

# مبانی محاسبات حریم بهداشتی برای حفاظت کیفی چاههای آب شرب در شهرها

کاظم بدو\*

گروه مهندسی عمران دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

(دریافت مقاله: ۸۱/۷/۲۴ - دریافت نسخه نهایی: ۸۲/۳/۲۴)

**چکیده** - این تحقیق با هدف تعریف مبانی علمی و شناسایی و ارائه روشهای موجود برای محاسبه حریم بهداشتی چاههای آب شرب شهرها صورت پذیرفته است. نتایج این مطالعه می تواند قسمتی از نیازهای شرکت آب و فاضلاب کشور را در خصوص کنترل کیفی منابع آب شرب از طریق تعیین و اعمال حریمهای بهداشتی چاهها، برطرف سازد. ابتدا با استفاده از منابع علمی موجود معیارها و روشهای تعیین حریم بهداشتی چاهها تعریف شدند. سپس روشهای (۱) شعاع ثابت، (۲) اشکال متغیر ساده شده، و (۳) روش محاسباتی جریان - انتقال در قالب کد رایانه ای WHPA، معرفی شده. و کاربرد این روشها با مثالهای موردی از چاههای آب شرب ارومیه نشان داده شدند. مثالهایی از حریمهای بهداشتی محاسبه شده برای ۳۶ چاه آبرسانی شهر ارومیه با استفاده از سه مدول محاسباتی موجود در کد WHPA ارائه شده، و تاثیر پارامترهای هیدروژئولوژیک در مساحت حریمها مورد بحث قرار گرفت. در صورت فراهم بودن اطلاعات قابل اعتماد هیدروژئولوژیک در منطقه استقرار چاهها، روشهای محاسباتی و کد WHPA نتایج دقیقتری را برای حریمهای بهداشتی چاهها ارائه می دهند.

واژگان کلیدی: چاههای آب شرب، حفاظت کیفی، حریم بهداشتی، هیدروژئولوژی

## Fundamentals of Capture Zone Calculations for the Qualitative Protection of Urban Drinking Water Wells

K. Badv

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University

**Abstract:** *This study is an attempt to introduce scientific fundamentals and available methods for wellhead protection area (capture zone) delineation for drinking water wells in cities. The results of this study could obviate some demands of the national water and wastewater company in quality control of the drinking water resources by delineation and application of the wellhead protection areas. For this purpose, the available literaturer reviewed to extract, criteria and methods of wellhead protection delineation, Then, (1) fixed radius method, (2) simplified variable shape methods, and (3) flow-transport analytical methods implemented in the computer code WHPA are introduced. The applicability of these methods is shown by some sample calculations for Urmia drinking water wells. Samples of the calculated wellhead protection areas for 36 wells in Urmia City will be shown using three analytical modules in WHPA. The effects of the hydrogeologic parameters on the wellhead areas will be discussed. When reliable hydrogeologic parameters are available in the region where wells are located, the analytical methods and WHPA code produce accurate results for wellhead protection areas.*

**Keywords:** *Drinking Water Wells, Quality Control, Capture Zone, Hydrogeology*

\* - دانشیار

حفاظت سرچاهی<sup>۴</sup> نیز نام برده می‌شود. به اختصار ناحیه حریم بهداشتی همان ناحیه سطحی و یا زیر سطحی اطراف چاه است که در هنگام پمپاژ، آب چاه را تامین کرده و از این ناحیه مواد آلوده می‌توانند به طرف چاه حرکت کرده و به آب داخل چاه برسند [۱۵]. مطابق شکل (۱) پمپاژ از چاه، تعادل طبیعی زیر سطحی را به هم زده و موجب پایین آمدن سطح آب زیر زمینی در اطراف چاه می‌شود. این تاثیر که به صورت افت تراز آب زیر زمینی است، در ناحیه تاثیر چاه<sup>۵</sup> اتفاق افتاده و قیف افت<sup>۶</sup> نامیده می‌شود. در اطراف چاه ناحیه دیگری به نام ناحیه مشارکت (ZOC) وجود دارد که شامل تمام نواحی است که در تغذیه آب چاه مشارکت دارند. مطابق شکل (۱) قسمتی از ناحیه تاثیر چاه در داخل ناحیه مشارکت قرار می‌گیرد. اگر حرکت آب زیر زمینی به داخل چاه در مدت زمان معینی مد نظر باشد، ناحیه مشارکت کننده در تامین آب چاه در این مدت معین، ناحیه انتقال<sup>۷</sup> نامیده می‌شود که در واقع شامل قسمتی از ناحیه مشارکت است.

### ۳- معیارها و روشهای تعیین حریم بهداشتی چاه

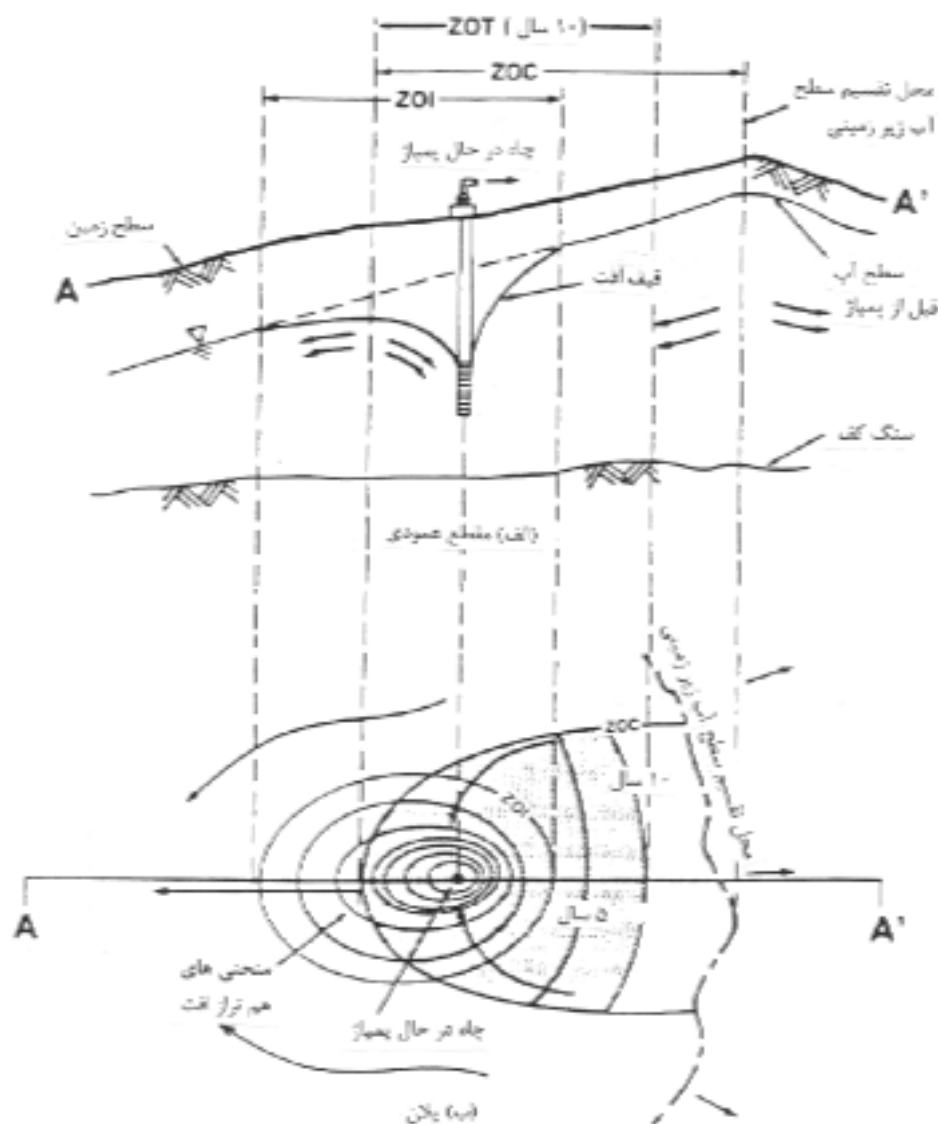
نظریه‌ها و استانداردهای مفهومی که روشهای تعیین حریم بهداشتی بر اساس آنها تعریف می‌شود معیار نامیده می‌شود. در بررسی منابع پنج معیار اصلی شناسایی شدند [۳] که عبارت‌اند از: ۱- معیار فاصله، ۲- معیار افت، ۳- معیار زمان حرکت ۴- معیار مرزهای جریان و ۵- معیار ظرفیت لایه آبدار برای جذب و کاهش آلودگی<sup>۸</sup>. پس از انتخاب معیار برای تعیین حریم، مقادیر حدی باید انتخاب شوند. در معیار فاصله، یک فاصله شعاعی در اطراف چاه به عنوان حریم تعیین می‌شود. در معیار افت، ناحیه‌ای در اطراف چاه تعیین می‌شود که در آن ناحیه، سطح آب زیرزمین (در لایه غیر محصور سطحی) یا سطح پیزومتریک (در لایه محصور) به مقدار معینی در اثر پمپاژ پایین آورده شود. در معیار زمان حرکت (TOT) ناحیه‌ای در اطراف چاه مشخص می‌شود که مواد آلوده دارای زمان یکسانی برای رسیدن به چاه هستند (مثلا ۵ سال). به عبارتی اگر زمان

حفاظت کیفی از منابع آب زیر زمینی شهرها که برای تامین آب شرب استحصالی از چاهها نقش دارند، امروزه از مسئولیتها و دغدغه‌های فکری متولیان تامین و توزیع آب شرب یعنی سازمانهای آب منطقه‌ای و شرکتهای آب و فاضلاب کشور محسوب می‌شود. در این راستا محاسبه بهینه و دقیق حریمها با استفاده از مبانی علمی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا محاسبه و اعمال حریم کوچکتر خطر آلودگی آب چاه را بالا برده و حریم بزرگتر اتلاف سرمایه را به دنبال خواهد داشت. تعریف مبانی علمی و شناسایی و ارائه معیارها و روشهای محاسبه حریم با انجام محاسبات حریم برای تعدادی از چاههای آب شرب شهر ارومیه در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است.

