چهل و دومین گردهمایی (همایش) ملی
علـوم زمیـــن
The 42nd National
Geosciences Congress
www.geoconf.ir

بررسی عملکرد و تاثیر چاه‌های خشک اندازی درکاهش نرخ آب ورودی به بخش آبرفتی تونل گلاس (آذربایجان غربی)

عطیه یزدخواستی(نویسنده مسئول)[۱]، رسول اجل لوئیان [۲]، مسعود مرسلی [۳]

[۱] دانش آموخته کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی ، دانشگاه اصفهان atiyehyazdkhasti@yahoo.com

[۲] استاد گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان rasajl@sci.ui.ac.ir

[۳] استادیار گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان m.morsali@sci.ui.ac.ir

چکیده

تونل انتقال آب گلاس واقع در ۹ کیلومتری جنوب شرق شهرستان نقده، به طول تقریبی ۳۵/۷ کیلومتر جهت انتقال ۶۴۶ میلیون مترمکعب آب در سال، از سد گلاس به دشت نقده و حوضه آبریز دریاچه ارومیه حفرشده است. حدود ۱۸۰۰ متر از بخش میانی این تونل در آبرفت قرارگرفته است. بخش واقع‌شده در آبرفت این تونل، به علت وجود سطح آب زیرزمینی بالا، مشخصات مقاومتی پایین خاک و زیاد بودن مقدار سربار یکی از چالشی‌ترین پروژه‌های تونل سازی در کشور بوده است. بر اساس مطالعات زمین‌شناسی مهندسی، تناوبی از لایه‌های رسوبی ریزدانه (عمدتاً CL و CH) و درشت‌دانه (عمدتاً GC و SM) در مسیر تونل وجود دارد، که در زون‌بندی‌های انجام‌شده خطر حفاری، ریزش و نفوذ آب در بخش‌های درشت‌دانه مسیر تونل زیاد و نیازمند تمهیدات ویژه برای عبور از این مناطق می‌باشد. برای سهولت در حفاری و عبور از زون‌های پرخطر آبرفتی تونل گلاس طرح چاه‌های پمپاژ برای خشک‌اندازی و پایین انداختن سطح آب زیرزمینی و در نهایت کاهش آب ورودی به تونل و کاهش بار آبی، طراحی و مورد اجرا قرار گرفت. در این طرح چاه‌های پمپاژ در دو سمت محور تونل با فاصله ۱۰۰ متر از یکدیگر شروع به برداشت آب کردند که در نهایت در حدود ۵۰ الی ۶۰ متر سطح آب زیرزمینی کاهش یافت. در نتیجه حفاری تونل در این محدوده میسر شد.

واژه‌های کلیدی

تونل گلاس، آبرفت، آب‌های زیرزمینی، خشک اندازی.

۱. مقدمه

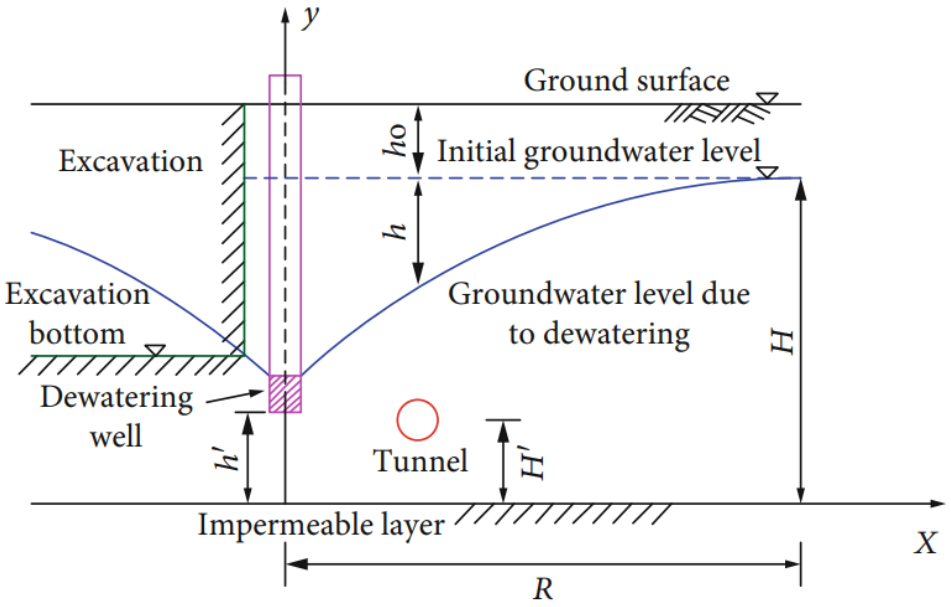
یکی از مهم‌ترین مشکلات ساخت تونل‌ها، کنترل آب‌های زیرزمینی در حین حفاری است که اگر در طول طراحی و اجرای پروژه نادیده گرفته شود به یک مسأله پرهزینه تبدیل می‌شود. در برخی از موارد در هنگام اجرا و احداث این سازه‌ها، مقادیر قابل توجهی آب زیرزمینی به داخل آن‌ها هجوم آورده و در واقع این سازه‌ها نقش زهکش را برای آبخوان منطقه ایفا می کنند. با بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی و هیدروژئولوژی تونل می‌توان زون‌های پر خطر را شناسایی و پیش‌بینی‌های لازم جهت کاهش مخاطرات ناشی از آن انجام داد. در این مطالعه نتایج طرح خشک اندازی با چاه‌های پمپاژ برای پایین انداختن سطح آب زیرزمینی و شعاع تاثیر ناشی از آن‌ها در بخش آبرفتی تونل انتقال آب گلاس مورد بررسی قرار گرفته است.

