

Design of the Optimal Groundwater Quality Monitoring Well Network Using MODFLOW and MT3D Models

S. Janatrostami^{1*}, A. Salahi², and F. Yousefi³

Abstract

A properly monitoring well network can provide quantity and quality data needed to make informed decision making about the state of the environment. The selection of the optimum number of monitoring wells and their spatial distribution is a major challenge for the hydrogeologist. On the other hand, improper distribution of monitoring wells or an insufficient number of them does not properly represent the state of the environment. In this study, the current monitoring network in the study area was evaluated according to the simulation results of MODFLOW and MT3D models. Then, the monitoring network was designed based on the wells in the area with the optimization method developed in this study. The optimization model consists of two objective functions to maximize the Nash Sutcliffe coefficient and to minimize the costs simultaneously, which was defined as one target function by applying the weighting factor W. Genetic algorithm was used to solve the optimization model. The results showed that the finding of the optimal value depends on the value of the weight coefficient (W). Therefore, the best value of W is selected according to an acceptable trade-off between cost and spatial distribution of wells in the area. To choose the best solution, PBIAS, RMSE, and regression coefficients were used in which their values were acceptable in this study. Also, the higher the average optimal TDS values than the average observed TDS values indicated that the optimal network could provide groundwater quality data for more polluted areas. The method presented in this study for other pollutants should be evaluated and validated.

Keywords: Genetic Algorithm, Optimization, MODFLOW, MT3D.

Received: April 15, 2021

Accepted: February 8, 2022

طراحی شبکه بهینه چاه‌های پایش کیفی آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های MODFLOW و MT3D

سمیه جنت‌رستمی^{۱*}، علی صلاحی^۲ و فاطمه یوسفی^۳

چکیده

یک شبکه چاه‌های پایش مناسب می‌تواند داده‌های کمی و کیفی ارزشمندی برای تصمیم‌گیری آگاهانه در مورد وضعیت محیط‌زیست فراهم کند. انتخاب تعداد بهینه چاه‌های پایش و توزیع مکانی آن‌ها بزرگترین چالش هیدروژئولوژیست‌ها است. از سوی دیگر، توزیع نامناسب چاه‌های پایش با تعداد ناکافی آن‌ها به درستی وضعیت زیست‌محیطی منطقه را نشان نمی‌دهد. در این مطالعه شبکه پایش فعلی در منطقه مورد مطالعه با توجه به نتایج شبیه‌سازی مدل‌های MODFLOW و MT3D ارزیابی شد و سپس در ادامه شبکه پایش با توجه به چاه‌های موجود در منطقه با روش بهینه‌سازی توسعه‌یافته در این مطالعه طراحی شد. مدل بهینه‌سازی شامل دو تابع هدف حداکثر کردن ضریب نش- ساتکلیف و حداقل کردن هزینه‌ها به طور همزمان است که با اعمال ضریب وزنی W به صورت یک تابع هدف تعریف شد. از الگوریتم ژنتیک برای حل مدل بهینه‌سازی استفاده شد. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که انتخاب جواب بهینه وابستگی زیادی به مقدار ضریب وزنی W دارد. بنابراین بهترین مقدار W با توجه به برقراری یک رابطه قابل قبول بین هزینه و پراکنش مکانی چاه‌ها در منطقه انتخاب می‌شود. در ادامه برای انتخاب بهترین جواب از شاخص‌های RMSE، PBIAS و ضریب رگرسیون نیز استفاده شد که مقادیر این شاخص‌ها در این مطالعه قابل قبول بوده است. همچنین، بزرگ‌تر بودن میانگین مقادیر TDS بهینه از میانگین مقادیر TDS مشاهده‌ای نشان می‌دهد که شبکه بهینه، داده‌های کیفی آب زیرزمینی مناطق آلوده‌تر را فراهم می‌کند. روش ارائه شده در این مطالعه برای سایر آلاینده‌ها باید مورد ارزیابی و صحت‌سنجی قرار گیرد.

کلمات کلیدی: الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، MODFLOW، MT3D.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۹

1- Assistant Professor, Department of Water Engineering, College of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. Email: janatrostami@guilan.ac.ir

2- M.Sc. Graduate of Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, College of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. Email: ali.salahi.1997@gmail.com

3- M.Sc. Graduate of Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, College of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. Email: shamim.yousefi93@gmail.com

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1400.17.4.11.8](https://doi.org/10.17352/347.1400.17.4.11.8)

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۱ امکان‌پذیر است.



Jin et al. (2014), Bashi-Azghadi and Kerachian (2010) و Luo et al. (2016) به منظور شناسایی منابع آلودگی و Wu et al. (2005), Mogheir et al. (2009), Baalousha (2010), Dhar and Datta (2010), Guo et al. (2011), Barca et al. (2018) و Mclean et al. (2019) با هدف کاهش فراوانی چاه‌ها و حداقل کردن هزینه، بهینه‌سازی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی را انجام دادند. روش‌های مورد استفاده در این مطالعات متفاوت است، اما اکثر آن‌ها بر اساس جستجوی غیرخطی و روش‌های بهینه‌سازی به همراه روش‌های زمین‌آماري (Chadalavada and Datta, 2008; Mclean et al., 2019)، مدل‌سازی انتقال جریان (Bashi-Azghadi and Kerachian, 2010; Luo et al., 2016) یا نقشه آسیب‌پذیری آبخوان (Baalousha, 2010) بوده است. برای تهیه شبکه چاه‌های پایش کارآمدتر، رتبه‌بندی چاه‌های نمونه‌برداری با استفاده از ارزیابی مقادیر مشاهدات اندازه‌گیری شده در هر چاه و بررسی تراکم چاه‌ها در منطقه بدست می‌آید و در ادامه، چاه‌هایی که دارای ارزش کمی هستند یا اینکه با توجه به تعداد چاه‌های منطقه، اضافی هستند از شبکه چاه‌های نمونه‌برداری حذف می‌شوند (Fisher, 2013).

همانطور که ذکر شد، بهینه‌سازی طراحی شبکه پایش با استفاده از روش‌های متفاوتی امکان‌پذیر است. برای انتخاب یک روش مناسب، معیارهای زیادی وجود دارد که مهمترین آن‌ها عملکرد منطقه و میزان و نوع داده‌های موجود است. با توجه به بررسی مطالعات گذشته، یکی از روش‌های طراحی شبکه پایش استفاده از روش مدل‌سازی جریان و انتقال املاح است. در این روش، داده‌های تراز سطح آب زیرزمینی و کیفیت آب زیرزمینی با شناسایی سیستم هیدروژئولوژیکی و روند پخش آلودگی آبخوان جمع‌آوری می‌شود (Bashi-Azghadi and Kerachian, 2010). در این راستا، Wu et al. (2005) با هدف کاهش هزینه‌های نمونه‌برداری در پایش کیفی آب زیرزمینی، حذف نمونه‌های غیرضروری را پیشنهاد کردند. آن‌ها برای رسیدن به این هدف، از مدل‌های شبیه‌سازی-بهینه‌سازی استفاده کردند، که مدل‌های MODFLOW و MT3DMS برای شبیه‌سازی جریان و کیفیت آب زیرزمینی و الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی شبکه پایش مورد استفاده قرار گرفت. Bashi-Azghadi and Kerachian (2010) به منظور شناسایی جریان آب زیرزمینی و رفتار کیفی آبخوان در بهینه‌سازی شبکه پایش کیفی آبخوان از مدل‌های MODFLOW و MT3D استفاده کردند. Khader and Mckee, 2014 با شبیه‌سازی جریان و کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از MODFLOW و MT3DMS، از روش ماشین بردار رابط (RVM) شبکه پایش

برنامه‌ریزی و مدیریت سیستم‌های آب زیرزمینی مستلزم پایش مناسب خصوصیات کمی و کیفی آب زیرزمینی است. داده‌ها و اطلاعات مشاهده‌ای به‌دست آمده از این نوع پایش معمولاً با استفاده از شبکه چاه‌های پایش جمع‌آوری می‌شوند که شامل مجموعه‌ای از چاه‌های مشاهده‌ای هستند که به صورت تقریباً تصادفی در منطقه توزیع شده‌اند. تعداد و توزیع مکانی چاه‌های مشاهده‌ای در یک شبکه پایش از پارامترهای مهمی هستند که بر نتایج مطالعات کیفی آب‌های زیرزمینی تأثیرگذار هستند (Ayvaz and Elci, 2018) و پایش کیفی آب زیرزمینی یک گام اساسی در شناسایی و توصیف سیستم‌های آب زیرزمینی است. در طراحی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی، توزیع زمانی و مکانی نمونه‌برداری کیفی برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب‌های زیرزمینی تعریف می‌شود.

