشتی محدود، همین نتیجه قابل انتظار است. است و همچون نشتی نامحدود ۲ نسبت به محدود ۱ بیشتر است که با توجه به وجود یک مرز نفوذناپذیر در آبخوان نشتی محدود ۲ همین نتیجه قابل انتظار است.

• با افزایش ضریب قابلیت انتقال آبخوان نشتی نام محدود و محدود، جر بیان آب زیرزمینی زودتر به حالت دائمی می رسد و در حالات بررسی شده مشاهده می شود که جریان آب زیرزمینی در آبخوان های نشتی با ضرایب آبگذری ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ متر مربع بر روز برای آبخوان نام محدود به ترتیب در ۱۳، ۱۲ و ۱۱ روز، و برای آبخوان محدود ۱ به ترتیب در ۸، ۶ و ۵ روز و برای آبخوان محدود ۲ به ترتیب در ۱۰، ۹ و ۸ روز به حالت دائمی می رسد. با توجه به نتایج مشاهده می شود که در ضریب قابلیت انتقال یک سان، آبخوان نشتی نامحدود نسبت به محدود دیرتر به حالت دائمی می رسد و همچون آبخوان نشتی محدود ۱ نسبت به محدود ۲ زودتر به حالت دائمی می رسد.

منابع

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.



- 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.
- Dong, L., D. Cheng, J. Liu, P. Zhang, and W. Ding. 2016. Analytical analysis of groundwater responses to estuarine and oceanic water stage variations using superposition principle. *Journal of Hydrologic Engineering*, 21(1).
- 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.
- 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.
- 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.
- Li, Z., and Z. Zhou. 2015. An analytical solution for leakage rate and depletion of aquitard influenced by the delayed yield phenomenon. *Environmental Earth Sciences*, 74(2): 1227-1234.
- 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*, 107:525-534.
- Saeedpanah, I., and R. Golmohamadi Azar. 2019. Solution of Unsteady Flow in a Confined Aquifer Interacting with a Stream with Exponentially Decreasing Stream Stage. *ASCE's Journal of Hydrologic Engineering*, 24(2): 1–11.
- 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.
- Walton, W. C. 1962. Selected analytical methods for well and aquifer evaluation. Illinois State Water Survey Urbana, IL.
- Wen, Z., H. Zhan, G. Huang, and M. Jin. 2011. Constant-head test in a leaky aquifer with a finite-thickness skin. *Journal of Hydrology*, 399(3): 326-334.
- 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.
- 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.
- Zhou, Q., J. T. Birkholzer, and C.-F. Tsang. 2009. A semi-analytical solution for large-scale injection-induced pressure perturbation and leakage in a laterally bounded aquifer–aquitard system. *Transport in porous media*, 78(1): 127-148.



Comprehensive study of the effect of hydrodynamic coefficients of infinite and finite leakage aquifers on hydraulics of unsteady groundwater flow

Iraj Saeedpanah¹, Siamak Taheri²

Abstract

In this study with respect to the sensitivity analysis of transmissibility coefficient, storage coefficient and specific leakage of infinite and finite leakage aquifers in the unsteady flow state of groundwater, which was carried out using an analytical method, these results were obtained: 1. With increasing the coefficients of transmissibility, storage and specific leakage of infinite and finite leakage aquifer, the drawdown reduces. 2. In all of the examined sensitivity analysis, it was observed that the drawdown of infinite leakage aquifer is more than the finite leakage aquifer and the drawdown of finite leakage aquifer 2 is more than the finite leakage aquifer 1. 3. With increasing the transmissibility coefficient and specific leakage of infinite and finite leakage aquifer, the groundwater flow reaches earlier to steady state. 4. With increasing the storage coefficient of infinite and finite leakage aquifer, the groundwater flow reaches later to steady state. 5. Infinite leakage aquifer reaches the steady state later than the finite leakage aquifer and finite leakage aquifer 1 reaches the steady state earlier than the finite leakage aquifer 2.

Keywords: Leakage aquifer, Unsteady flow, Transmissibility coefficient, Storage coefficient, Specific leakage

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

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