برای تحلیل جریان آبهای زیرزمینی، مدل‌سازی منابع آب زیرزمینی، پیش‌بینی تحولات آینده و تعیین عکس‌العمل آبخوان در شرایط مختلف برداشت و تغذیه و همچنین اجرای سناریوهای خشک اندازی قبل از هر چیز مستلزم در دست داشتن پارامترهای هیدرولیکی لایه‌های آبدار است. ضریب قابلیت انتقال (T)، هدایت هیدرولیکی (K) و ضریب ذخیره (S) مشخص‌کننده خصوصیات هیدرولیکی لایه‌های آبدار هستند که ضرایب هیدرودینامیک نیز خوانده می‌شوند. روش‌های مختلفی نظیر فرمول‌های تجربی، روش‌های آزمایشگاهی، آزمایش‌های ردیابی، آزمایش‌های لوژان و لوفران و آزمون‌های پمپاژ برای اندازه‌گیری و برآورد ضرایب هیدرودینامیک در آبرفت‌ها و سایر محیط‌های متخلخل وجود دارد. یکی از قابل‌اعتمادترین روش‌ها برای اندازه‌گیری ضرایب هیدرودینامیک آبخوان، آزمایش پمپاژ است. در این روش با استفاده از داده‌های افت – زمان و به کمک روش‌ها و معادلات مختلف، ضرایب هیدرودینامیک آبخوان محاسبه شده و با توجه به نتایج آن پایین انداختن سطح آب زیرزمینی (بار فشار آب) مورد بررسی قرار می‌گیرد. در اجرای خشک اندازی با چاه‌های پمپاژ شرایط زیرزمینی بر طبق فرضیات دوپویی (Dupuit approximation) با شرایط زیر مورد توجه قرار می گیرد: ۱) آبخوان همگن و ایزوتروپ است، ۲) جریان آب زیرزمینی آرام و پایدار و مطابق با قانون دارسی است، ۳) سطح آب به صورت افقی است [6]. در شکل ۱ شماتیکی از خشک اندازی با چاه پمپاژ نمایش داده شده است.

تغییرات سطح آب زیرزمینی و شعاع تاثیر خشک اندازی را بعد از اجرای عملیات پمپاژ می‌توان به کمک روابط ۱ و۲ محاسبه کرد. در رابطه ۱، y ارتفاع آب بعد از خشک اندازی بر حسب متر، h فاصله بین سطح آب در چاه پمپاژ و لایه نفوذناپذیر بر حسب متر، H ارتفاع اولیه آب زیرزمینی بر حسب متر، r شعاع چاه بر حسب متر، x فاصله افقی بر حسب متر و R شعاع نفوذ آبگیری می‌باشد. در رابطه تجربی ۲ نیز S عمق آبگیری چاه پمپاژ به متر، H ارتفاع اولیه آب زیرزمینی و K ضریب نفوذپذیری زمین بر حسب متر بر روز می‌باشد [8].

$$y^2 = h^2 + (H^2 - h^2)\frac{\ln x - \ln r}{\ln R - \ln r} \quad (۱)$$

$$R = 2S\sqrt{HK} \quad (۲)$$



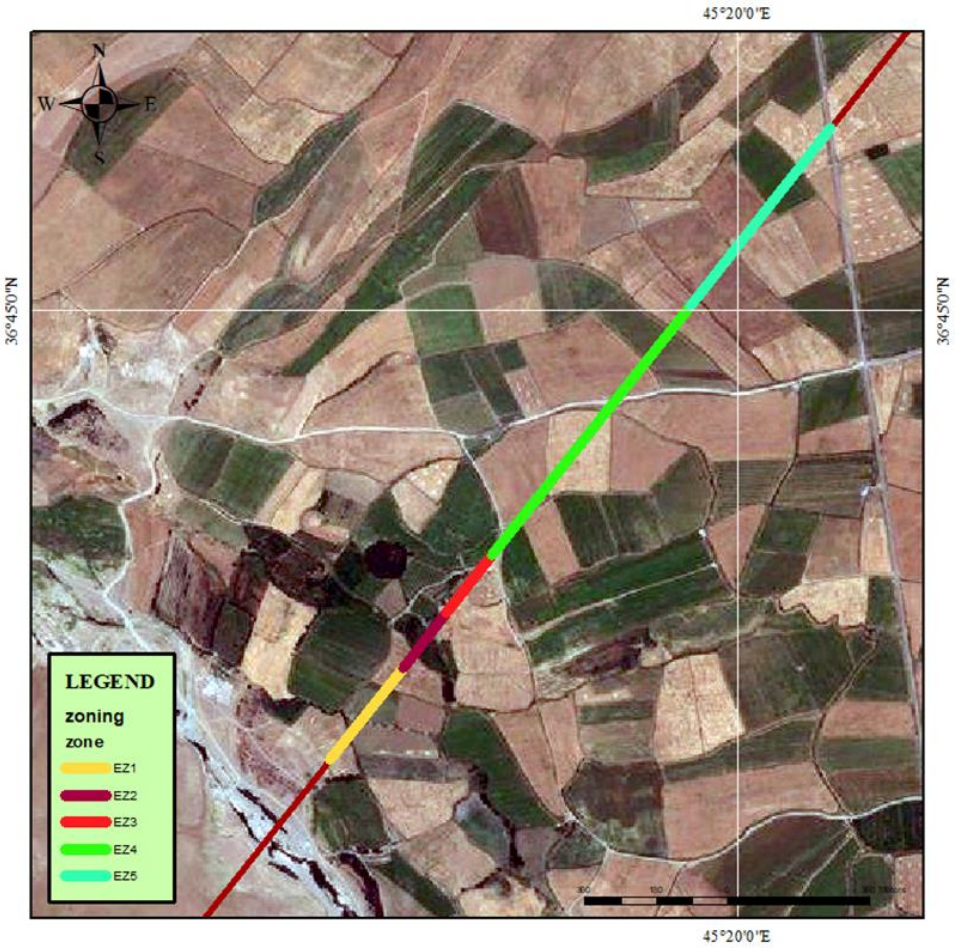
شکل۱.شماتیکی از خشک اندازی [8]