به طور کلی شبکه‌های پایش در سه گروه پایش زمینه، پایش سازگاری و پایش منابع آلودگی غیرنقطه‌ای طبقه‌بندی می‌شوند. پایش زمینه با هدف شناسایی کیفی آب زیرزمینی بدون دخالت انسان انجام می‌شود و پایش سازگاری در واقع همان پایش مکان‌های آلوده شده است که با هدف شناسایی وسعت آلودگی در اطراف محل آلوده شده انجام می‌شود (Baalousha, 2010). با توجه به اینکه، پایش کیفی آب‌های زیرزمینی شامل حضور در محل نمونه‌برداری، جمع‌آوری نمونه‌های آب زیرزمینی، انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه و انجام تجزیه و تحلیل در آزمایشگاه، فرآیند پرهزینه‌ای است، تعیین تعداد بهینه چاه‌ها در شبکه پایش به طوری که هزینه پایش حداقل گردد، ضروری است. شبکه پایش بهینه، مجموعه‌ای از داده‌های کیفی آب زیرزمینی را فراهم می‌کند که با استفاده از کمترین تعداد چاه نمونه‌برداری، معرف نسبتاً کاملی از سیستم آب زیرزمینی منطقه خواهد بود. بهترین طراحی شبکه پایش به عوامل متعددی از قبیل تعیین اهداف پایش، موقعیت چاه‌های موجود در منطقه، تعیین وضعیت چاه برای نمونه‌برداری از لحاظ تعداد و عمق اسکرین چاه‌ها، در دسترس بودن چاه‌ها، فاصله بین چاه‌ها، تعداد نمونه‌های مورد نیاز، زمان، امکانات مالی، اندازه شبکه پایش و هرگونه الزامات قانونی در طراحی بستگی دارد (Ayvaz and Elci, 2018). شبکه پایش می‌تواند از طریق طراحی یک شبکه جدید یا با اصلاح شبکه موجود بهینه شود، بنابراین با افزایش یا کاهش تعداد چاه‌های نمونه‌برداری، هزینه پایش افزایش یا کاهش می‌یابد. طراحی بهینه شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی با اهداف مختلفی انجام می‌شود، به عنوان مثال، Wilson et al. (1992)، Kim and Lee (2007)، Khader and Mckee, Chadalavada and Datta (2008) و Datta et al. (2009) برای شناخت توزیع پلوم‌های آلودگی،

موجود را بهینه کردند. Luo et al. (2016) نیز در بهینه‌سازی شبکه پایش کیفی آبخوان، به منظور شناسایی کیفیت آب زیرزمینی و روند آن در آبخوان از مدل‌های شبیه‌سازی MODFLOW و MT3DMS استفاده کردند.

۳۱۵۰ متر و پست‌ترین نقطه برابر ۲۶- متر می‌باشد. متوسط ارتفاع در بخش ارتفاعات برابر ۱۰۸/۳۶ متر و در بخش دشت برابر ۱۱/۶ متر نسبت به دریای آزاد می‌باشد.

به دلیل نقش قابل توجه رودخانه زرجوب در کیفیت آب زیرزمینی، بخش شرقی آبخوان فومنات با ۶۰۷/۸ کیلومترمربع که رودخانه زرجوب در آن واقع شده است، به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد (شکل ۱). رودخانه زرجوب از کوه‌های رضالو با ارتفاع ۶۳۰ متر و میان‌خاله با ارتفاع ۶۹۰ متر سرچشمه می‌گیرد. این رودخانه قبل از رسیدن به شهر رشت، سیاه‌رود و در حین عبور از این شهر، زرجوب نامیده می‌شود. در انتهای شهر رشت، رودخانه گوهررود (رود لاکان) به رودخانه زرجوب می‌پیوندد و رودخانه پیربازار را تشکیل می‌دهند که در نهایت به تالاب انزلی می‌ریزد. در حال حاضر رودخانه زرجوب مجموعه‌ای از آلودگی‌های ناشی از فاضلاب کشاورزی، صنعتی و شهری را به همراه خود وارد تالاب انزلی می‌کند که توسعه صنعت، شهرنشینی افزایش جمعیت، در کمیت و کیفیت آلودگی‌های منابع طبیعی نقشی اساسی داشته است (Ghodrati et al., 2007).

با توجه به اینکه یکی از اهداف اصلی این مطالعه تهیه مدل شبیه‌سازی جریان و انتقال آب زیرزمینی است و کیفیت آب رودخانه زرجوب بر روی کیفیت آب زیرزمینی مجاور آن تأثیر زیادی دارد، ۳ چاه نمونه‌برداری در اطراف رودخانه به دلیل پراکنش کم چاه‌های نمونه‌برداری در این مناطق اضافه گردید. موقعیت چاه‌های جدید اضافه شده در شکل ۲ نشان داده شده است. کیفیت آب در این نقاط در ماه‌های مختلف سال آبی ۹۶-۱۳۹۵ اندازه‌گیری شد. مشخصات منطقه مورد مطالعه از لحاظ مساحت، تعداد چاه‌های بهره‌برداری، تعداد چاه‌های مشاهده‌ای و همچنین تعداد چاه‌های مشاهده‌ای برای اندازه‌گیری خصوصیات کیفی در مقایسه با کل آبخوان دشت فومنات در جدول ۱ آورده شده است. شایان ذکر است که مقادیر اندازه‌گیری شده کیفیت آب زیرزمینی در سایر چاه‌های پایش موجود در منطقه نیز از طریق سازمان آب منطقه‌ای استان گیلان در دسترس قرار گرفت و با توجه به اینکه هدف این مطالعه ارزیابی کیفی است منظور از چاه‌های مشاهده‌ای، چاه‌هایی است که برای اندازه‌گیری پارامترهای کیفی نمونه‌برداری می‌شود.

منابع آب‌های زیرزمینی استان گیلان به دلیل بالابودن سطح آب زیرزمینی و ارتباط نزدیک آب سطحی با آب زیرزمینی نسبت به مناطق دیگر، بیشتر در معرض آلودگی هستند. در این میان، رودخانه زرجوب به عنوان یکی از آلوده‌ترین رودخانه‌های استان در محدوده مطالعاتی فومنات قرار گرفته است که به دلیل مجاورت با آب زیرزمینی سبب تغییر کیفیت آب زیرزمینی اطراف این رودخانه می‌شود. بنابراین، وجود یک شبکه پایش مناسب برای پایش مداوم کیفی آب زیرزمینی در این منطقه ضروری است. با توجه به مطالب ذکر شده، در این مطالعه شبکه پایش فعلی کیفیت آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل شبیه‌سازی جریان و انتقال آب زیرزمینی MODFLOW و MT3D مورد ارزیابی می‌گیرد و مناطقی که از نظر کیفی دارای تغییرات زیادی در زمان و مکان هستند نیز شناسایی می‌شود. در ادامه، با استفاده از روش بهینه‌سازی شبکه پایش کیفی و با حذف برخی از چاه‌های قبلی و اضافه نمودن چاه‌های جدید، شبکه پایش دوباره طراحی می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی فومنات در شمال ایران و در استان گیلان قرار دارد (شکل ۱). این محدوده از شمال به تالاب انزلی و دریای خزر، از شرق به محدوده مطالعاتی آستانه-کوچصفهان، از جنوب و غرب از طریق خط الرأس ارتفاعات تالش با محدوده‌های مطالعاتی طارم-خلخال و تالش مجاورت پیدا می‌کند. رودخانه چافرود در شمال غربی‌ترین حد محدوده و رودخانه پیربازار در جنوبی‌ترین بخش محدوده قرار دارند. با توجه به گزارشات آب منطقه‌ای استان گیلان، وسعت محدوده مطالعاتی فومنات برابر ۳۸۲۸/۸ کیلومتر مربع است که ۲۰۲۷/۳ کیلومتر مربع (۵۳ درصد) آن را دشت و ۱۸۰۱/۵ کیلومتر مربع (۴۷ درصد) ارتفاعات تشکیل می‌دهند. ارتفاع بلندترین نقطه محدوده برابر

Table 1- Features of the study area

جدول ۱- مشخصات منطقه مورد مطالعه

Parameter	Fumanat Aquifer	Case Study areas
Area (Km ²)	2027.3	607.8
Total number of pumping wells	17270	5352
Number of observation wells	71	25
Number of qualitative observation wells	45	17