در بررسی منابع، یافته‌های علمی متعددی در مورد روشهای تعیین حریم بهداشتی چاهها شناسایی شدند [۱]. این منابع را می‌توان به چند شاخه تقسیم کرد: (۱) تعریف مبانی تئوریک حریم بهداشتی چاه [۲ و ۳]، (۲) مطالعات موردی [۴، ۵ و ۶]، (۳) استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی [۷]، (۴) استفاده از روشهای محاسباتی [۸ و ۹]، (۵) استفاده از مدل‌های عددی [۱۰]، (۶) استفاده از تحلیل‌های هیدروژئولوژیک - ژئولوژیک [۱۱]، و (۷) پروتوکوها و مقررات مربوط به تعیین حریم بهداشتی چاهها [۱۲]. در بررسی این منابع، کد رایانه‌ای WHPA که توسط بلانفورد و هویاکون<sup>۱</sup> برای اداره حفاظت منابع آب زیر زمینی آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا تهیه شده است شناسایی شد [۱۳]. این کد محاسباتی - عددی برای استفاده کارشناسان مدیریت منابع آب زیرزمینی ایالات متحده آمریکا برای تعیین حریم بهداشتی چاههای آب شرب تهیه شده است و تا کنون در تعیین حریمهای بهداشتی ایالات مختلف آمریکا مورد استفاده قرار گرفته و صحت نتایج آن تایید شده است [۱۴].

### ۲- تعریف حریم بهداشتی چاه

در منابع علمی از حریم بهداشتی چاه به نامهای (۱) ناحیه تسخیر<sup>۲</sup>، (۲) ناحیه مشارکت<sup>۳</sup>، و (۳) ناحیه



شکل ۱ - الف) مقطع عمودی و ب) پلان، شکل شماتیک از تعریف ناحیه تاثیر (ZOI)، ناحیه مشارکت (ZOC)، و ناحیه انتقال (ZOT) برای یک چاه در حال پمپاژ واقع در یک زمین با سطح آب زیر زمینی شیبدار

کاهش آلودگی، ناحیه‌ای تعیین می‌شود که در داخل آن ناحیه لایه‌های زیرسطحی دارای ظرفیت پالایندگی و جذب کافی برای کاهش غلظت آلاینده‌ها به حد قابل قبول برای شرب هستند. هر کدام از پنج معیار فوق الذکر دارای معایب و محاسنی‌اند و انتخاب آنها به مقدار زیاد بستگی به وضعیت لایه‌های هیدروژئولوژیک زیرسطحی در هر منطقه و همچنین وجود اطلاعات، داده‌ها و کارشناسان خبره در این زمینه دارد.

حرکت ۵ سال فرض شود، ناحیه یا مرزی در اطراف چاه مشخص خواهد شد که هر آلاینده‌ای که در روی مرز قرار دارد، ۵ سال طول خواهد کشید که به چاه برسد. در معیار مرز جریان، مرز تقسیم آب زیرزمینی و سایر عوارض فیزیکی و هیدروژئولوژیکی (مانند مرز غیرقابل نفوذ) که جریان آب زیرزمینی را کنترل می‌کند، مشخص و در تعیین حریم بهداشتی دخالت داده می‌شود. در معیار ظرفیت لایه آبدار برای جذب و

به دنبال انتخاب معیار تعیین حریم بهداشتی چاه، روش تعیین حریم برای محاسبه و ترسیم حریم روی نقشه و سپس در زمین باید انتخاب شود. شش روش برای تعیین حریم شناسایی شده‌اند [۳] که به ترتیب از روش ساده و کم هزینه تا روش پیچیده و پرهزینه عبارت‌اند از: (۱) روش شعاع فرضی و محاسبه شده، (۲) روش اشکال متغیر ساده شده، (۳) روشهای محاسباتی، (۴) روش ترسیم نقشه‌های هیدروژئولوژیک، و (۵) روش مدل‌های عددی جریان - انتقال. در روش اول (شعاع فرضی و محاسبه شده) یک معادله محاسباتی با استفاده از معیار زمان حرکت، شعاع یک دایره‌ای را در اطراف چاه مشخص می‌کند. در روش دوم (اشکال متغیر ساده شده)، از یک سری اشکال استاندارد برای حریم دور چاه استفاده می‌شود. این اشکال با استفاده از مدل‌های محاسباتی و ترکیبی از معیارهای مرز جریان و زمان حرکت محاسبه و ترسیم می‌شوند. در روش سوم (روش محاسباتی) مرزهای جریان آب زیرزمینی و دینامیک انتقال آلودگی با استفاده از معادلات تجربی محاسبه و حریم بهداشتی تعیین می‌شود. این روش از دقت بیشتری نسبت به دو روش اول برخوردار است. در روش چهارم (ترسیم نقشه‌های هیدروژئولوژیک)، مرزهای جریان آب زیرزمینی با استفاده از روشهای زمین شناسی، ژئومورفولوژیک، ژئوفیزیکی و ردیابی مواد رنگی مشخص و در روی نقشه ترسیم می‌شود. در روش پنجم (روش مدل‌های عددی جریان - انتقال) با استفاده از محاسبات ریاضی جریان آب زیرزمینی و یا معادلات انتقال آلودگی، شرایط متنوعی از وضعیتهای هیدروژئولوژیک و پتانسیلهای آلودگی مدل شده و حریم بهداشتی چاه تعیین می‌شود. این روش دقیقترین و گرانترین روش تعیین حریم بهداشتی چاه است.

#### ۴- نقش مکانیزمهای حرکتی و آلاینده‌ها در حریم بهداشتی چاه

آشنایی با اصول اولیه حرکت آب و آلاینده‌ها در لایه‌های خاک در قالب مبانی هیدروژئولوژی و حرکت آلودگی در خاک

از ضروریات اولیه در تعیین حریم بهداشتی چاه است. عامل و مکانیزم حرکتی مهمی که در حرکت آلاینده‌ها به طرف چاه در داخل ناحیه مشارکت نقش دارد، مکانیزم ادوکشن<sup>۹</sup> است که طبق تعریف همان حرکت آلاینده از یک نقطه به نقطه دیگر توسط جریان آب زیرزمینی است. عوامل شیمیایی، بیولوژیک و فیزیکی دیگری نیز در بقا یا مرگ آلاینده‌ها (مانند آلاینده‌های میکروبی) در داخل زمین نقش دارند. مکانیزمهای کند کننده و پالایند باعث کاهش حرکت آلاینده‌ها و مکانیزم پخش باعث افزایش سرعت حرکت آلاینده‌ها در داخل زمین می‌شود. آلاینده‌های آب زیرزمینی به دو دسته اساسی: آلاینده‌های شیمیایی (عناصر آلی و غیرآلی) و آلاینده‌های باکتریولوژیکی (میکروبا و ویروسها) تقسیم می‌شوند. از جمله آلاینده‌های شیمیایی غیرآلی که به دلیل عمر و قابلیت انحلال در آب زیرزمینی همواره مشکل سازتر از بقیه عناصر هستند، نترات، آمونیاک، سدیم و کلراید را می‌توان نام برد. به عنوان مثال آلودگی ناشی از نترات در اثر فاضلابها و فعالیتهای کشاورزی (کودهای شیمیایی) در سطح وسیعی از لایه‌های آبدار سطحی و غیر محصور می‌تواند اتفاق بیفتد. فلزات سنگین مانند جیوه، سرب، قلع، روی، آرسینگ و غیره، از شیرابه‌ها و فاضلابهای صنعتی و به همراه جریان آب زیرزمینی به سفره‌های آب زیرزمینی می‌توانند راه پیدا کنند. این عناصر مدت زمان طولانیتری نسبت به عناصر غیرسنگین (مانند نترات و نیتريت) می‌توانند در داخل آب زیرزمینی وجود داشته باشند. از طرفی عناصر سنگین قابلیت جذب به بافت خاکهای رسی را دارند و نسبت به عناصر آلی دارای قابلیت پالایشی بیشتری هستند. اگرچه پاره‌ای از عناصر آلی به صورت طبیعی در داخل زمین یافت می‌شوند، لکن آلودگی ناشی از عناصر آلی صنعتی به عنوان یک مشکل عمده در مقوله حفاظت از منابع آب زیرزمینی مطرح است. از جمله این آلاینده‌ها، شوینده‌ها، حشره‌کشها و هیدروکربنهای صنعتی (انواع تولیدات نفتی) را می‌توان نام برد. این عناصر از طرق مختلف مانند عکس العملهای شیمیایی، فعالیتهای میکروبیولوژیکی و غیره می‌توانند از آب زیرزمینی

حذف شده و یا کاهش غلظت یابند. لکن تعدادی از این عناصر به مدت طولانی در داخل خاک و آب زیرزمینی می‌توانند بقا داشته باشند. به عنوان مثال حشره کش DBCP در داخل آب زیرزمینی از ۵/۲۸ الی ۱۴۰ سال می‌تواند نصف عمر داشته باشد [۱۶].