۱.۱. مشخصات موردی تونل گلاس

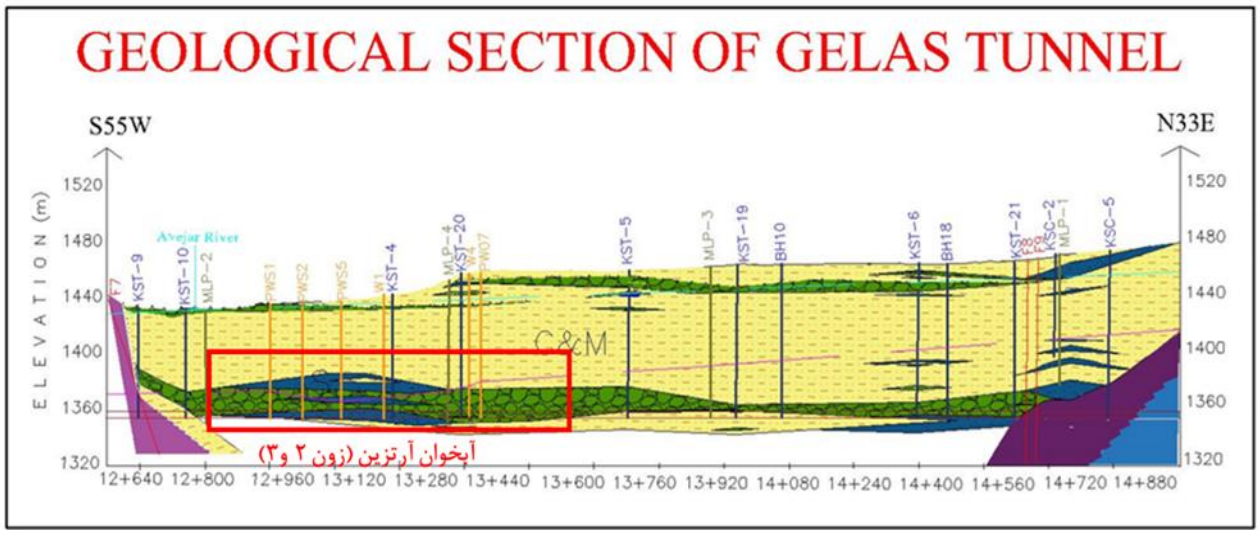
طرح تونل انتقال آب گلاس جهت انتقال بخشی از آب رودخانه لاوین که سرشاخه اصلی رودخانه زاب می‌باشد به سمت حوضه آبریز دریاچه ارومیه و دشت نقده در مرحله مطالعه و اجراست. مسیر تونل انتقال آب گلاس بر پایه تقسیمات استانی در جنوبی‌ترین بخش استان آذربایجان غربی در مجاورت مرزی شمال عراق واقع گردیده است. کیلومتراژ ۱۲۶۰۰ تا ۱۵۳۰۰ از مسیر تونل را آبرفت‌های عهد حاضر تشکیل داده است. بخش آبرفتی منطقه شامل تناوبی از لایه‌های رسوبی ریزدانه و درشت‌دانه می‌باشد. بر طبق اطلاعات ژئوفیزیکی صورت گرفته، آبرفت منطقه دارای حداقل دو آبخوان به صورت مطبق است که بالایی از نوع آزاد و پایینی از نوع تحت فشار است. این دو آبخوان توسط یک لایه ریز ضخیم لایه CL و CH به ضخامت تقریبی حداقل ۳۰ متر از یکدیگر جدا شده‌اند [1]. احتمال ریزش و نفوذ آب در این آبرفت‌ها زیاد بوده و در نظر گرفتن تمهیدات لازم برای حفاری در این بخش‌ها الزامی است. بالا بودن سطح آب زیرزمینی ، وجود پارامترهای ضعیف زمین‌شناسی مهندسی و تأثیر رودخانه آواجار بر روی این آبرفت‌ها این مناطق را جزء نقاط پر خطر در مسیر حفاری تونل قرار داده است. بخش آبرفتی مسیر تونل بر اساس پارامترهای زمین شناسی مهندسی و رده بندی خاک به ۵ زون تقسیم بندی شده است. اطلاعات مختص به هر زون در جدول ۱ نمایش داده شده است، با توجه به پارامترهای زمین شناسی مهندسی در جدول ۱، زون‌های ۲و ۳ نفوذپذیری بالاتری نسبت به سایر زون‌ها دارند و همچنین این دو زون دارای مقادیر شاخص پلاستیک کم و رسوبات درشت دانه می‌باشند. بر اساس برآورد آب ورودی به تونل طبق دو روش تجربی و تحلیلی و مقادیر واقعی آب ورودی ، خطر نفوذ آب در این دو زون زیاد و زون‌های پر خطر در نظر گرفته شده اند در شکل ۲ زون‌بندی ها و در شکل ۳ مقطع زمین‌شناسی بخش آبرفتی مسیر تونل گلاس نمایش داده شده است. با توجه به مقطع زمین شناسی دو زون پر خطر ۲و۳ در آبخوان آرتزین قرار گرفته و با پیشروی تونل ضخامت آبخوان کم و از این دو زون به بعد مقدار آب ورودی به تونل کاهش یافته است [3].

جدول ۱. برخی از خصوصیات زمین شناسی مهندسی و هیدروژئولوژی زون‌های بخش آبرفتی تونل [3]

آب ورودی به تونل (Lit/S/Zone)			اطلاعات									
واقعی	تحلیلی	تجربی	شاخص پلاستیک	درصد رطوبت	وزن واحد حجم (g/cm3)	دانه بندی	روباره (m)	بار آبی (m)	نفوذپذیری (m/S)	طول زون (m)	تا متراژ	از متراژ	زون
33	14	11	25	34	1/38	ML	63	74	5/00E-07	240	12928	12688	EZ1
235	114	93	12	28	1/5	SC-SM	66	76	5/00E-06	185	13113	12928	EZ2
180	239	197	7	10	1/99	SC-SM	80	78	1/00E-05	190	13303	13113	EZ3
30	28	23	7	10	1/99	GC-GM	100	85	3/00E-07	700	14003	13303	EZ4
			16	20	1/79	CL-ML							
30	37	32	15	22	1/58	CL	110	93	4/50E-07	580	14583	14003	EZ5
			9	9	1/84	GC-GM							



شکل ۲. زون‌بندی زمین‌شناسی انجام شده در بخش آبرفتی [4]

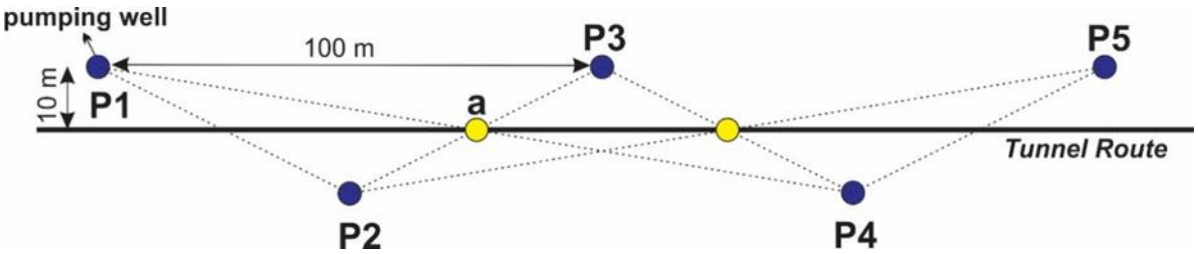


شکل ۳. مقطع زمین شناسی بخش آبرفتی تونل[4]

۲. طرح خشک اندازی

با استفاده از روش‌های تحلیلی برای پیش‌بینی جریان آب ورودی به تونل، میزان فاصله سطح آب زیرزمینی تا عمق تونل را به عنوان حداکثر کاهش سطح آب در نظر گرفته می‌شود؛ ولی در تونل‌هایی با عمق زیاد به طور کلی کاهش سطح آب زیرزمینی در اثر پمپاژ آب به عمق تونل نمی‌رسد، در واقع محاسبه حداکثر کاهش عمق آب زیرزمینی در تئوری و عمل دشوار است [9].