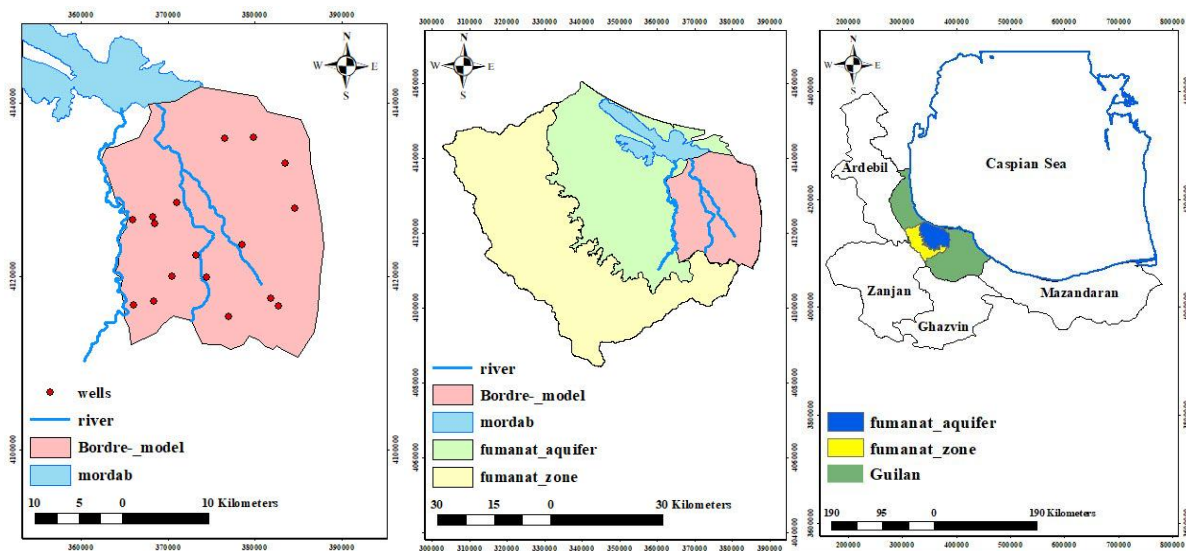


Fig. 1- Geographical location of the study area

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

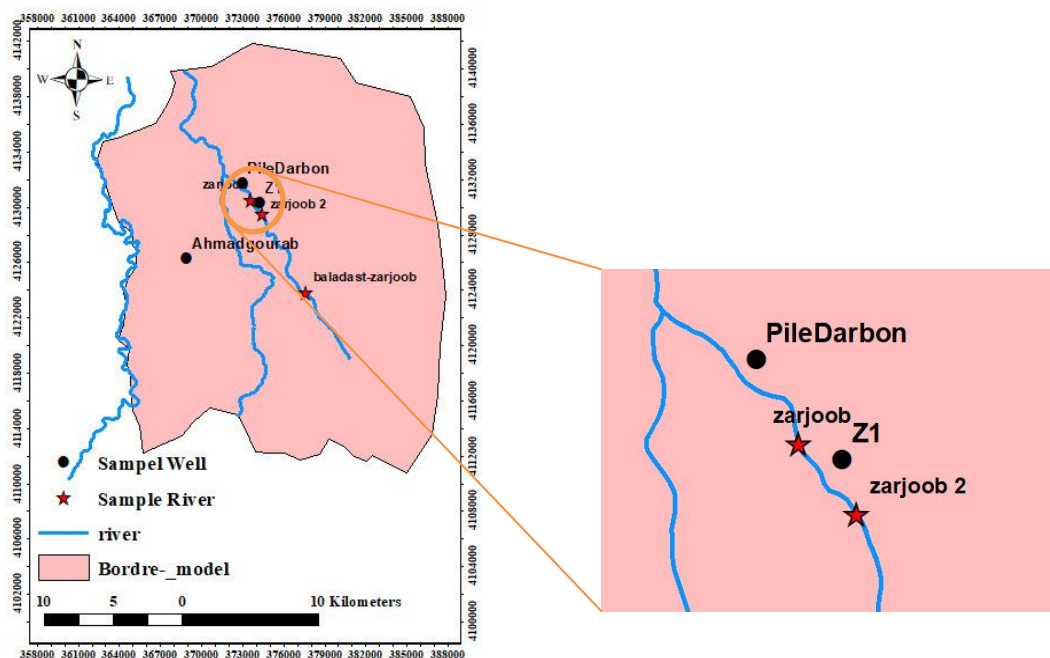


Fig. 2- Location of the sampling points

شکل ۲- موقعیت نقاط نمونه برداری شده

تعیین غلظت نقاط پتانسیل در پایگاه داده از مدل سازی جریان و انتقال آب زیرزمینی MODFLOW و MT3D استفاده می شود. پس از ایجاد پایگاه داده و تعیین مقادیر TDS در همه نقاط پتانسیل، با توجه به اهداف ذکر شده، ابتدا شبکه پایش کیفی موجود آب زیرزمینی ارزیابی و سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه سازی می شود. در ادامه، مراحل کار با جزئیات بیشتر شرح داده می شود.

۳- روش تحقیق

هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی شبکه پایش کیفی موجود و طراحی دوباره آن است. اصلاح شبکه پایش موجود با بهینه سازی شبکه پایش و حذف چاه های اضافی و اضافه نمودن چاه های جدید در بعضی از نقاط انجام می شود. برای رسیدن به این هدف، ابتدا لازم است پایگاه داده ای از داده های پارامتر TDS آب زیرزمینی ایجاد شود که برای

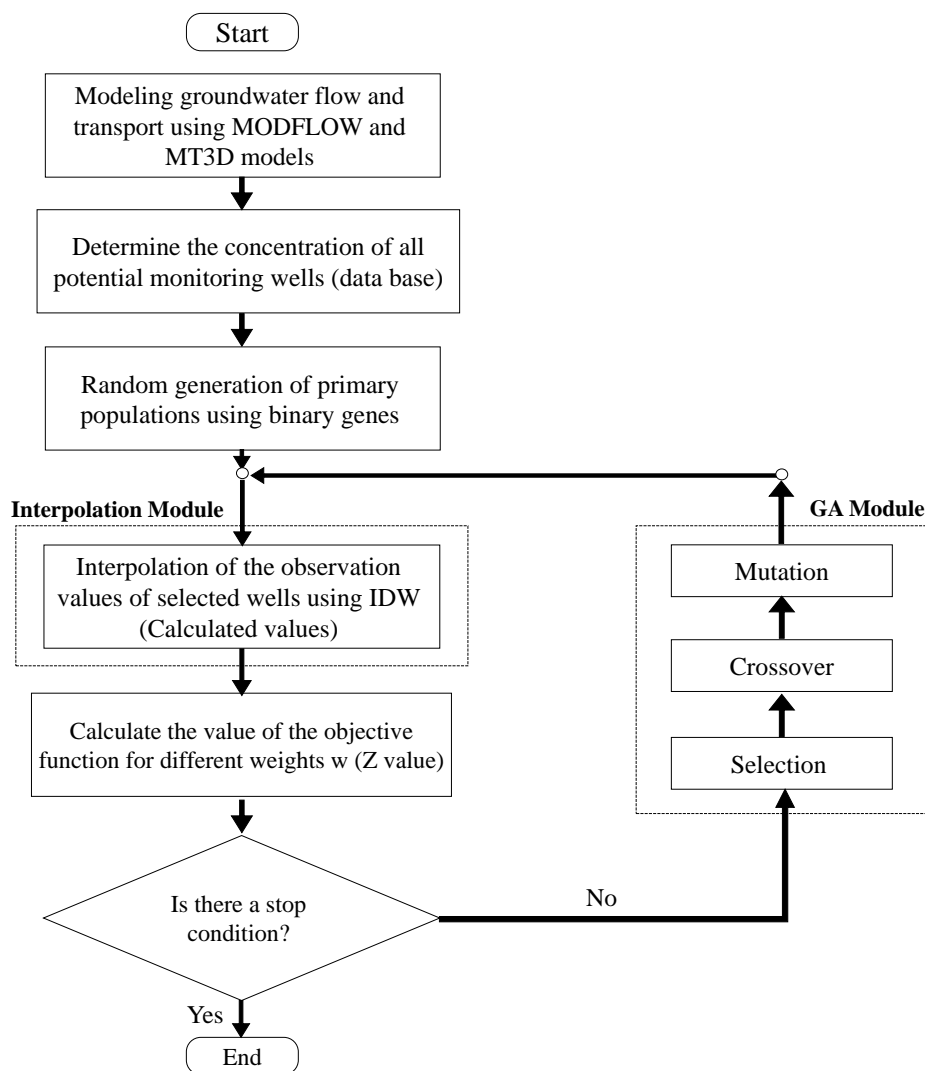


Fig. 3- Flowchart of the methodology

شکل ۳- فلوجارت روش تحقیق

۳-۱- پایگاه داده

برای برآورد مقادیر پارامتر TDS در کل محدوده مورد مطالعه، از آمار چاه‌های پایش کیفی موجود در منطقه و مدل‌سازی جریان و انتقال آب زیرزمینی با مدل‌های MODFLOW و MT3D استفاده می‌شود. با انجام مدل‌سازی، مقادیر TDS آب زیرزمینی برای تمام نقاط پتانسیل (۶۰۹ سلول با ابعاد ۱ کیلومتر در ۱ کیلومتر) در محدوده مورد مطالعه به صورت گسسته و در نقاط با فاصله‌های مشخص برآورد می‌گردد. لازم به ذکر است که مقادیر به‌دست‌آمده در این مرحله همان مقادیر مشاهداتی در مرحله بهینه‌سازی شبکه پایش است که جزییات آن در بخش بهینه‌سازی آورده شده است.