برای قرنهای طولانی وجود و بقای میکرواورگانیزمهای پاتوزنی در آب زیرزمینی و حفاظت آب آشامیدنی استحصالی از این منابع، یکی از نگرانیهای اصلی بوده و هست. در لایه‌های خاک نیمه اشباع عمیق و در صورت وفور اکسیژن در این لایه‌ها، باکتریها می‌توانند برای مدت بیشتر از شش ماه نیز زنده بمانند. پاتوزنها در اثر عوامل فیزیکی (مانند دما) بیولوژیکی و شیمیایی می‌توانند در داخل خاک پس از مدتی از بین بروند. دماهای بالا، مقدار pH حدود ۷، اکسیژن کم و وجود مقادیر زیاد کربن آلی در خاک سرعت حذف باکتریهای پاتوزنی را افزایش می‌دهد [۱۶]. حذف عناصر میکروبیولوژیکی در خاک و آب زیرزمینی به نوع این عناصر بستگی دارد. به عنوان مثال باکتری کلی فرم پس از مدت کمتر از ۸ روز به میزان ۹۹/۹ درصد حذف می‌شود در صورتی که E.Coli به مدت زمان پنجاه روز نیاز دارد تا به همان میزان حذف شود [۱۷]. ویروسها در اعماق و فواصل افقی نسبتاً طولانی در زمین می‌توانند حرکت کنند. به عنوان مثال حرکت بعضی از ویروسها در عمق ۶۷ متری و حرکت افقی به طول ۴۰۸ متری توسط تعدادی از محققین گزارش شده است [۱۸]. مطالعات فراوانی روی عوامل تأثیرگذار در بقای ویروسها در آب زیرزمین انجام پذیرفته است. این مطالعات نشان می‌دهد که دما یکی از پارامترهای مهم در این ارتباط است. همچنین مطالعات نشان داده است که ویروسها در آب چاه دارای طول عمر بیشتری نسبت به آبهای سطحی هستند و ۱/۰ درصد Poliovirus، Hepatitisvirus، یا Enterovirus می‌تواند تا بیشتر از ۱۴۰ روز در آب زیرزمینی زنده بماند که این مدت بسیار طولانیتر از مدت زنده ماندن باکتری E.Coli است. در دمای زیر ۱۵۰ درجه سانتیگراد Poliovirus می‌تواند به مدت بیش از ۲۵۰ روز نیز زنده باشد [۱۹]. بر اساس یافته‌های محققان در کشورهای اروپایی توصیه

می‌شود که زمان تأخیر ۵۰ تا ۶۰ روز و هر جا که ممکن باشد تا یکسال برای حفاظت آب چاهها از ویروسها و باکتریهای پاتوزنی در نظر گرفته شود. به عنوان مثال زمان تأخیر ۵۰ روز به این معنی است که ۵۰ روز طول می‌کشد که ویروس رها شده در داخل زمین قبل از مردن، از یک نقطه در اطراف چاه به چاه برسد. ضمناً یک حداقل فاصله ۱۰۰ متر به صورت شعاعی در اطراف چاه به عنوان ناحیه حریم بهداشتی برای حفاظت از ویروسها و باکتریها توصیه شده است. این توصیه‌ها نتیجه مطالعات گسترده چندین ساله روی حرکت و بقای ویروسها و باکتریها در آبهای زیرزمینی است [۱۷].

### ۵- محاسبه حریم بهداشتی با روشهای شعاع ثابت

این روشها برای محاسبات اولیه حریم چاه به طور تقریبی و قبل از محاسبات حریم بار روشهای دقیقتر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در این روشها از معادلات ساده حرکت آب زیر زمینی به طرف چاه در یک مدت زمان انتقال مشخص استفاده می‌شود. در اینجا دو روش ساده به نامهای (۱) روش جریان حجمی FDER و (۲) روش معادله غیر تعادلی Theis به صورت مثالهایی از محاسبه حریم برای چاه آبرسانی شماره ۲۰ ارومیه ارائه می‌شود. جدول (۱) اطلاعات چاه و داده‌های هیدروژئولوژیک منطقه استقرار چاه را نشان می‌دهد. در روش FDER حجم استوانه‌ای از آب در اطراف قسمت مشبک چاه محاسبه و سپس شعاع استوانه که همان شعاع حریم چاه خواهد بود محاسبه می‌شود. معادلات مربوطه به صورت زیر است:

$$Q_t = n\pi Hr^2 \quad (1)$$

$$r = \sqrt{\frac{Q_t}{\pi nH}} \quad (2)$$

در این معادلات Q دبی پمپاژ چاه (متر مکعب در ساعت)، t مدت زمان انتقال (ساعت)، n درجه پوکی سفره آب زیرزمینی، H ارتفاع قسمت مشبک چاه (متر)، r شعاع استوانه یا شعاع حریم بهداشتی (متر)، و  $\pi = 3/14$  است. با استفاده از این روش شعاع حریم برای چاه شماره ۲۰ برابر با ۸۵۳/۷ متر محاسبه می‌شود. اگر مدت زمان انتقال یک سال و ارتفاع

جدول ۱- داده های مورد استفاده در محاسبه حریمهای بهداشتی چاههای آبرسانی شهر ارومیه

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۳۸	ضخامت سفره (m)	۱۳۰/۷	دبی پمپاژ چاه (ساعت/ m <sup>۳</sup> )
۲/۳۴۷۲	ضریب نفوذپذیری سفره (ساعت/ m)	۱۰	ارتفاع قسمت مشبک چاه (m)
۰/۰۰۴۹	گرادیان هیدرولیکی سفره	۰/۱	شعاع چاه (m)
۰/۰۴۶	سرعت جریان آب زیرزمینی (ساعت/ m)	۴۳۸۰۰	مدت زمان انتقال (ساعت)
۰/۰۱۵	افت سطح آب در اثر پمپاژ (m)	۰/۲۵	درجه پوکی سفره آب زیر زمینی
۲۴	مدت زمان رسیدن به حالت تعادل در آزمایش پمپاژ (ساعت)	۴۷/۵۶	ضریب قابلیت انتقال سفره (ساعت/ m <sup>۲</sup> )
		۰/۰۱۳۷	ضریب ذخیره سفره

## ۶- محاسبه حریم بهداشتی با روش اشکال متغیر ساده شده

در این روش اشکال متغیر ساده شده‌ای از حریم بهداشتی چاه با استفاده از دو معیار مرزهای جریان و زمان حرکت و با استفاده از مدل‌های محاسباتی ترسیم می‌شوند. فاصله مرز پایین دست شکل متغیر (حریم) تا چاه، با استفاده از مرز جریان آب زیرزمینی در اطراف چاه پمپاژ که همان مرز ناحیه مشارکت است (ZOC)، تعیین می‌شود. این کار با استفاده از معادله جریان آب زیرزمینی یکنواخت که توسط Todd [۲۱] ارائه شده است انجام می‌پذیرد. سپس با استفاده از معیار زمان حرکت فاصله مرز بالا دست حریم تا چاه تعیین می‌شود. پس از محاسبه مرزهای بالادست و پایین دست، حریم چاه مطابق جهت جریان آب زیرزمینی تنظیم و روی نقشه پیاده می‌شود. پارامترهای مورد نیاز در محاسبات این روش همان پارامترهای اساسی هیدروژئولوژیک و دبی پمپاژ چاه است. از محاسن این روش سادگی محاسبات و عدم نیاز به تخصص فنی بالا برای محاسبه و پیاده کردن حریم است. لکن از معایب آن دقت کم نتایج حاصله در مناطق دارای ناهمگنی زیاد شرایط هیدروژئولوژیک است. در این روش فاصله پایین دست چاه تا حریم بهداشتی