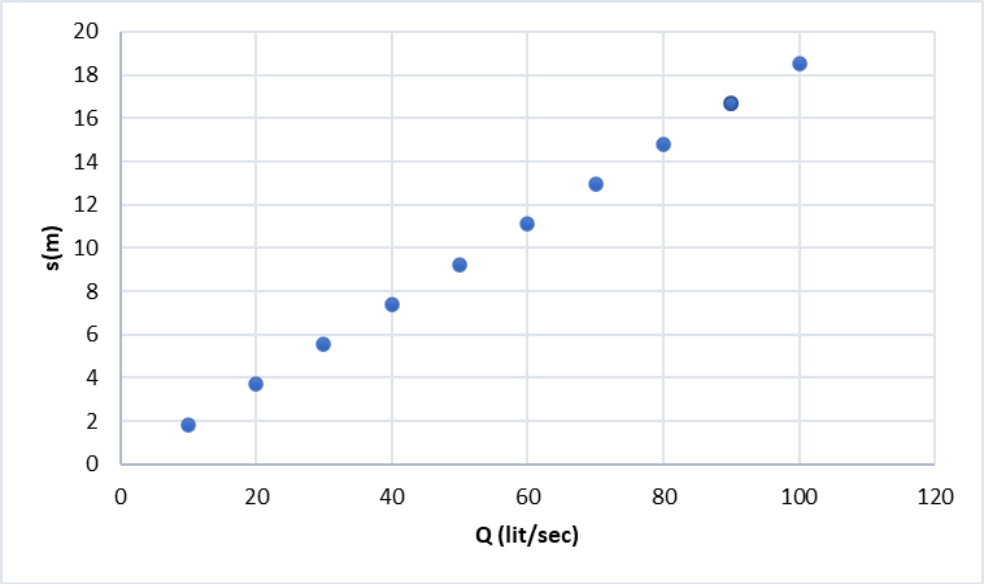
برای اجرای خشک اندازی، در دو زون پر خطر ۲و۳ طراحی چاه‌ها در دو طرف محور تونل به صورت زیگزاگی (شکل ۴) با فاصله ۱۰۰ متر از یکدیگر و ۱۰ متر از تونل در نظر گرفته شده است تا بهینه‌ترین آرایش و فاصله برای خشک اندازی به دست آید. در این طرح (آرایش زیگزاگی) فاصله نقطه a که در آن نقطه، حداقل افت سطح آب زیرزمینی باید بیش‌تر از افت مورد نیاز باشد، از دو چاه P2 و P3 با هم برابر و از دو چاه P1 و P4 با هم برابر است. بر این اساس افت سطح آب زیرزمینی در اثر پمپاژ از هر یک از چاه‌ها با روش کوپر – ژاکوب [7] که برای آبخوان‌های محبوس آبرفتی ارائه شده‌اند [5]، محاسبه و سپس طبق اصل برهم‌نهی، افت‌ها با یکدیگر جمع می‌شوند. با توجه به دبی‌های مختلف از چاه‌های پمپاژ پیشنهادی، مقدار افت در نقطه a در اثر پمپاژ هم‌زمان از ۴ چاه در جدول ۲ محاسبه‌شده است. این مقادیر در شکل ۵ نیز نشان داده شده‌اند. با توجه به جدول۲ و نمودار شکل ۵، با افزایش مقدار پمپاژ میزان افت سطح آب زیرزمینی نیز افزایش یافته است. در شکل ۶ نیز نمایی از چاه خشک‌اندازی نمایش داده شده است.



شکل ۴. شماتیکی از آرایش زیگزاگی چاه‌ها[4]

جدول ۲. رابطه بین مقدار پمپاژ از هر چاه و حداکثر افت حاصله در آرایش زیگزاگی چاه‌های پمپاژ [2]

دبیQ(lit/sec)	دبیQ (m^3/day)	مقدار افتS (m)
۱۰	۸۶۴	۱.۸۵۰۲۳۴
۲۰	۱۷۲۸	۳.۷۰۰۴۶۷
۳۰	۲۵۹۲	۵.۵۵۰۷۰۱
۴۰	۳۴۵۶	۷.۴۰۰۹۳۵
۵۰	۴۳۲۰	۹.۲۵۱۱۶۸
۶۰	۵۱۸۴	۱۱.۱۰۱۴
۷۰	۶۰۴۸	۱۲.۹۵۱۶۴
۸۰	۶۹۱۲	۱۴.۸۰۱۸۷
۹۰	۷۷۷۶	۱۶.۶۵۲۱
۱۰۰	۸۶۴۰	۱۸.۵۰۲۳۴



شکل ۵. رابطه بین مقدار پمپاژ از هر چاه و حداکثر افت حاصله در آرایش زیگزاگی چاه‌های پمپاژ

شکل ۶. نمایی از چاه‌های طرح خشک اندازی و حفاری آن‌ها

۲. تخمین شعاع تاثیر چاه‌های پمپاژ

برای موفقیت در اجرای طرح خشک‌اندازی نیاز به تعیین فاصله حفر چاه‌های پمپاژ با یکدیگر می‌باشد. در اجرای طرح خشک اندازی تونل گلاس نیز آزمون پمپاژ برای تعیین فواصل حفاری چاه‌ها صورت گرفت. عمق چاه‌های پمپاژ پیشنهادی ۱۱۰ متر در نظر گرفته شده بود، با این حال با توجه به ضخامت و عمق لایه محبوس، در مناطق مختلف، عمق چاه‌ها متغیر حفاری گردید. قطر پیشنهادی برای هریک از چاه ها حدود ۱۸ اینچ و حداکثر دبی پمپاژ این چاه ها حدود ۱۰۰ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است [2].