۳-۲- کدهای MODFLOW و MT3D

MODFLOW، یک مدل فیزیکی، سه بعدی است که قابلیت شبیه‌سازی‌های پایدار و ناپایدار آبخوان‌های آزاد، تحت فشار و آزاد-تحت فشار را دارد. این کد، معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی را بر اساس روش تفاضل‌های محدود حل می‌کند. در این راستا، آبخوان به سلول‌های کوچکتری شبکه‌بندی می‌شود، به طوری که، فرض می‌شود خصوصیات آبخوان در هر سلول یکنواخت است. لازم به ذکر است که نتایج شبیه‌سازی MODFLOW (ارتفاع بار هیدرولیکی، نرخ جریان آب زیرزمینی و نرخ تخلیه/تغذیه) می‌تواند برای مدل‌های انتقال املاح مانند MT3D (Alizadeh et al., 2017; Rahmawati et al., 2013) نیز استفاده شود.

اطلاعات ورودی مدل شامل شرایط مرزی و اولیه، تعیین روش انتقال همرفت، مقادیر ضریب انتشار و ضریب پخشودگی طولی و نوسانات مقادیر TDS در زمان‌های مختلف است. مرزهای با غلظت صفر به عنوان شرایط مرزی مدل و توزیع اولیه مقادیر TDS در محدوده مدل‌سازی به عنوان شرایط اولیه مدل در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به روش‌های موجود در MT3D، برای حل معادله انتقال همرفت از روش مشخصات^۶ (MOC) استفاده شد. مقادیر ضریب انتشار و ضریب پخشودگی طولی نیز به عنوان پارامترهای واسنجی مدل در مرحله واسنجی تعیین گردید.

مدل بهینه‌سازی: تعریف یک مدل طراحی شبکه پایش برای مسئله بهینه‌سازی ضروری است. مدل بهینه‌سازی توسعه داده شده در این مطالعه شامل دو تابع هدف است. هدف اول، حداقل کردن اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر محاسبه شده در تمام نقاط پتانسیل آبخوان است که دقت شبکه پایش را نشان می‌دهد. هدف دوم نیز به منظور حداقل کردن هزینه‌ها، حداقل کردن تعداد چاه‌های پایش کیفی در شبکه است. برای تحقق هدف اول، از کارایی مدل نش-ساتکلیف استفاده شد که با توجه به TDS مشاهده‌شده و محاسبه‌شده بدست می‌آید (رابطه ۱).

$$f_1 = 1 - \frac{\sum_1^n (TDS_{obs_i} - TDS_{est_i})^2}{\sum_1^n (TDS_{obs_i} - \overline{TDS}_{obs})^2} \quad (1)$$

در این رابطه، TDS_{obs_i} مقدار پارامتر کل مواد جامد محلول مشاهداتی در نقطه i ؛ TDS_{est_i} کل مواد جامد محلول محاسبه شده در نقطه i ؛ \overline{TDS}_{obs} میانگین کل مواد جامد محلول مشاهداتی و n ، تعداد کل نقاط کیفی حوضه می‌باشد. در این بخش، برای محاسبه مقادیر f_1 به مقادیر TDS محاسبه‌ای و مشاهده‌ای نیاز است که مقادیر محاسبه‌ای با توجه به نقاط انتخاب شده (چاه‌های شبکه) و با استفاده از روش درونیابی IDW (Tabatabaei and Ghazali, 2011) بدست می‌آید و مقادیر مشاهده‌ای با توجه به مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل‌های MODFLOW و MT3D بدست می‌آید. تعداد چاه‌های شبکه نیز مشخص و به عنوان تابع هدف دوم معرفی می‌شود. لازم به ذکر است که مقادیر f_1 بین $-\infty$ تا یک به دست می‌آید و هنگامی که مقدار f_1 برابر یک می‌شود، TDS محاسبه‌ای با TDS مشاهده‌ای برابر است و مدل از نظر عملکرد و دقت به بهترین جواب رسیده است. در حالی که، این جواب تعداد چاه‌ها را کاهش نمی‌دهد. برای رفع این مشکل، از تابع هدف دوم (f_2) برای حداقل کردن نسبت بین تعداد چاه‌های موجود در منطقه استفاده گردید (رابطه ۲).

$$f_2 = \frac{\tilde{n}}{n} \quad (2)$$

برای تهیه مدل جریان آب زیرزمینی با استفاده از MODFLOW، ابتدا مدل مفهومی منطقه با استفاده از نقشه زمین‌شناسی منطقه، محدوده مورد مطالعه برای مدل‌سازی، مقادیر پارامترهای هیدروژئولوژیکی (هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه)، پارامترهای بیلان (چاه‌های بهره‌برداری و میزان تغذیه از سطح آبخوان)، توپوگرافی سطح بالایی و پایینی لایه آبدار، نقشه‌ی هم‌تراز سطح آب زیرزمینی و مرزهای ورودی و خروجی آبخوان تعیین شد. مرزهای شبیه‌سازی شده در این مدل شامل مرز بدون جریان برای مرزهای شرق و غرب مدل و مرزهای جریان وابسته به بار هیدرولیکی (شرایط مرزی کوشی) برای مرزهای ورودی و خروجی مدل بود. پس از تهیه مدل مفهومی، با توجه به وضعیت زمین‌شناسی، توپوگرافی، نقشه‌های هم‌تراز آب زیرزمینی، نقشه پهنه‌های آبی و وسعت منطقه مورد مطالعه، شبکه‌ای با سلول‌هایی به ابعاد ۱۰۰۰ متر در ۱۰۰۰ متر شامل ۲۵ سطر و ۳۲ ستون تهیه شد. در ادامه، اطلاعات جمع‌آوری شده در مدل مفهومی شامل مقادیر پارامترهای فیزیکی (ضخامت لایه آبدار، ضریب تخلخل و غیره) و هیدروپنایمیک (ضریب هدایت هیدرولیکی و قابلیت انتقال) آبخوان و همچنین مقادیر تغذیه (نفوذ ناشی از بارش و آب برگشتی ناشی از مصارف) و تخلیه (پمپاژ چاه‌ها) از آبخوان با دوره تنش ماهانه وارد مدل MODFLOW شد. پس از ورود همه داده‌های مورد نیاز مدل و اجرای مدل جریان آب زیرزمینی برای سال آبی ۹۵-۱۳۹۴، پارامترهای هدایت هیدرولیکی، مقادیر تغذیه و ضریب هدایت بستر رودخانه‌ها و زهکش‌ها به عنوان پارامترهای واسنجی انتخاب شدند. پس از واسنجی مدل، صحت مدل واسنجی شده برای داده‌های سال آبی ۹۶-۱۳۹۵ بر اساس مقادیر ارتفاع بار هیدرولیکی مورد ارزیابی قرار گرفت.

پس از تهیه مدل جریان آب زیرزمینی، برای تهیه مدل انتقال پارامتر TDS، از کد MT3D استفاده شد. نسخه‌های مختلف کد MT3D به طور معمول در مدل‌سازی انتقال آلاینده و مطالعات ارزیابی پایش کیفی استفاده می‌شوند. MT3D، مجموعه‌ای جامع از گزینه‌ها و قابلیت‌هایی برای شبیه‌سازی انتقال همرفت^۳، پخشیدگی^۴، انتشار^۴ و واکنش‌های شیمیایی^۵ آلاینده‌ها در سیستم آب زیرزمینی تحت شرایط هیدروژئولوژیکی مختلف دارد (Zheng et al., 2012). MT3D می‌تواند تغییرات غلظت آلودگی‌های آب زیرزمینی را با توجه به پخشیدگی، انتشار و برخی واکنش‌های شیمیایی اولیه، با انواع مختلف شرایط مرزی و منابع یا مخازن خارجی شبیه‌سازی کند (Zheng et al., 2001).