قسمت مشبک چاه به ۳۰ سانتی متر افزایش یابد، شعاع حریم به ۲۲۰ متر کاهش می‌یابد. در روش Theis [۲۰] داده‌های زمان - افت سطح آب توسط آزمایش پمپاژ برای چاه مورد نظر به دست آمده و سپس روی منحنی Theis ثبت و از روی آن ضریب قابلیت انتقال T و ضریب ذخیره S برای سفره آب زیرزمینی مورد نظر به دست می‌آید. معادلات استفاده شده عبارت‌اند از:

$$r = \sqrt{\frac{4uTt}{S}} \quad (۳)$$

$$w(u) = \frac{4\pi Ts}{S} \quad (۴)$$

در این معادلات r شعاع حریم بهداشتی چاه (متر)، t مدت زمان رسیدن به حالت تعادل در آزمایش پمپاژ (ساعت)، s افت سطح آب زیرزمینی در فاصله حداکثر شعاع تأثیر چاه، W(u) تابع چاه، u پارامتر بی بعد مربوط به تابع چاه که از جدول Theis برای W(u) مورد نظر استخراج می‌شود، و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شدند. با توجه به داده‌های جدول (۱) تابع چاه W(u) برای چاه شماره ۲۰ برابر با ۰/۰۶۸۶، پارامتر u برابر با ۱/۸۸۵ و در نهایت شعاع حریم چاه (r) برابر با ۷۹۲/۶ متر محاسبه می‌شود. این مقدار حریم با مقدار حریم محاسبه شده با روش FDER همخوانی دارد، گرچه هر دو روش به علت تقریبی بودن حریمهای نسبتاً بزرگی را برای چاه نتیجه می‌دهند.

( $x_1$ ) از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$x_1 = -\frac{Q}{2\pi k b i} \quad (5)$$

که در آن  $Q$  دبی پمپاژ چاه (متر مکعب در ساعت)،  $K$  ضریب نفوذپذیری سفره آبدار (متر بر ساعت)،  $b$  ضخامت سفره آبدار (در حالت سفره محصور) و یا ضخامت قسمت اشباع سفره آبدار (در حالت سفره غیرمحصور (متر) و  $i$  گرادیان هیدرولیکی سفره است. فاصله کناری حریم تا چاه در طرفین چاه ( $Y_L$ ) نیز از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$X_1 = \pm \frac{Q}{2k b i} \quad (6)$$

برای محاسبه فاصله بالادست چاه تا حریم بهداشتی (جهت جریان آب زیرزمینی از بالادست چاه به طرف چاه است) از معادله زیر که بر اساس معیار زمان حرکت تعریف شده است، استفاده می‌شود:

$$t_x = \frac{S}{V} \left[ \pm (r_x - r_w) + Z \ln \frac{(Z \pm r_w)}{(Z \pm r_x)} \right] \quad (7)$$

که  $Z$  عبارت است از:

$$Z = \frac{Q}{2\pi k b i} \quad (8)$$

برای محاسبه فاصله بالادست حریم تا چاه از علامت (+) معادله (7) استفاده می‌شود. در معادله (7)  $t_x$  زمان حرکت از نقطه  $x$  واقع در حریم بالادست چاه تا چاه (ساعت)،  $S$  ضریب ذخیره سفره،  $V$  سرعت جریان آب زیرزمینی (متر بر ساعت)،  $r_w$  شعاع چاه (متر) و  $r_x$  فاصله بالادست حریم تا چاه (متر) است. برای محاسبه  $t_x$  که با سعی و خطا انجام می‌پذیرد، ابتدا مدت زمان انتقال ( $t_x$ ) انتخاب شده و سپس مقدار آن از معادله (7) محاسبه می‌شود.

با استفاده از داده‌های جدول (1) حریم بهداشتی چاه شماره 20 ارومیه به روش فوق محاسبه شد که در شکل (2) نشان داده شده است. در این شکل مقادیر 47/6 متر، 256 متر، و 149/5 متر به ترتیب فاصله پایین دست چاه تا حریم بهداشتی ( $x_1$ )، فاصله بالا دست چاه تا حریم بهداشتی ( $r_x$ )، و فاصله کناری حریم بهداشتی ( $Y_L$  در طرفین) تا چاه است. در این محاسبات

مدت زمان انتقال 50 روز در نظر گرفته شده است. در شکل (2) حریم بهداشتی نسبت به جهت جریان آب زیرزمینی ترسیم شده است.

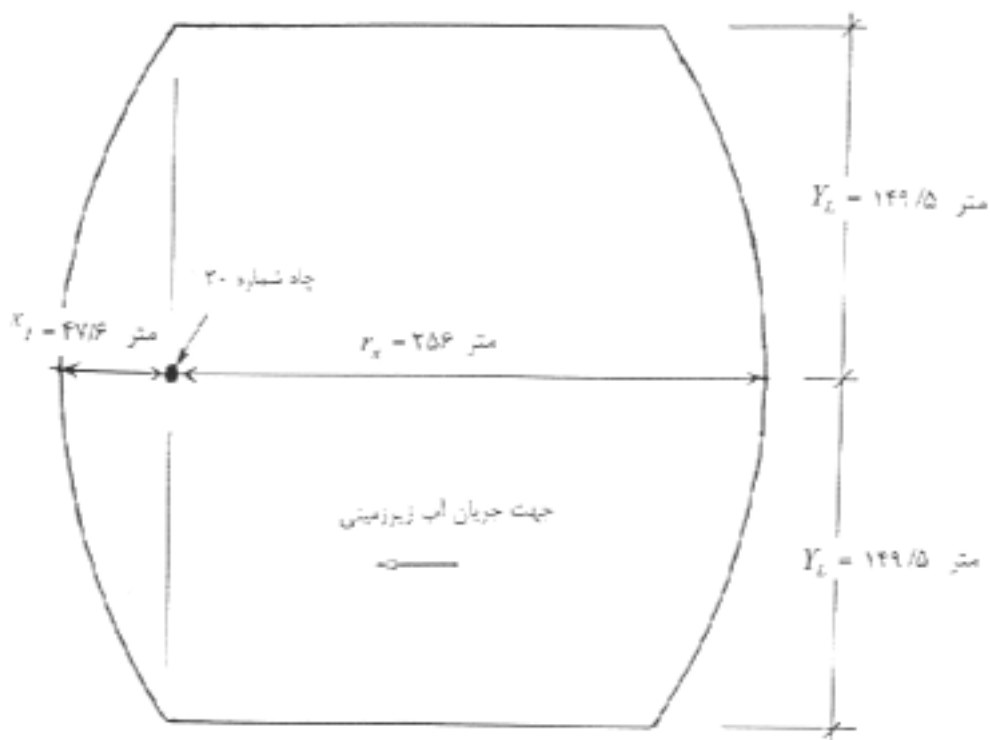
## 7- محاسبه حریم بهداشتی با روشهای محاسباتی جریان - انتقال

حریم بهداشتی چاه می‌تواند با استفاده از مدل‌های رایانه‌ای که با استفاده از روشهای محاسباتی معادلات جریان آب زیرزمینی و انتقال آلودگی را حل می‌کنند، تعیین شود. امروزه مدل‌های رایانه‌ای متنوعی در دسترس قرار دارند که برای تحلیل وضعیتهای هیدروژئولوژیکی که دارای شرایط مرزی پیچیده‌ای هستند بسیار مفیدند. داده‌های مورد نیاز در این مدل‌ها پارامترهای هیدروژئولوژیکی چون نفوذپذیری، درجه پوکی، ضریب ذخیره، ضخامت اشباع سفره، میزان تغذیه، ابعاد هندسی سفره آب زیرزمینی و موقعیت مرزهای هیدرولوژیک را شامل می‌شود. پارامترهای انتقال آلودگی مانند ضریب پخش و غیره نیز می‌توانند در بعضی از مدل‌ها مورد استفاده قرار گیرند. از محاسن این مدل‌ها، دقت بالای نتایج آنها و کاربرد آنها در انواع شرایط هیدروژئولوژیک پیچیده است. با استفاده از این مدل‌ها حساسیت پارامترهای هیدروژئولوژیک مختلف و تأثیرپذیری حریم تعیین شده به این پارامترها را می‌توان ارزیابی کرد. البته از طرفی هزینه‌های لازم برای تهیه داده‌های مورد نیاز برای مدل و هزینه تحلیلها را نیز شاید بتوان از معایب این روشها به شمار آورد.