برای تخمین شعاع تاثیر به صورت میانگین، از چاهی (well 1) با دبی تقریبی ۴۰ لیتر بر ثانیه و طبق اطلاعات به دست آمده از این مقدار دبی، با جایگذاری در رابطه ۳ می‌توان شعاع تاثیر هر چاه را به دست آورد:

$$\ln r_e = \frac{h_0 - h_1}{h_2 - h_1} \ln r_2 - \frac{h_0 - h_2}{h_2 - h_1} \ln r_1 \qquad (۳)$$

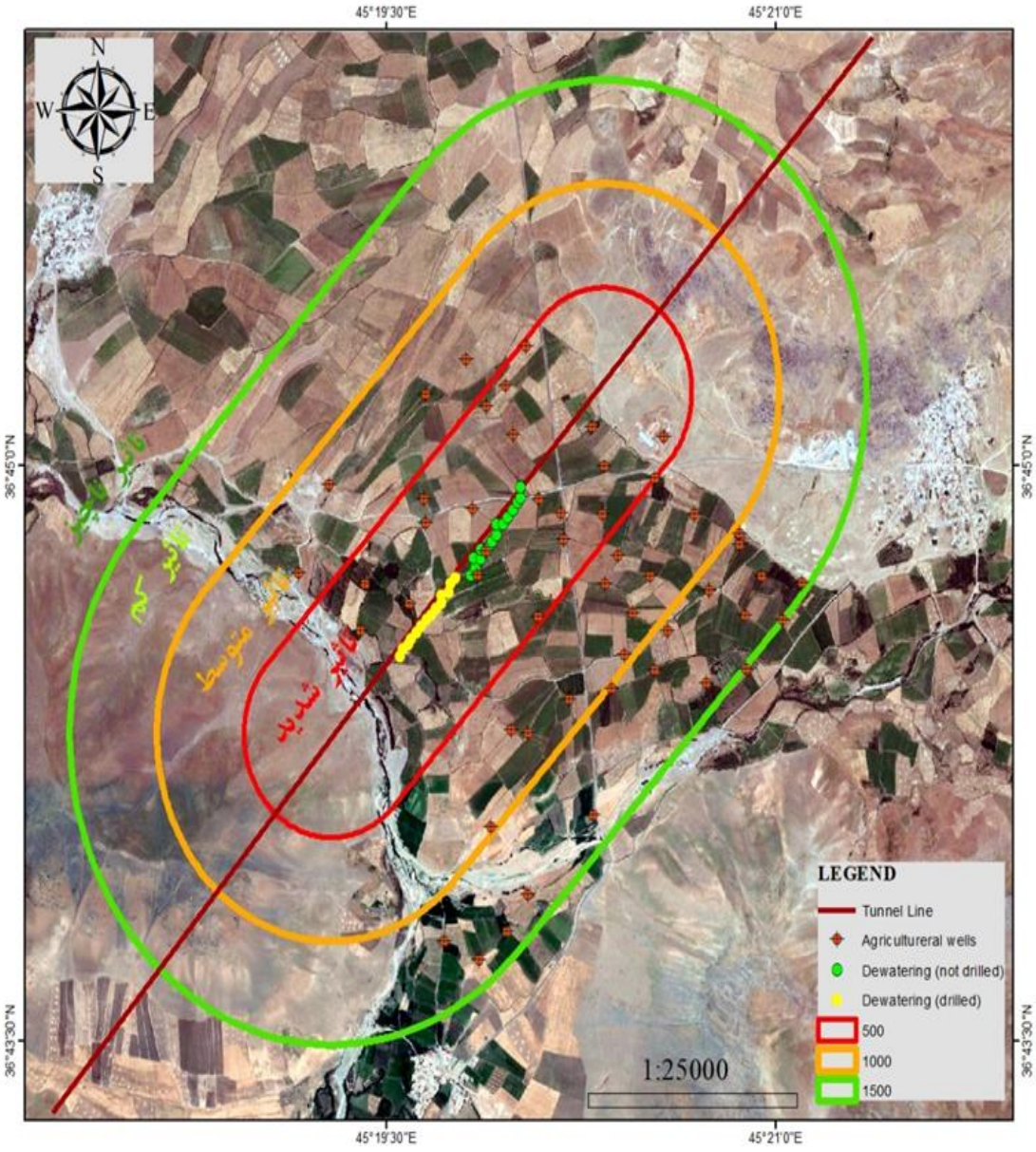
که در آن h_0 بار هیدرولیکی در آبخوان قبل از پمپاژ است.

$$\ln r_e = \frac{۶۵ - ۶۰.۵}{۶۳.۸۴ - ۶۰.۵} \times ۹۰ - \frac{۶۵ - ۶۳.۸۴}{۶۳.۹ - ۶۰.۵} \ln ۱ = ۶.۰۶$$