کنترل می‌شود که برای حفظ تنوع ژنتیکی در جمعیت از یک نسل به نسل بعدی استفاده می‌شود. همانند P_{cross} ، در صورتی که P_{mut} بین ۰/۰۵ تا ۰/۲۵ باشد، تغییرات افزایشی نسبتاً قوی در الگوریتم خواهد بود (Fisher, 2013; Ayvaz and Kentel, 2015). این مراحل تا زمانی که شرط توقف برقرار شود تکرار می‌شود. با توجه به موارد ذکر شده، بر اساس مطالعات گذشته (Yang et al., 2012; Ayvaz and Kentel, 2015; Luo et al., 2016) و انجام فرآیند سعی و خطا، مقادیر پارامترهای جمعیت، احتمال تقاطع، احتمال جهش و حداکثر تعداد تکرارها، ۵۰، ۰/۹۵، ۰/۰۵ و ۱۰۰۰ تعیین گردید.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج مدل MODFLOW

پس از واسنجی مدل جریان آب زیرزمینی، مقادیر محاسبه شده و مشاهده‌ای به صورت شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به این شکل، مقادیر محاسبه شده توسط مدل و مقادیر مشاهده‌ای به خط ۱:۱ نزدیک‌اند و تقریباً بر هم منطبق می‌باشند. همچنین، مقادیر خطاهای به دست آمده بین تراز آب محاسبه شده و مشاهداتی در جدول ۲ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار خطای ME و MSE نزدیک به صفر بوده است و خطای NRMSE کم‌تر از ۱۰ درصد می‌باشد. با توجه به مقادیر خطاهای بدست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که مدل، تراز سطح ایستابی را نسبتاً خوب شبیه‌سازی کرده است.

۴-۲- نتایج مدل MT3D برای انتقال TDS

پس از واسنجی مدل، ضریب انتشار 1×10^{-5} مترمربع بر روز و مقدار ضریب پخشیدگی طولی برابر با ۱۰ متر بدست آمد. نتایج واسنجی مدل MT3D در شکل ۵ نشان داده شده است. مقایسه غلظت شبیه‌سازی شده و غلظت مشاهده‌ای TDS، نشان می‌دهد که نقاط تقریباً به خط یک به یک نزدیک‌اند. پارامتر خطای بدست آمده در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به این جدول، مقدار خطای MSE نزدیک به صفر و خطای NRMSE کم‌تر از ۱۰ درصد می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که مدل در شبیه‌سازی مقادیر TDS نسبتاً موفق عمل کرده است.

در این رابطه، \bar{n} ، تعداد چاه‌های انتخاب شده و n تعداد کل چاه‌های موجود در منطقه می‌باشد. با توجه به اینکه حداکثر مقدار هر دو تابع هدف یک است اما دارای ماهیت متفاوتی هستند، یعنی تابع هدف اول در جستجوی حداکثر کردن مقدار f_1 است در حالی که تابع هدف دوم در جستجوی حداقل کردن مقدار f_2 است. بنابراین با اعمال ضریب وزنی w و ضرب در عدد (-1) برای تابع f_2 ، هر دو هدف در یک تابع هدف به صورت رابطه ۳ خلاصه می‌شود که مقدار w با توجه به اهمیت نسبی f_2 در برابر f_1 تنظیم می‌شود.

$$\max z = f_1 - wf_2 \quad (3)$$

- **شبیه‌سازی:** یکی از مراحل اصلی یک مسأله بهینه‌سازی، بررسی محدودیت‌ها و محاسبه توابع هدف است. در بررسی محدودیت‌های مسئله بهینه‌سازی، پس از انتخاب متغیرهای تصمیم (تعداد چاه‌ها) برای بررسی محدودیت‌ها و تعیین مقادیر تابع هدف نیاز به شبیه‌سازی است. در شبیه‌سازی این مسأله، ابتدا با استفاده از روش‌های درونیابی IDW مقادیر TDS محاسبه شده در تمام نقاط پتانسیل به دست می‌آید. سپس مقدار ضریب نش-ساتکلیف (f_1) شبکه با استفاده از مقادیر محاسبه شده از طریق IDW و مقادیر مشاهده‌ای نقاط پتانسیل موجود در پایگاه داده تعیین می‌شود. از طرفی با توجه به معلوم بودن تعداد چاه‌های پایش در شبکه تابع f_2 نیز بدست می‌آید.

- **الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک:** پیاده‌سازی GA با تولید یک جمعیت از کروموزوم‌های تصادفی (مجموعه چاه‌های شبکه پایش) آغاز می‌شود. در طی هر نسل، الگوریتم میزان برازش هر کروموزوم در جمعیت را محاسبه می‌کند. در گام بعدی، براساس مقادیر برازش به دست آمده، زیرمجموعه‌ای از کروموزوم‌های جمعیت قبلی انتخاب و وارد نسل جدید می‌شود، که این فرآیند با استفاده از روش چرخه رولت انجام می‌شود. بعد از این فرآیند، جواب‌های ممکن در جمعیت جدید بر اساس احتمال تقاطع (P_{cross}) تعیین می‌شود. معمولاً برای اجتناب از جواب‌های مشابه در نسل‌های متوالی، مقدار P_{cross} را بالا در نظر می‌گیرند. مطالعات انجام شده در زمینه بهینه‌سازی آب‌های زیرزمینی نشان داد که معمولاً این ضریب را بین ۰/۵ تا ۱ در نظر می‌گیرند (Fisher, 2013; Ayvaz and Kentel, 2015). گام نهایی فرآیند جهش است که برای افزایش تنوع جمعیت با اصلاح جواب‌های قبلی به کار گرفته می‌شود. این فرآیند با استفاده از احتمال جهش (P_{mut})

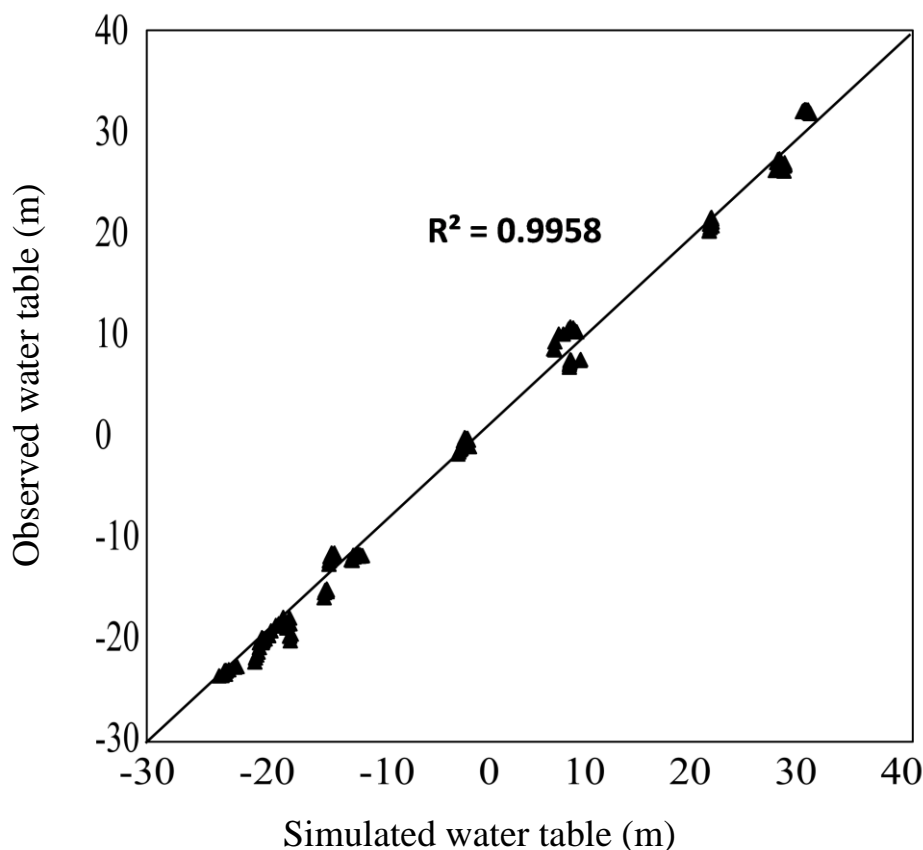


Fig. 4- Observation head vs. simulation head in the observation wells

شکل ۴- انطباق بار هیدرولیکی شبیه‌سازی شده توسط مدل و بار هیدرولیکی مشاهداتی چاه‌های مشاهده‌ای

Table 3- Parameters of the simulated and observed values of TDS

جدول ۳- پارامترهای خطای غلظت کل جامدات محلول شبیه‌سازی شده و غلظت کل جامدات محلول مشاهداتی

Error Value	
ME (m)	2.17
RMSE (m)	37.97
ASE (m ²)	29.18
MSE (m ²)	0.0175
NRMSE (%)	5.3

Table 2- Parameters of the Simulated and observed water table

جدول ۲- پارامترهای خطای تراز آب شبیه‌سازی شده و تراز سطح ایستابی مشاهداتی

Error Value	
ME (m)	0.306
RMSE (m)	1.289
ASE (m ²)	1.485
MSE (m ²)	0.016
NRMSE (%)	2.3

این شکل نشان می‌دهد که قسمت‌های جنوبی و جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه دارای TDS کمتری نسبت به سایر مناطق هستند. در ادامه برای مقایسه شبکه پایش فعلی با ۲۰ چاه نمونه‌برداری با توجه به مقادیر TDS اندازه‌گیری شده در محل چاه‌های موجود و روش درونیابی IDW، مقادیر TDS در همه نقاط پتانسیل برآورد می‌شود. برای تعیین دقت شبکه پایش از ضریب نش- ساتکلیف استفاده شد که مقدار این ضریب ۰/۲۹۱ بدست آمد. شکل ۷، نقشه TDS درونیابی شده با استفاده از چاه‌های پایش موجود در منطقه را نشان می‌دهد.