در این قسمت از مطالعه از کد رایانه‌ای WHPA استفاده شده است [13]. سه نرم افزار یا مدول محاسباتی حریم بهداشتی در کد WHPA وجود دارد. این مدولها عبارت‌اند از مدول RESSQC، مدول MWCAP، و مدول GPTRAC. در جدول (2) ویژگیها و کارایی هر کدام از این مدولها به همراه شرایط مرزی در نظر گرفته شده و خصوصیات آبخوان، ارائه شده است [22]. در همه مدولها آبخوان دارای ضخامت یکنواختی بوده و می‌تواند محصور و یا نامحصور (آزاد) باشد. در مدول GPTRAC آبخوان نیمه محصور یا نشسته دار نیز

جدول ۲- تعریف و کارآیی مدولهای محاسباتی در کد WHPA

نام مدول	تعریف و کارآیی
RESSQC	حریمهای بهداشتی وابسته به زمان را در اطراف چاههای پمپاژ، و یا جبهه آلودگی را در اطراف چاههای جاذب، در سفره های آبدار همگن با گسترش سطحی نامحدود با جریان آب زیرزمینی یکنواخت پایدار مشخص می کند. تأثیر تداخل چاهها در نظر گرفته می شود.
MWCAP	حریمهای بهداشتی پایدار وابسته به زمان و یا نامتجانس را برای چاههای پمپاژ در سفره های همگن با جریان آب زیرزمینی پایدار و یکنواخت مشخص می کند. سفره آبدار می تواند گسترش سطحی نامحدود داشته و یا تأثیر مرزهای غیرقابل نفوذ و یا رودخانه می تواند مدل شود. این مرزها به صورت یک خط مستقیم به مدل تعریف می شوند. اگر چندین چاه در مسئله وجود داشته باشد تأثیر تداخل چاهها در نظر گرفته نمی شود.
GPTRAC	حریمهای بهداشتی وابسته به زمان را برای چاههای پمپاژ در سفره های آبدار همگن با جریان آب زیرزمینی پایدار و یکنواخت مدل می کند. سفره آبدار می تواند گسترش سطحی نامحدود داشته و یا توسط یک یا دو مرز موازی غیرقابل نفوذ و یا رودخانه محدود شده باشد. سفره آبدار می تواند محصور، محصور نشد دار و یا غیرمحصور با تغذیه سطحی باشد. تأثیر تداخل چاهها در نظر گرفته می شود.



شکل ۲- حریم بهداشتی محاسبه شده برای چاه آبرسانی شماره ۲۰ شهر ارومیه با استفاده از روش اشکال متغیر ساده شده



می‌تواند مدد شود؛ که در این صورت ضخامت و ضریب نفوذپذیری لایه محصورکننده به مدل تعریف می‌شود.

در کد رایانه‌ای WHPA سه نوع حریم بهداشتی می‌تواند محاسبه شود. این حریمها عبارت‌اند از: (۱) حریم بهداشتی پایدار، (۲) حریم بهداشتی وابسته به زمان و (۳) حریم بهداشتی نامتجانس. حریم بهداشتی پایدار ناحیه سطحی یا زیرسطحی در اطراف چاه است که در یک مدت زمان نامحدود از این ناحیه آب زیرزمینی داخل چاه تامین می‌شود. به دلیل نامحدود بودن زمان، یک انتهای این نوع حریم همواره باز خواهد بود؛ در حالی‌که در حریم بهداشتی وابسته به زمان، حریم برای یک زمان محدودی محاسبه شده و محدوده حریم یک سطح معینی دارد. به علت غیر عملی بودن استفاده از حریم پایدار، حریم نامتجانس که ترکیبی از حریم پایدار و حریم وابسته به زمان است، مورد استفاده قرار می‌گیرد و انتهای حریم نامتجانس با توجه به زمان انتقال در نظر گرفته شده، با یک منحنی بسته می‌شود. مساحت حریم وابسته به زمان عموماً کمتر از مساحت حریمهای پایدار و نامتجانس است [۱۳].

با استفاده از سه مدل فوق حریمهای بهداشتی برای چاههای آبرسانی ارومیه در شرایط مختلف محاسبه شدند [۲۲]. تعدادی از این نتایج در ادامه ارائه می‌شوند. در محاسبات از حریم بهداشتی وابسته به زمان به علت تطابق بیشتر با شرایط واقعی استفاده شده است. در یک مورد، با استفاده از مدل MWCAP نتایج حریمهای بهداشتی نامتجانس نیز ارائه شده است.

**۱-۷ محاسبه حریم بهداشتی برای چاه شماره ۲۰ ارومیه و جبهه آلودگی برای یک چاه فاضلاب فرضی با استفاده**

#### از مدل RESSQC

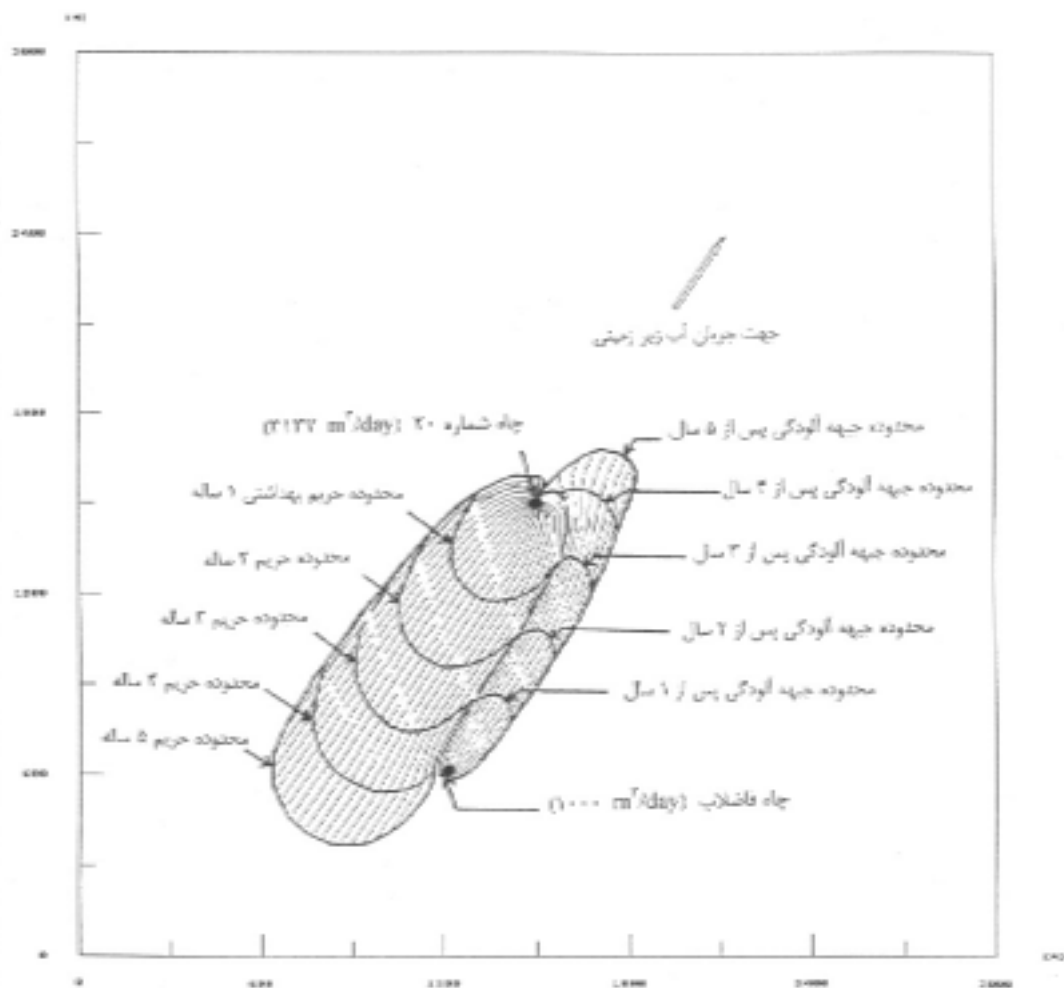
با استفاده از داده‌های جدول (۱) و سایر پارامترهای محیطی و هیدروژئولوژیک، حریم بهداشتی چاه آبرسانی شماره ۲۰ ارومیه برای مدت زمان انتقال ۱ الی ۵ سال با استفاده از مدل RESSQC محاسبه و در شکل (۳) نشان داده شده است. آبخوان همگن با ضخامت ثابت و گسترش سطحی نامحدود

است، جدول (۲). شکل (۳) محدوده جبهه آلودگی را برای یک چاه فاضلاب (یا چاه تغذیه) با دبی ورودی (یا دبی تغذیه) ۱۰۰۰ متر مکعب در روز و برای همان مدت زمانهای انتقال نیز نشان می‌دهد. با توجه به اشکال حریم و جبهه‌های آلودگی میتوان چنین نتیجه گرفت که: (۱) حریمهای بهداشتی و جبهه‌های آلودگی با افزایش مدت زمان انتقال بزرگتر می‌شوند، (۲) حریمها در جهت جریان آب زیر زمینی گسترش دارند، بدین معنی که محدوده حریم در جهت جریان آب زیر زمینی دارای طولی بیشتر از عرض حریم است، (۳) طول حریم نسبت به موقعیت چاه، در بالا دست جریان آب همواره بیشتر از پایین دست جریان آب است، (۴) جبهه آلودگی با افزایش زمان انتقال افزایش می‌یابد و سطح بیشتری آلوده می‌شود، و (۵) جهت افزایش جبهه آلودگی هم جهت با جریان آب زیر زمینی است. مطابق این شکل برای شرایط فرضی در نظر گرفته شده جبهه آلودگی بعد از مدت حدود ۴ سال به چاه می‌رسد. در این مثال چاه فاضلاب در نظر گرفته شده فرضی است و نشان دهنده شرایط واقعی نیست. چاه شماره ۲۰ بیش از چهار سال است که مورد بهره‌برداری قرار دارد و تا کنون آمار موجود وجود آلودگی را در این چاه نشان نمی‌دهد.