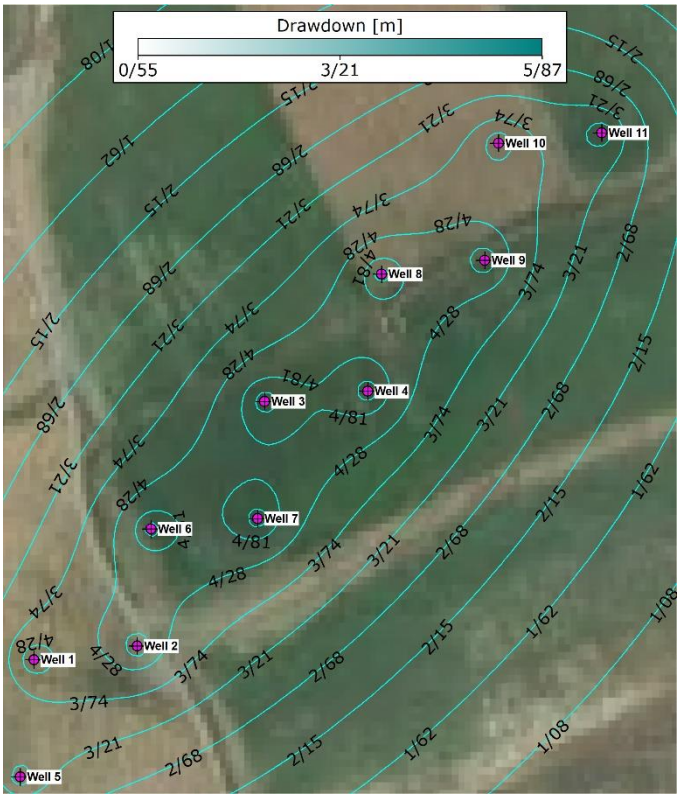
$$r_e \approx ۴۱۲ \text{ m}$$

اگرچه شعاع تأثیر به‌دست‌آمده تقریبی است و نمی‌تواند برای هر چاه کاملاً درست باشد اما در انتخاب فواصل بهینه چاه‌ها و طراحی آرایش‌های مختلف می‌تواند دید مناسبی را برای طراح ایجاد نماید. همچنین، اگرچه شعاع تأثیر هر چاه حدود ۴۰۰ متر است، اما با توجه به قابلیت انتقال نسبتاً بالای آب در آبخوان تحت‌فشار و شکل مخروط افت برای آن، بخش اعظم افت در حداکثر ۵۰ متری هر چاه صورت می‌گیرد و مابقی مخروط افت دارای گسترش زیاد و افت کم است؛ بنابراین هرچه چاه‌ها به محور تونل نزدیک‌تر و فاصله طولی آن‌ها از

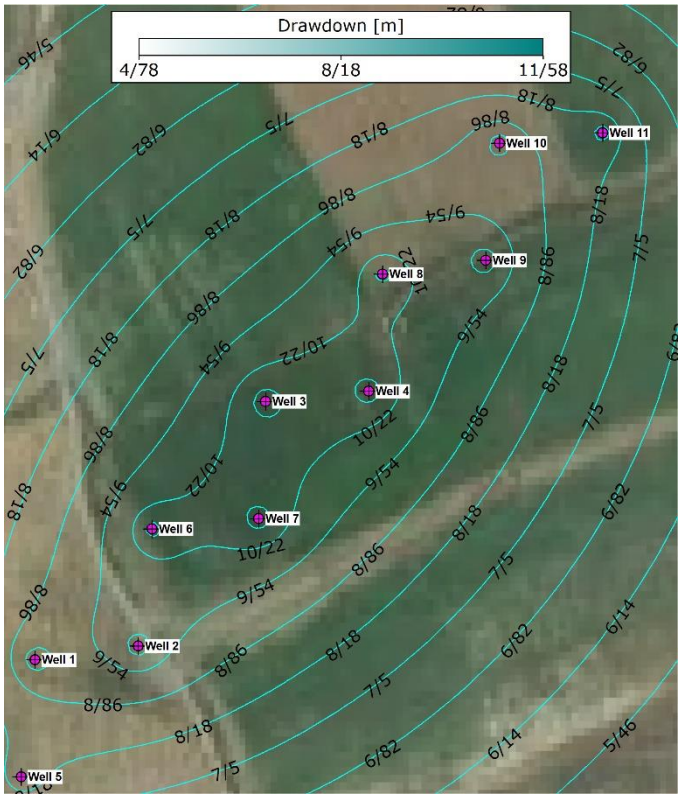
یکدیگر کم باشد، نتایج مطلوب‌تری در بر خواهد داشت. نکته دیگری که باید به آن اشاره شود این است که این شعاع تأثیر برای یک چاه با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه است؛ درصورتی‌که دبی افزایش یابد، قطعاً شعاع تأثیر آن نیز افزایش خواهد یافت. با توجه به شعاع تاثیر به دست آمده محدوده آبرفتی به چهار بخش با تاثیرپذیری شدید، متوسط، کم و ناچیز با رنگ‌های مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است که بیانگر افزایش تأثیرپذیری با نزدیک شدن به محور تونل است. همچنین با استفاده از نرم‌افزار AquiferTest میزان افت سطح آب زیرزمینی و گسترش مخروط افت ناشی از پمپاژ آب زیرزمینی از زمان شروع خشک اندازی تا ۵۰۰ دقیقه مدل‌سازی و در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های الف تا ج (شکل ۸) حداکثر افت در زمان‌های ابتدایی پمپاژ و در نزدیکی چاه‌ها اتفاق می‌افتد . همچنین با توجه به میزان افت‌های به دست آمده به نظر می‌رسد خشک اندازی در بازه زمانی ۱۰۰ تا ۳۰۰ دقیقه (شکل۸-ت و ۸-ث) در حالت بهینه قرار می‌گیرد و نتیجه مطلوب را دارا خواهد بود.



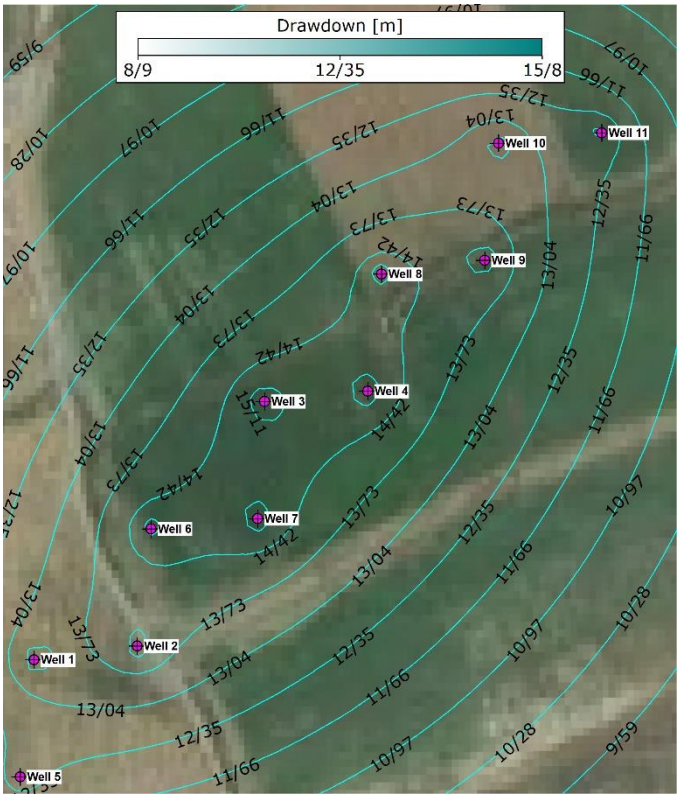
شکل ۷. تاثیر طرح خشک اندازی و آب ورودی به تونل بر کاهش سطح آب زیرزمینی