۳-۴ پایگاه داده

با توجه به نتایج مدل شبیه‌سازی جریان و انتقال املاح در آب زیرزمینی، مقادیر پارامتر TDS در هر یک سلول‌های مدل طراحی شده در MODFLOW و MT3D در شکل ۶ آورده شده است که این مقادیر همان مقادیر نقاط پتانسیل در پایگاه داده را تشکیل می‌دهد. موقعیت چاه‌های موجود به همراه ۳ چاه جدید اضافه شده در انجام این مطالعه نیز در شکل ۶ مشخص شده است. مقادیر TDS ارائه شده در

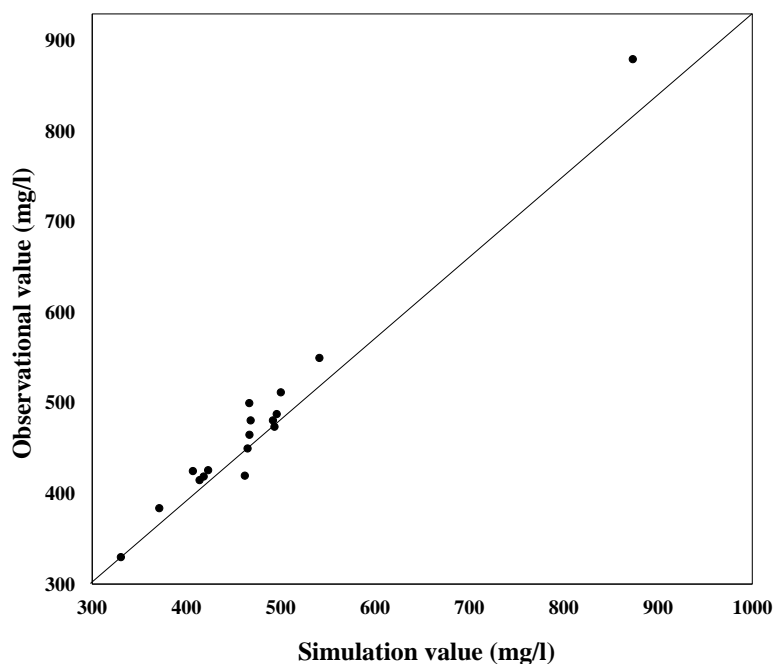


Fig. 5- Observed values of TDS vs. the simulated values of TDS in the Sampling wells
 شکل ۵- انطباق TDS شبیه‌سازی شده توسط مدل و مشاهداتی چاه‌های نمونه‌برداری

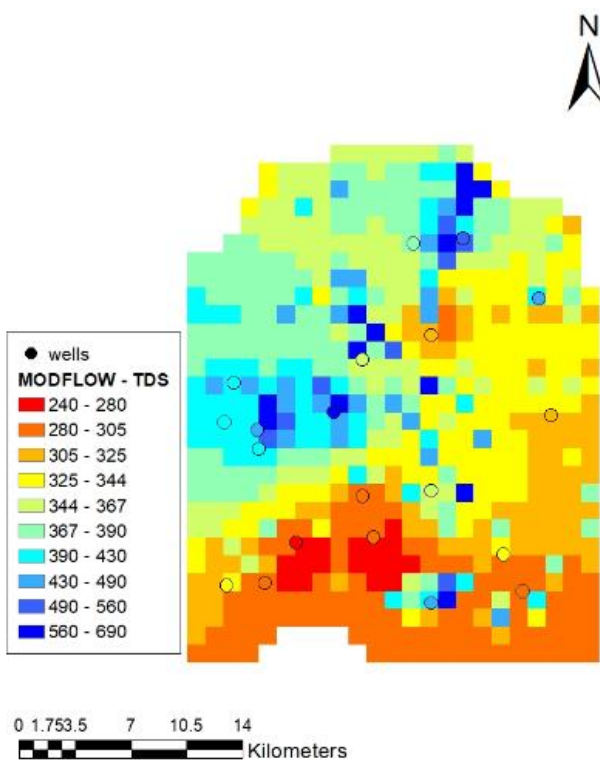


Fig. 7- Interpolated TDS map using wells in the area
 شکل ۷- نقشه TDS درونیابی شده با استفاده از چاه‌های موجود در منطقه

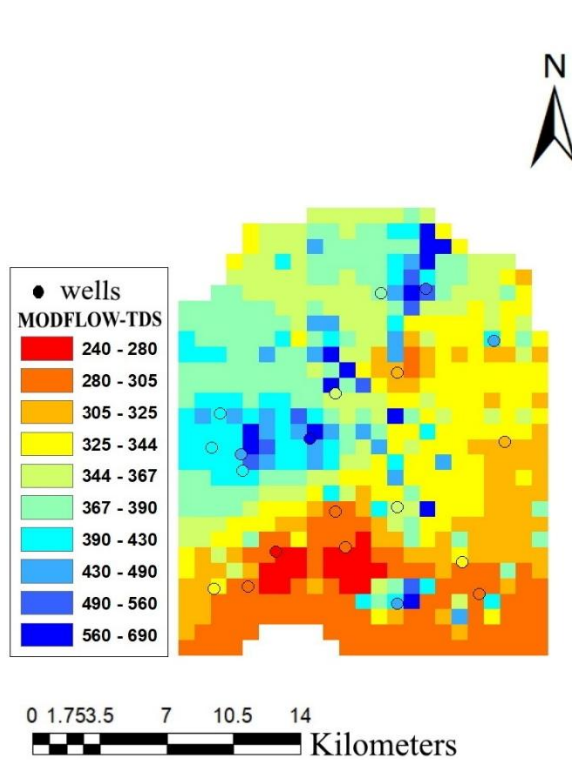


Fig. 6- پایگاه داده
 شکل ۶- پایگاه داده

۴-۴- الگوریتم بهینه‌سازی

شکل ۸، همگرایی رسیدن به جواب بهینه در الگوریتم ژنتیک را برای $w=1$ (به عنوان مثال) نشان می‌دهد. با توجه به نمودار همگرایی ارائه شده در شکل ۸، با توجه به نوع تابع هدف، فرآیند جستجو در مدل بهینه‌سازی با انتخاب تعداد بیشتری از چاه‌ها در منطقه شروع می‌شود و به تدریج با تکامل GA، تعداد آن‌ها کاهش می‌یابد. به طوری که بعد از ۱۰۰۰ نسل، تابع هدف به یک مقدار ثابتی همگرا می‌شود.