**۷-۲ محاسبه حریمهای بهداشتی برای ۳۶ چاه آبرسانی ارومیه با استفاده از مدلهای MWCAP، RESSQC، و GPTRAC**

#### ۷-۲-۱ نتایج مدل RESSQC

با استفاده از مدل RESSQC حریمهای بهداشتی برای ۳۶ چاه آبرسانی مستقر در شهر ارومیه برای مدت زمان انتقال ۵ سال محاسبه شدند [۲۲]. این حریمها در شکل (۴) با پنج خط جریان نشان داده شده‌اند. در این شکل شماره شناسایی چاهها و موقعیت میادین ولایت فقیه و انقلاب ارومیه نسبت به موقعیت چاهها نشان داده شده است. همچنین چاههای شماره ۱ الی ۸ واقع در حاشیه شمال غربی شکل، در منطقه ریحان آباد ارومیه واقع بوده و نباید با چاههای هم شماره در سایر نقاط شهر اشتباه شوند. محدوده محل استقرار چاهها ۱۰۰۰۰ متر در



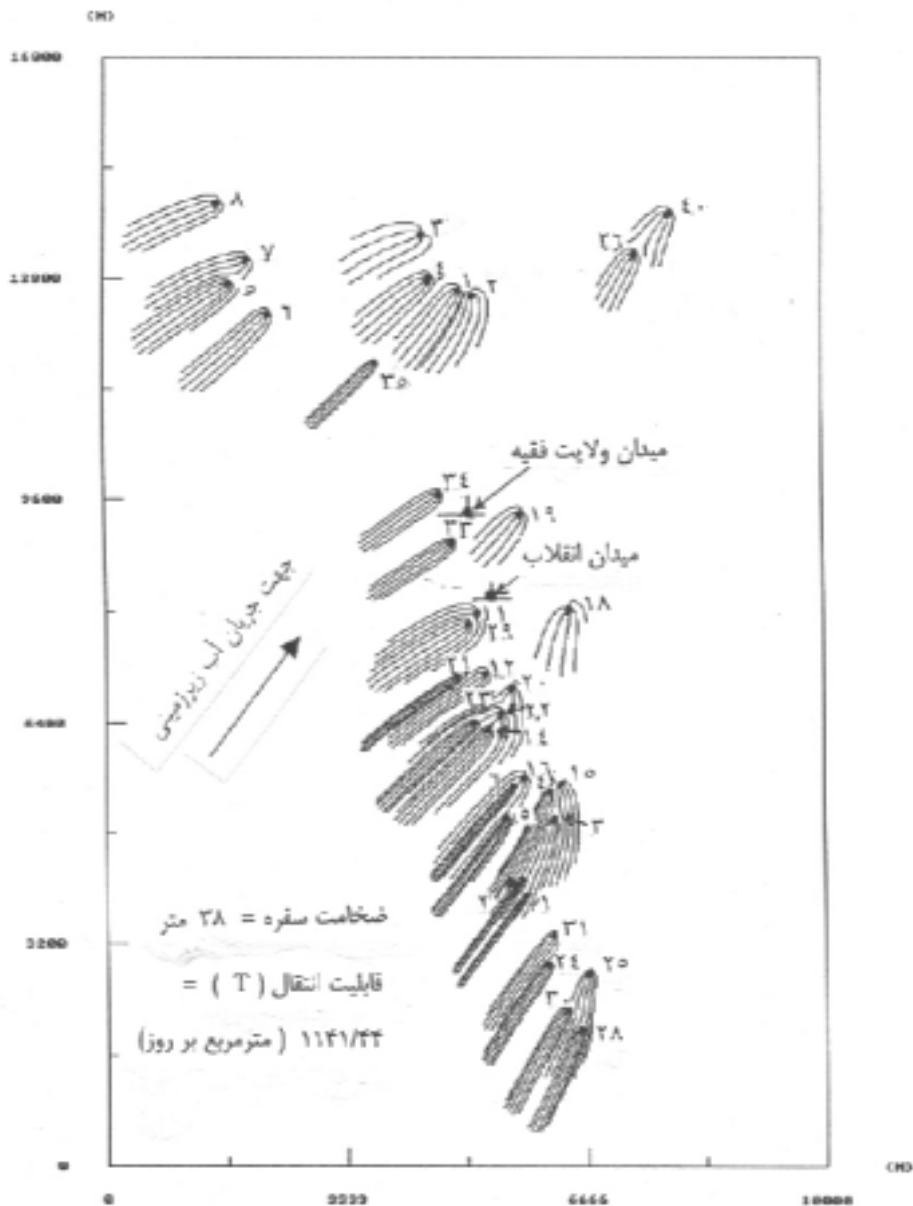
شکل ۳- حریمهای بهداشتی و جبهه‌های آلودگی محاسبه شده برای چاه آبرسانی شماره ۲۰ شهر ارومیه و یک چاه فاضلاب (تغذیه) با استفاده از مدول RESSQC از کد رایانه‌ای WHPA برای مدت زمان انتقال ۱ الی ۵ سال

چاهها در نظر گرفته نمی‌شود (جدول ۲). در این قسمت از محاسبات رودخانه شهر چای به صورت یک خط مستقیم و با موقعیت مکانی خود نسبت به چاهها و با امتداد مشخص، به همراه جهت جریان آب زیر زمینی به مدول تعریف می‌شوند. سایر داده‌های ورودی همانند داده‌های استفاده شده در مدول RESSQC است. شکل (۵) حریمهای بهداشتی محاسبه شده با مدول MWCAP را برای ۳۶ چاه آبرسانی ارومیه در دو حالت حریم بهداشتی وابسته به زمان (شکل ۵ - الف) و حریم بهداشتی نامتجانس (شکل ۵ - ب) نشان می‌دهد. مقایسه حریمهای محاسبه شده در شکل (۵ - الف) با حریمهای محاسبه شده توسط مدول RESSQC، شکل (۴) نشان می‌دهد

۱۶۰۰۰ متر است. مدول RESSQC اثر تداخل چاهها را در نظر می‌گیرد و مطابق شکل (۴) این اثر در شکل حریمهای بهداشتی چاههایی که نزدیک هم هستند (مانند چاههای شماره ۱۴، ۲۰، ۲۲ و ۲۳) دیده می‌شود و این چاهها در قسمتی دارای حریم مشترک‌اند. همچنان که از شکل (۴) مشهود است، عموماً حریمها در جهت جریان آب زیر زمینی گسترش دارند هر چند تعدادی از حریمها به علت اثر تداخل چاهها کاملاً هم جهت نیستند.