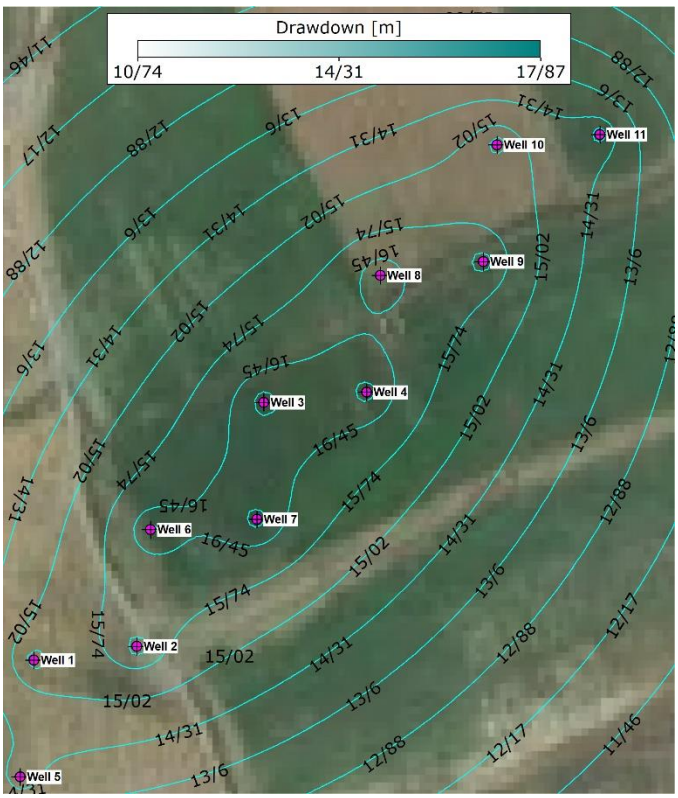
الف) شروع خشک اندازی



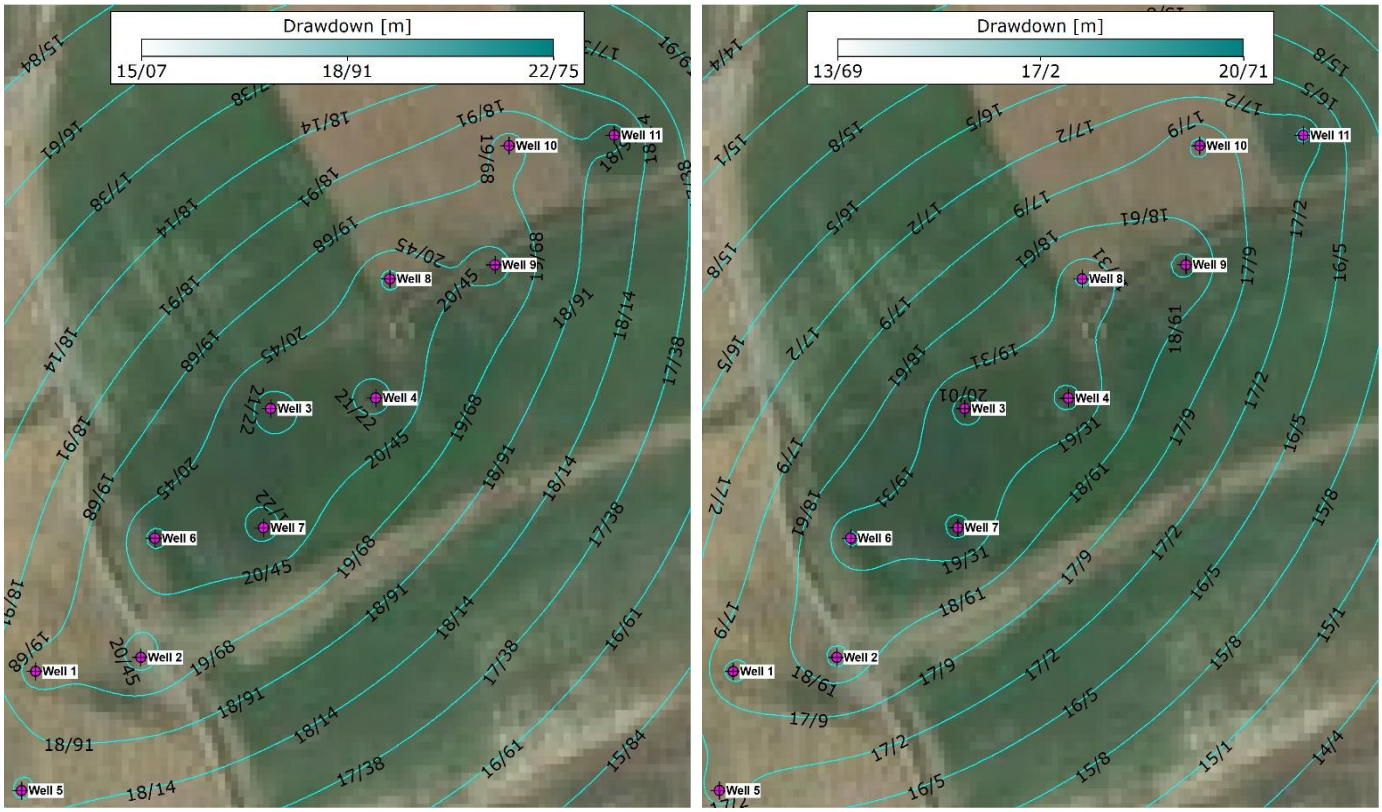
ب) ۱۰ دقیقه



پ) ۵۰ دقیقه



ت) ۱۰۰ دقیقه



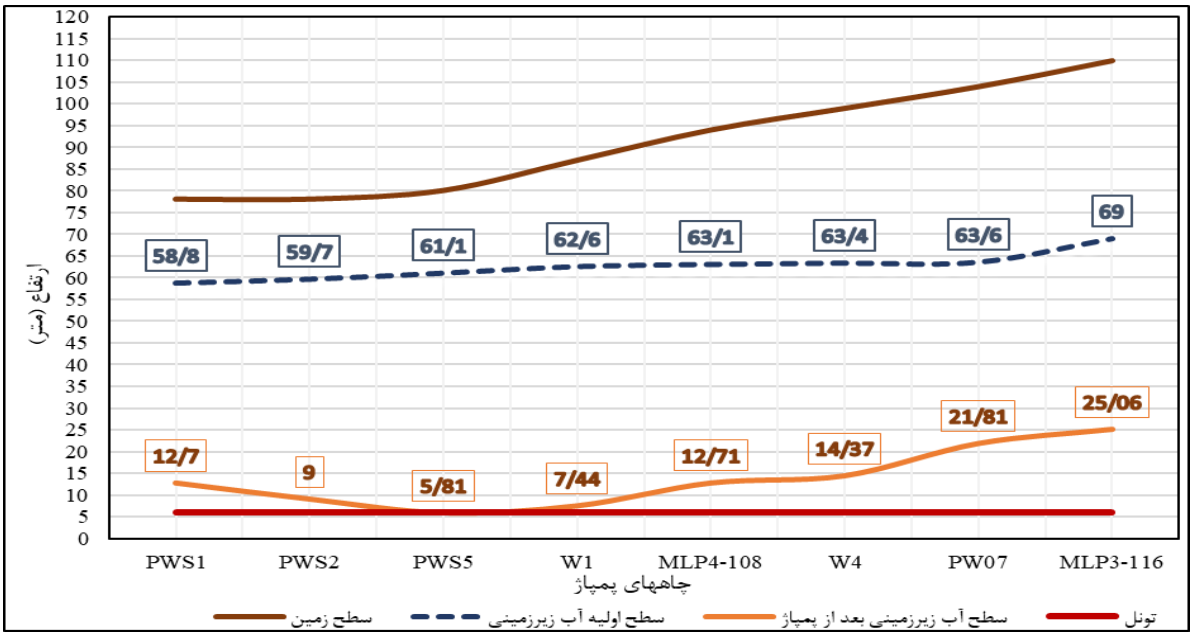
ث) ۳۰۰ دقیقه

ج) ۵۰۰ دقیقه

شکل ۸. مدل‌سازی گسترش مخروط افت با استفاده از نرم‌افزار AquiferTest

۳. نتیجه گیری

زون‌های ۲ و ۳ بخش آبرفتی تونل به دلیل وجود رسوبات درشت‌دانه با تراوایی بالا و قرار گیری این دو زون در بخش آرتزین باعث هجوم آب به درون تونل شد؛ همچنین به علت عدم وجود رسوبات ریزدانه رسی و پایین بودن مقادیر شاخص پلاستیک در این دو زون، میزان جذب آب کم و نفوذ آب به درون تونل بسیار است. برای سهولت در حفاری و عبور از این زون‌های پرخطر بخش آبرفتی تونل گلاس، با استفاده ازنتایج شعاع تاثیر به دست آمده طرح چاه‌های پمپاژ برای خشک‌اندازی و پایین انداختن سطح آب زیرزمینی و در نهایت کاهش آب ورودی به تونل طراحی و مورد اجرا قرار گرفت. تراز سطح آب زیرزمینی در چاه‌های خشک‌اندازی و پیزومترهای مجاور آن‌ها قبل و بعد از خشک اندازی اندازه‌گیری شده است. این نتایج در نمودار شکل ۹ نمایش داده‌شده است. بر اساس نمودار مذکور، تراز سطح پیزومتریک، پیش از اجرای این طرح به‌طور متوسط ۶۰ متر بالای محور تونل بوده و پس از اجرای این طرح، ارتفاع آب به حدود ۱۲ متر کاهش یافته است. به‌طورکلی، نتایج طرح خشک اندازی و پمپاژ آب ورودی به تونل به صورت آرایش زیگزاکی نشان می‌دهد که این کاهش تراز آب و خشک‌اندازی در کاهش فشار آب، پایداری و حفاری در بخش آبرفتی مؤثر بوده است و سبب پیشروی تونل شده است. به‌عبارت‌دیگر، آرایش زیگزاکی چاه‌های پمپاژ با فاصله حداکثر ۱۰۰ متر از هم در کاهش سطح پیزومتریک نتایج قابل‌قبولی داشته است و در صورت عدم اجرای خشک‌اندازی، طرح تونل انتقال آب گلاس ناتمام می‌ماند.



شکل ۹. تراز سطح پیزومتریک قبل و بعد از طرح خشک اندازی در مسیر آبرفتی تونل بر اساس داده های واقعی

منابع