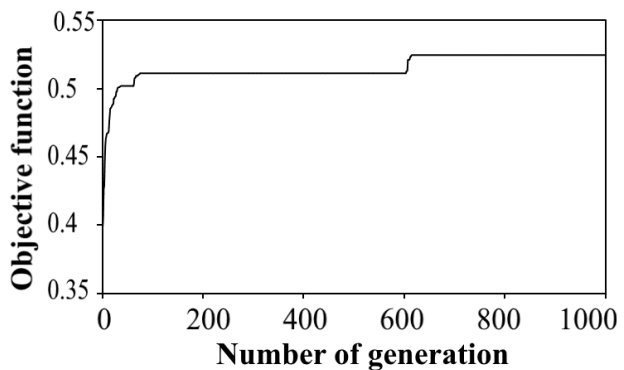


Fig. 8- Convergence to find the answer for $w=1$

شکل ۸- همگرایی رسیدن به جواب برای $w=1$

طبقه‌بندی، نتایج بدست‌آمده از وزن‌های بین $0/1$ تا $0/5$ در کلاس "خوب" و "خیلی خوب" قرار می‌گیرد، همچنین نتایج حاصل از اعمال وزن‌های بین یک تا ۲ در کلاس "قابل قبول" و وزن‌های بیشتر از ۵ در کلاس "غیرقابل قبول" قرار می‌گیرند، بنابراین، نتایج بدست‌آمده از وزن‌های بیشتر از ۵، از روند بررسی حذف می‌شوند. با توجه به نوع تابع هدف که حداکثر کردن است، برای مقادیر مشابه w ، هر چه تعداد چاه‌های انتخابی کمتر باشد، به همان نسبت مقدار ضریب نش- ساتکلیف (f_1) کاهش می‌یابد. اما با توجه به نوع تابع هدف کلی، مدل بهینه‌سازی در طول فرآیند بهینه‌سازی، برای حداکثر کردن مقادیر f_1 ، تمایل به حداقل کردن تعداد چاه‌های انتخابی و جستجو برای تعیین موقعیت‌های بهتر چاه‌ها دارد. بدیهی است که با افزایش مقادیر w ، اهمیت نسبی تابع f_2 که حداقل کردن است نسبت به f_1 بیشتر می‌شود و در نهایت مقادیر تابع هدف کلی کاهش می‌یابد (جدول ۳).

نتایج ارزیابی‌ها نشان داد، هنگامی که وزن‌ها بیشتر از یک می‌شود، وزن تابع هدف اقتصادی (f_2) بیشتر می‌شود و برای کاهش هزینه‌ها، تعداد چاه‌ها کاهش می‌یابد. همزمان با کاهش تعداد چاه‌ها، دقت نتایج کیفی که با کارایی مدل نش- ساتکلیف (f_1) مقایسه می‌گردد، کاهش می‌یابد. بنابراین، اگرچه کاهش تعداد چاه‌ها از نظر اقتصادی به صرفه است اما دقت نتایج ارزیابی کیفی منطقه نسبت به واقعیت پایین خواهد بود. برای افزایش این دقت، با توجه به نتایج جدول ۴، بهتر است وزن‌ها در محدوده بین یک تا ۲ انتخاب شود، زیرا در این وزن‌ها مقدار کارایی مدل نش- ساتکلیف نیز در محدوده قابل قبول است.

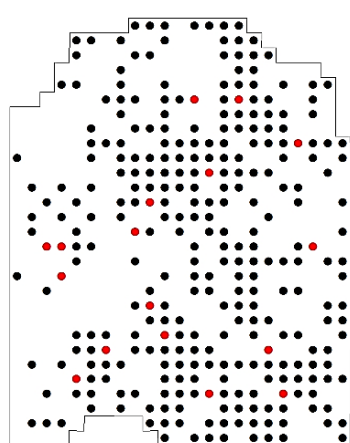
در ادامه، برای انتخاب بهترین وزن و بهترین شبکه پایش پیشنهادی، ارزیابی نحوه توزیع چاه‌ها در منطقه نیز ضروری است که در شکل ۹، موقعیت چاه‌های پایش برای وزن‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل ۹، پراکندگی چاه‌ها در منطقه، در همه وزن‌ها دارای پوشش مکانی مناسبی است. موقعیت چاه‌ها در این شکل با استفاده از نقاط سیاه و قرمز رنگ مشخص شده‌اند، نقاطی که به رنگ سیاه هستند بیانگر چاه‌های منتخبی است که در حال حاضر در منطقه وجود ندارند و نقاطی که به رنگ قرمز هستند بیانگر چاه‌هایی هستند که در حال حاضر در منطقه وجود دارند. تعداد چاه‌های منتخب شبکه پایش فعلی در شبکه پایش بهینه طراحی شده در وزن‌های $0/1$ تا 2 ، به ترتیب 17 ، 15 ، 14 ، 17 ، 16 ، 17 و 12 می‌باشد. به عبارت دیگر، مدل بهینه‌سازی با ارزیابی چاه‌های موجود در منطقه اقدام به انتخاب چاه‌های جدید کرده است.

نتایج بدست‌آمده از مدل بهینه‌سازی برای مقادیر مختلف w ($0/1$) تا 10 ، در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به مقادیر ارائه شده در این جدول، برای $w=0/1$ مقدار تابع هدف نهایی $0/919$ بدست آمد که کارایی مدل نش- ساتکلیف آن $0/969$ برآورد شد. این نتایج با انتخاب چاه پایش در منطقه بدست آمد. لازم به ذکر است که تعداد چاه‌های موجود با توجه به آمار چاه‌های اندازه‌گیری شده در منطقه، 20 در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳، با افزایش ضریب وزنی w ، مقدار تابع هدف کاهش می‌یابد. هنگامی که w از $0/1$ تا 10 افزایش می‌یابد، مقدار تابع هدف از $0/919$ تا $0/152$ کاهش می‌یابد. همین روند در مدل کارایی نش- ساتکلیف نیز دیده می‌شود که با افزایش وزن از $0/1$ تا 10 ، مقدار این ضریب از $0/969$ تا $0/365$ کاهش می‌یابد. (Moriasi et al. (2007) طبقه‌بندی توصیفی ضریب نش- ساتکلیف را با بررسی مطالعات مختلف مدل‌سازی در مقیاس حوضه آبریز ارائه نمودند. با توجه به طبقه‌بندی آن‌ها، مقدار معیار نش- ساتکلیف بین $0/75$ تا 1 در کلاس "خیلی خوب"، $0/65$ تا $0/75$ در کلاس "خوب"، $0/5$ تا $0/65$ در کلاس "قابل قبول" و کوچکتر از $0/5$ در کلاس "غیرقابل قبول" قرار دارد. بر اساس این

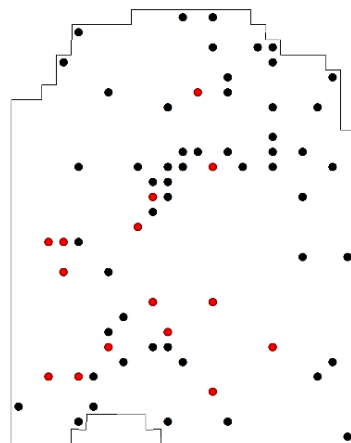
Table 4- Results obtained for different weights

جدول ۴- نتایج بدست آمده برای وزن‌های مختلف

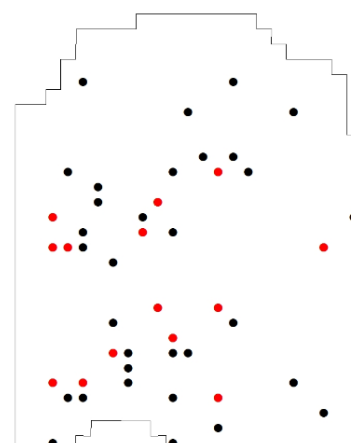
Weighting Coefficient (w)	NS model Efficiency (f_1)	The ratio between the number of selected and all available monitoring wells (f_2)	Objective Function (Z)	Number of selected wells (N)
0.1	0.969	0.496	0.919	302
0.5	0.674	0.110	0.619	67
1	0.600	0.076	0.525	46
1.2	0.596	0.074	0.508	45
1.5	0.570	0.064	0.474	39
1.7	0.539	0.051	0.453	31
2	0.504	0.041	0.422	25
5	0.475	0.034	0.303	21
10	0.365	0.021	0.152	13



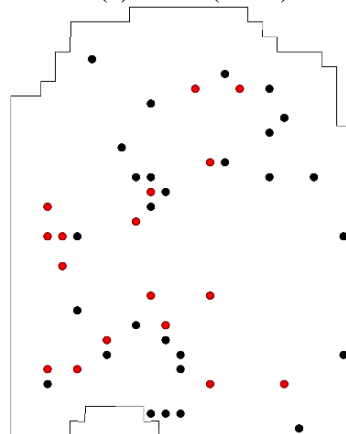
(a) $w=0.1$ (N=302)



(b) $w=0.5$ (N=67)



(c) $w=1$ (N=46)



(d) $w=1.2$ (N=45)