#### ۲-۲-۷ نتایج مدول MWCAP

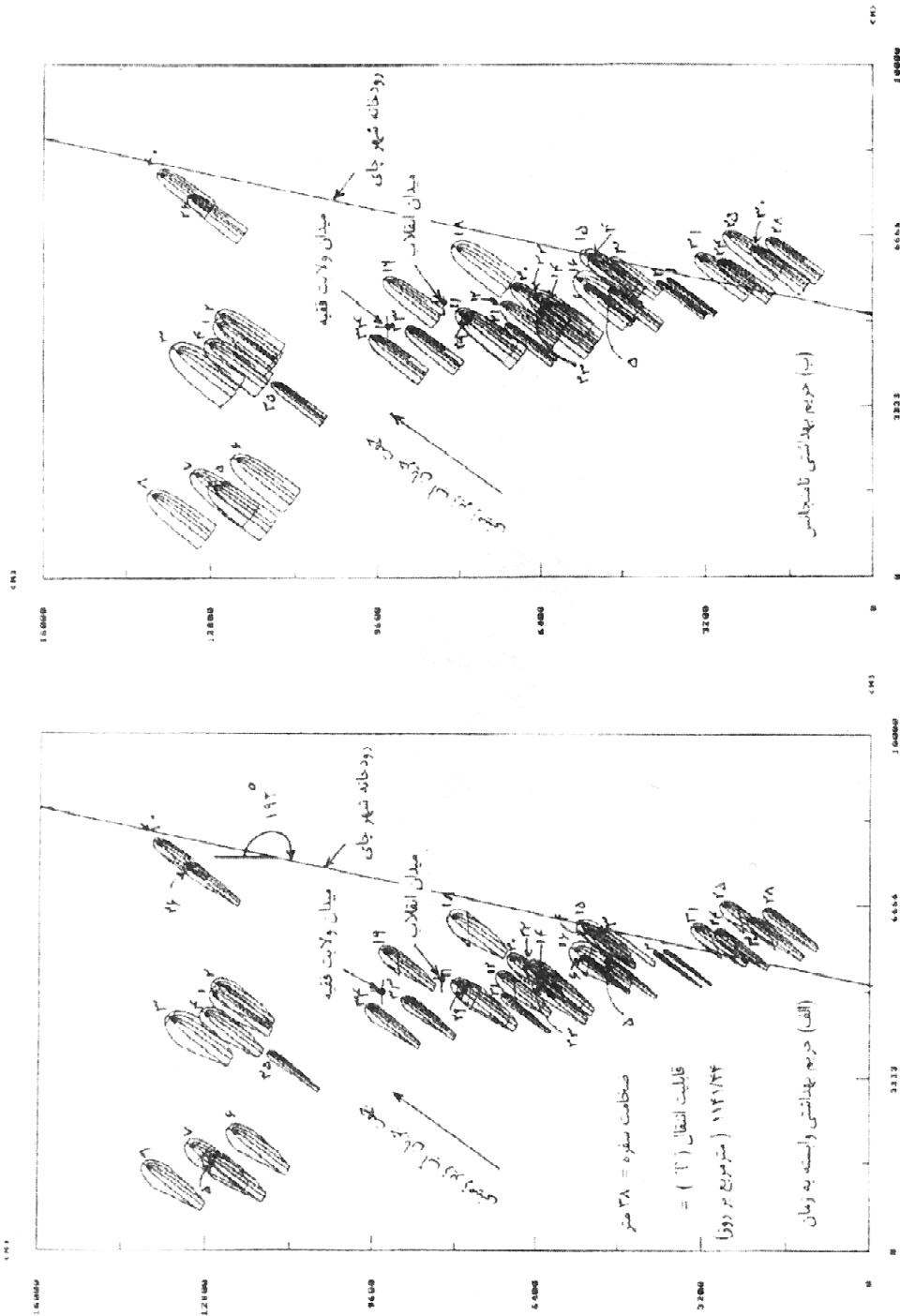
با این مدول اثر رودخانه در حریمهای بهداشتی، به عنوان یک مرز فیزیکی می‌تواند در نظر گرفته شود؛ لکن اثر تداخل



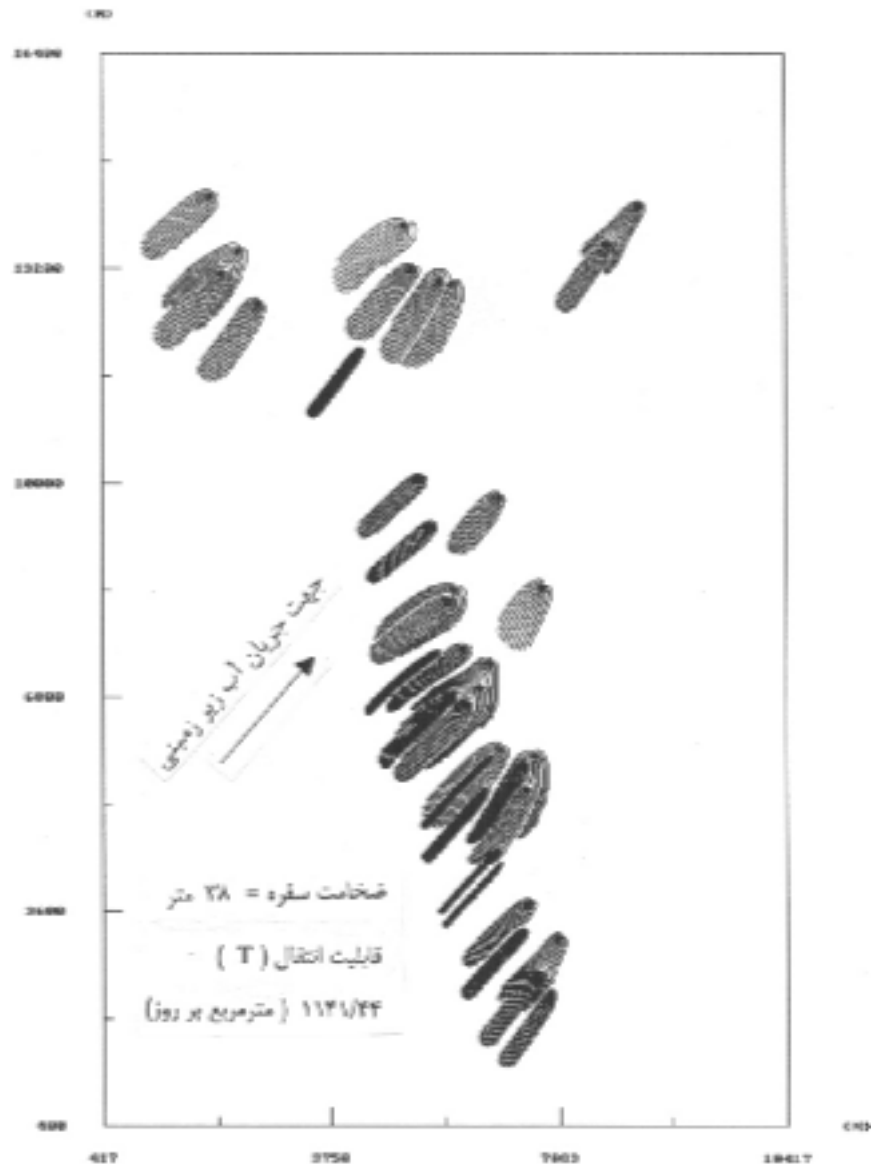
شکل ۴- حریمهای بهداشتی محاسبه شده برای ۳۶ چاه آبرسانی شهر ارومیه با استفاده از مدول RESSQC از کد رایانه‌ای WHPA برای مدت زمان انتقال ۵ سال

مساحت تقریبی حریمها در شکل (۴) (مدول RESSQC) و شکل (۵ - الف) می‌توان نتیجه گرفت که امتداد طولی حریمهای محاسبه شده توسط مدول RESSQC به مقدار کم از امتداد طولی حریمها در مدول MWCAP بیشتر و مساحت حریمها نیز مقداری بیشتر است. مطابق شکل (۵ - ب) حریمهای بهداشتی نامتجانس محاسبه شده، قسمتی از حریمهای

که در شکل (۴) امتداد حریمها لزوماً همگی در امتداد جهت عمومی جریان آب زیر زمینی نیستند. این تفاوت به دلیل اعمال تاثیر تداخل چاهها به علت نزدیکی به هم، در مدول RESSQC و عدم اعمال تاثیر در مدول MWCAP است. در مدول MWCAP محاسبات حریم بهداشتی هر چاه به طور مجرد و بدون تاثیر تداخل حریمهای بهداشتی، انجام می‌پذیرد. از مقایسه



شکل ۵- حریمهای بهداشتی محاسبه شده برای چاه آبرسانی شهر ارومیه با استفاده از مدل محاسباتی MWCAP با وجود مرز رودخانه و در دو حالت (الف) حریم وابسته به زمان، و (ب) حریم نامتجانس. مدت زمان انتقال ۵ سال می باشد.



شکل ۶ - حریمهای بهداشتی محاسبه شده برای ۳۶ چاه آبرسانی شهر ارومیه با استفاده از مدول محاسباتی GPTRAC، حالت سفره نیمه محصور نشت دار، با گسترش نامحدود و بدون مرز برای سفره. مدت زمان انتقال ۵ سال است.

در شکل (۵ - الف) کوچکتر از مجموع مساحت حریمهای بهداشتی همین چاهها در شکل (۴) است. همچنان که قبلا ذکر شد، مقداری از این تاثیر نیز در اثر تداخل حریم چاههاست، شکل (۴).

#### ۷-۲-۳- نتایج مدول GPTRAC

همچنان که قبلا ذکر شد، مدول GPTRAC حالت سفره نیمه محصور یا نشت دار را نیز می تواند مدل کند. حریمهای بهداشتی ۳۶ چاه آبرسانی ارومیه برای هر سه حالت سفره با

بدون انتهای از نوع پایدار بوده لکن در انتهای خود با توجه به زمان انتقال در نظر گرفته شده، با یک منحنی بسته شده اند. مساحت این حریمها (شکل ۵ - ب)، قدری بزرگتر از مساحت حریمهای وابسته به زمان هستند، شکل (۵ - الف).