[1] مهندسین مشاور ایمن سازان، ۱۳۹۳." پروژه طرح انتقال آب مازاد رودخانه گلاس به حوضه دریاچه ارومیه" مطالعات هیدروژئولوژی تونل ورودی، قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، زیستاب، ۱۸۷ صفحه.

[2] مهندسین مشاور ساحل امید ایرانیان، ۱۳۹۹." پروژه طرح انتقال آب مازاد رودخانه گلاس به حوضه دریاچه ارومیه" گزارش خشک-اندازی بخش آبرفتی تونل گلاس، قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، زیستاب، ۶۱صفحه.

[3] عطیه یزدخواستی، ۱۴۰۱. نقش پارامترهای زمین شناسی مهندسی و شرایط آب زیرزمینی در حفاری بخش آبرفتی تونل گلاس (آذربایجان غربی)، پایان نامه زمین شناسی مهندسی، دانشگاه اصفهان، ایران، ۱۲۸ صفحه.

[4] عطیه یزدخواستی، رسول اجل لوئیان و مسعود مرسلی، ۱۴۰۱، ارزیابی روش‌های تخمین آب ورودی به بخش آبرفتی تونل گلاس (آذربایجان غربی) ، چهل و یکمین گردهمایی (همایش ملی) علوم زمین، تهران،https://civilica.com/doc/1665535.

[5] علیرضا نسیمی، ضرغام محمدی، ۱۳۹۴. ارزیابی روش‌های تعیین ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان بر اساس آزمون پمپاژ در استان فارس. نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۵، شماره ۲، صفحات ۲۰۱ تا ۲۱۵.

[6] Anderson, E, I., 2005. Modeling groundwater–surface water interactions using the Dupuit approximation. *Advances in water resources*, *28*(4), 315-327.

[7] Cooper, HH., Jacob, CE., 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. American Geophysical Union Transactions 27:526-534.

[8] Guo, P., Liu, F., Lei, G., Li, X., Zhu, C. W., Wang, Y., ... & Gong, X., 2021. Predicting response of constructed tunnel to adjacent excavation with dewatering. *Geofluids*, *2021*, 1-17.

[9] Zhixiong, Z., Yang, L., Mo, X., Yunhui, Z., Yun, L., 2020 .Study on analytical calculation method of water inflow in the tunnel of oblique crossing layered aquifer structure, In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 619, 1, 012019.