در نتایج محاسبات مدول MWCAP در شکل (۵ - الف)، رودخانه شهر چای به علت اثر تغذیه ای آن، باعث کوچکتر شدن حریم بهداشتی چاههای همجوار شده است. برای مثال، مجموع مساحت حریمهای بهداشتی چاههای شماره ۳، ۴، و ۱۵

مدول GPTRAC محاسبه شدند [۲۲]. شکل و مساحت حریمهای محاسبه شده برای دو حالت سفره محصور و نامحصور به دلیل شرایط مرزی و هیدروژئولوژیک یکسان در نظر گرفته شده، شبیه حریمهای محاسبه شده توسط مدول RESSQC، شکل (۴) بودند و لذا اشکال مربوطه در اینجا نشان داده نشده‌اند [۲۲]. برای بررسی تاثیر یک لایه محصور کننده نشت دار در بالای سفره، روی شکل و مساحت حریمها، محاسبات با همان داده‌های استفاده شده در محاسبات قبلی و با در نظر گرفتن یک لایه محصور کننده فرضی به ضخامت ۱ متر و ضریب نفوذپذیری  $0.000864$  متر در روز، برای این ۳۶ چاه انجام پذیرفت. شکل (۶) حریمهای بهداشتی محاسبه شده را نشان می‌دهد. این حریمها با ده خط جریان نشان داده شده‌اند و برای وضوح بیشتر شماره چاهها در شکل قید نشده‌اند. مقایسه حریمها در دو حالت سفره محصور و سفره نیمه محصور نشت دار نشان داد که در حالت دوم حریمهای محاسبه شده از نظر مساحت مقداری کوچکتر از حالت اول هستند که به دلیل نشت از سفره از میان لایه محصور کننده نشت دار است. این امر موجب می‌شود مقداری از آب سفره تلف شده و میزان جریان آب ورودی به داخل چاه کاهش یابد. کاهش دبی ورودی به داخل چاه (یا دبی پمپاژ چاه) باعث کاهش مساحت حریم بهداشتی چاه می‌شود.

## ۸- خلاصه و نتیجه گیری

در این مطالعه حریم بهداشتی برای کنترل کیفی چاههای آب شرب در شهرها تعریف و سپس پنج معیار و پنج روش مختلف برای محاسبه حریم بهداشتی معرفی شدند. نقش مکانیزمهای حرکتی و آلاینده‌های میکروبی و شیمیایی در حریم بهداشتی چاه به طور اجمال بحث شد. سپس با استفاده از دو

## واژه نامه

روش شعاع ثابت FDER و شعاع ثابت Theis، و روش اشکال متغیر ساده شده، حریمهای بهداشتی برای چاه آبرسانی شماره ۲۰ ارومیه محاسبه شده و نتایج حاصله مورد بحث قرار گرفت. در قسمت دیگر مطالعه کد رایانه‌ای WHPA و مدولهای محاسباتی مربوطه به عنوان یک روش محاسباتی برای تعیین حریم بهداشتی معرفی شدند. سپس نتایج محاسبات حریم بهداشتی با مدول محاسباتی RESSQC، از کد WHPA، برای چاه شماره ۲۰ ارومیه به همراه جبهه آلودگی برای یک چاه فاضلاب فرضی در حوالی چاه شماره ۲۰ ارائه شد. در ادامه با استفاده از سه مدول محاسباتی RESSQC، MWCAP، و GPTRAC، حریمهای بهداشتی برای ۳۶ چاه آبرسانی ارومیه برای شرایط محیطی و هیدروژئولوژیک در نظر گرفته شده تعیین شد. اثر تداخل حریم چاههای همجوار، تاثیر رودخانه شهرچای، و تاثیر یک لایه محصور کننده نشت دار فرضی، در شکل حریمهای بهداشتی محاسبه شده مورد بحث قرار گرفت. در صورت فراهم بودن اطلاعات قابل اعتماد هیدروژئولوژیک در منطقه استقرار چاهها، روشهای محاسباتی و کد WHPA نتایج دقیقتری را برای حریمهای بهداشتی چاهها ارائه می‌دهند. این حریمها نسبت به حریمهای محاسبه شده با روشهای ساده‌تر مانند روش شعاع ثابت، کوچکتر و در نتیجه اقتصادیتر خواهند بود.

## تشکر و قدردانی

مولف از مسئولین محترم سازمان مدیریت و برنامه ریزی و شرکت آب و فاضلاب استان آذربایجانغربی که در طول این مطالعه مشوق و پشتیبان بوده‌اند تشکر و قدردانی می‌کند.

1. Blanford and Huyakon
2. capture zone
3. zone of contribution (ZOC)
4. wellhead protection area, WHPA

5. zone of influence (ZOI)
6. cone of depression
7. zone of transport (ZOT)

8. capacity of the aquifer to assimilate contaminants
9. advection

1. US EPA, "Literature Review of Methods for Delineating Wellhead Protection Areas," Report No EPA 816-R-98-021, 1998.
2. Livingstone, S., Franz, T., and Guiger, N., "Managing Groundwater Resources Using Wellhead Protection," *Geoscience Canada*, Vol. 22, No. 4, pp. 121-128, 1995.
3. US EPA, "Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas," Report No. EPA-440/5-93-001, 1987, 1993.
4. Ginsberg, M., "Applicability of Wellhead Protection Area Delineation to Domestic Wells: A case study," EPA-813-B95-007, 13 pp, 1995.
5. Heath, Douglas, L., "Delineation of a Refined Wellhead Protection Area for Bedrock Public Supply Wells," Charlestown, Rhode Island. USEPA, 1995.
6. Waterloo Hydrogeologic Inc., "Delineation of Wellfield Capture Zones Within the Waterloo Moraine (Technical Reference for Capture Zone Modeling)," Report by Waterloo Hydrogeologic Inc., Waterloo, Canada, 2000.
7. Rifai, H. S., Hendricks, L. A., Kilborn, K., and Bedient, P. B. "GIS User Interface for Delineating Wellhead Protection Areas," *Groundwater*. Vol. 31, No. 3, pp. 480-488, 1993.
8. Cole, B. E., "Impact of Hydraulic Conductivity Uncertainty on Capture Zone Delineation (Wellhead Protection, Contaminant Transport)," University of Notre Dame. UMI, Doctoral Sabstracts International, Vol. 56-07B, 185 pp, 1996.
9. Wuolo, R. W., Dahlstrom, D. J., and Fairbrother, M. D., "Wellhead Protection Area Delineation Using the Analytic Element Method of Groundwater Modeling," *Groundwater*, Vol. 33, No. 1, pp. 71-83, 1995.
10. USEPA, "Numerical Codes for Delineating Wellhead Protection Areas in Agricultural Regions Based on the Assimilative Capacity Criterion," EPA Report /600/R-92-223, 1997.
11. Paillet, F. L., and Pedler, W. H., "Integrated Borehole Logging Methods for Wellhead Protection," The 1993 36<sup>th</sup> Annual Meeting of the Association of Engineering Geologists, San Antonio, TX. Engineering Geologists, Vol. 42, No. 2-3, pp. 155-165, 1996.
12. Ontario Ministry of the Environment, "PROTOCOL for Delineation of Wellhead Protection Areas for Municipal Groundwater Supply Wells Under Direct Influence of Surface Water, Report No. PIBS 4168e, Ontario Ministry of the Environment, Canada, 2001.
13. Blandford, T.N., and Huyakon, P. S., "WHPA, A Modular Semi – Analytical Model for the Delineation of Wellhead Protection Areas," HydroGeologic Incorporation, Herndon, VA 22070, US EPA, USA, 1991.
14. Moore, B. A., "Case Studies in Wellhead Protection Area Delineation and Monitoring," USEPA Report 600/R-93/107, 1993.
15. Office of Groundwater Protection, US EPA, "Safe Drinking Water Act (SDWA)," Washington, D.C, 1986.
16. Gebra, C. P., Yates, M. V., and Yates, S. R., "Quantitation of Factors Controlling Viral and Bacterial Transport in the Subsurface, In Modelling the Environmental Fate of Microorganisms, 77-87, ed. C.J. Hurst. Washington, D.C.: American Society of Microbiology, 1991.
17. Matthes, G, Foster, S.S.D., and Skinner, A.C., "Theoretical Background, Hydrogeology and Practice of Groundwater Protection Zones. "International Contributions to Hydrogeology," Vol. 6. UNESCO – IUGS, International Association of Hydrogeologists, Heise, Hannover, West Germany, 1985.
18. Kewick, B.H., and C. P. Gerba, "Viruses in Groundwater, Environmental science and Technology," Vol. 14, PP: 1240 – 1297, 1980.
19. Matthes, G., and Pekdeger, A., "Survival and Transport of Pathogenic Bacteria and Viruses in Groundwater ." Geological – Paleontological Institute of Kiel University, Kiel, Federal Republic of Germany, 1981.
20. Theis, C.V., "The Relation Between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate of Duration of a Well Using Ground Water Storage," American Geophysical Union Transaction, Vol. 16, pp. 519-524, 1935.
21. Todd, D.K., *Ground Water Hydrology*. John Wiley and Sons, Inc, 1980.
۲۲. بدو، ک. "تحقیق در وضعیت منابع آب زیر زمینی مورد استفاده جهت آب شرب شهری و منابع آلاینده در شهر ارومیه با تاکید بر تعیین حریم بهداشتی برای چاههای آب شرب،" گزارش پژوهشی، سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان آذربایجان غربی، دو جلد، ۲۳۴ صفحه، ۱۳۸۱.