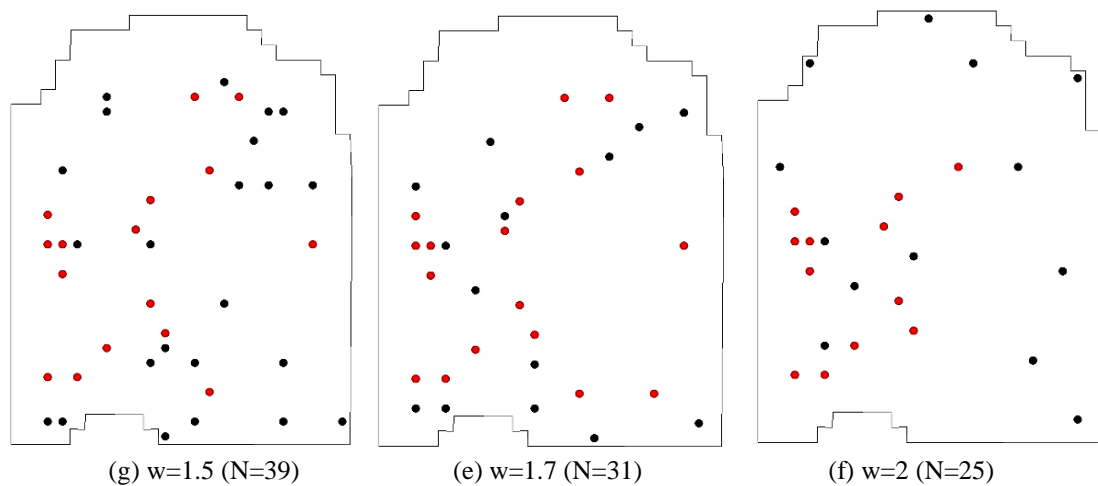


Fig. 9- Optimal location of monitoring wells for different weights

شکل ۹- موقعیت بهینه چاه‌های پایش برای وزن‌های مختلف

است. نحوه توزیع چاه‌ها در این شکل نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک در فرآیند بهینه‌سازی منجر به انتخاب چاه در موقعیت‌هایی شد که از نظر کیفی دارای وضعیت بحرانی‌تری بودند و در مناطقی که در شبکه فعلی چاه‌ها کمتر بوده یا چاهی وجود نداشته هم چاه‌هایی اضافه شده است.

برای انتخاب بهترین شبکه، بهتر است مقدار تابع هدف کلی، مقدار ضریب نش- ساتکلیف، پراکنش مکانی چاه‌های انتخابی در منطقه و تعداد چاه‌های فعلی موجود در شبکه پایش جدید مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به موارد ذکر شده، نتایج بهینه بدست‌آمده از $W=1.5$ می‌تواند به عنوان شبکه بهینه انتخابی باشد. در ادامه، نقشه درونیابی شده مقادیر TDS آب زیرزمینی برای $W=1.5$ در شکل ۱۰ آورده شده

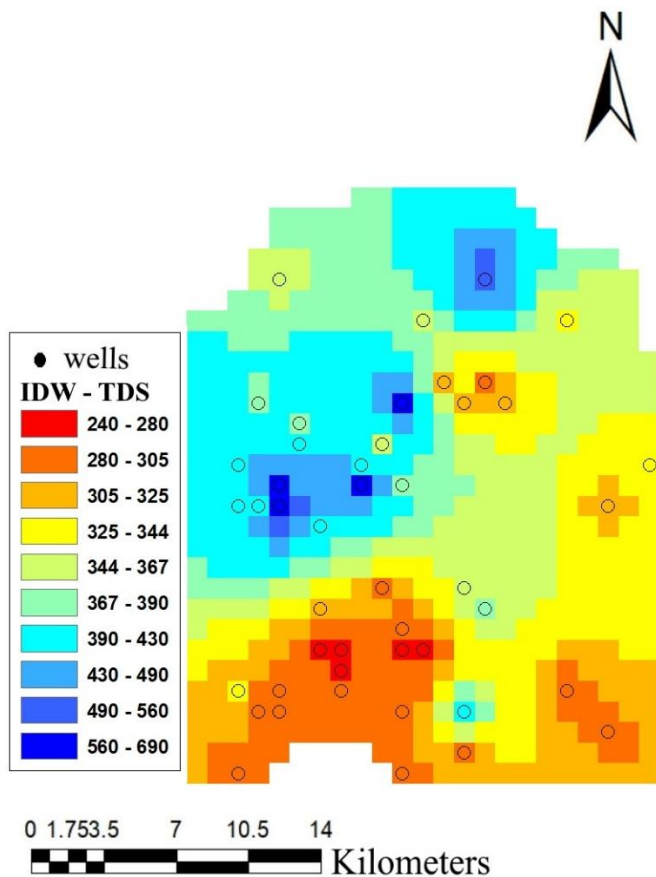


Fig. 10- Interpolated TDS map using monitoring wells selected in the optimization model ($w=1$)
شکل ۱۰- نقشه TDS درونیابی شده با استفاده از چاه‌های پایش انتخاب شده در مدل بهینه‌سازی ($w=1$)

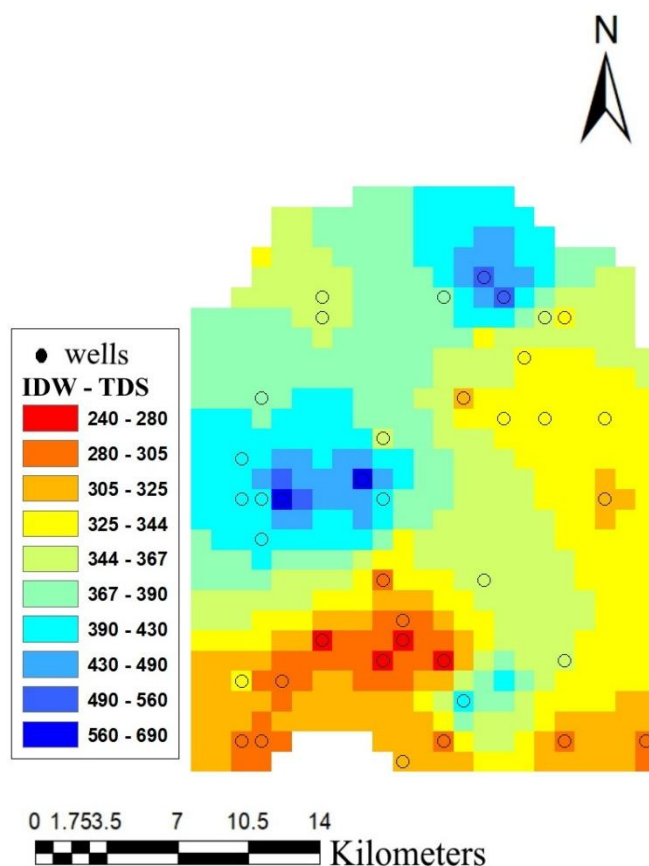


Fig. 11- Interpolated TDS map using monitoring wells selected in the optimization model ($w=1.5$)
 شکل ۱۱- نقشه TDS درونیابی شده با استفاده از چاه‌های پایش انتخاب شده در مدل بهینه‌سازی ($w=1$)

می‌کند. PBIAS، میزان میانگین انحراف مقادیر محاسبه‌شده را نسبت به مقادیر مشاهده‌شده بر حسب درصد نشان می‌دهد. به طوری که، هر چه مقدار آن به صفر نزدیکتر باشد، اختلاف کمتر بین مقادیر محاسبه‌ای و مشاهده‌ای را نشان می‌دهد. بنابراین، با توجه به مقادیر بدست آمده، به استثنای چند مورد در بقیه موارد مقادیر محاسبه شده بیشتر از مقادیر مشاهده‌ای بوده است. (Moriassi et al. (2007) مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که مقادیر PBIAS کوچکتر از ۱۰ درصد تخمین‌های بسیار خوبی هستند که با توجه به نتایج آن‌ها و مقادیر PBIAS بدست آمده در این مطالعه، تخمین‌ها بسیار خوب بوده است. به همین ترتیب، مقادیر RMSE برای وزن‌های مختلف نیز در جدول ۵ آورده شده است. همچنین، (Santhi et al. (2001 و Van Liew et al. (2003) اشاره کردند که در بسیاری از مطالعات هیدرولوژیکی مقادیر r بزرگتر از ۰/۵ قابل قبول است. بنابراین با توجه به اینکه، مقادیر r بدست آمده برای وزن‌های مختلف بیشتر از محدوده قابل قبول است، همه موارد دارای تخمین‌های قابل قبولی هستند.

برای اطمینان بیشتر از نتایج بهینه‌سازی، از شاخص‌های دیگری از قبیل درصد بایاس (PBIAS)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی (r) و انحراف معیار (s) نیز برای ارزیابی عملکرد مدل استفاده می‌شود. در ادامه، معادله هر یک از این شاخص‌ها در رابطه‌های ۶ تا ۸ آورده شده است.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (TDS_{est_i} - TDS_{obs_i})}{\sum_{i=1}^n EC_{obs_i}} \times 100 \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (TDS_{est_i} - TDS_{obs_i})^2} \quad (7)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(TDS_{est_i} - \overline{TDS_{est}}) \times (TDS_{obs_i} - \overline{TDS_{obs}})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (TDS_{est_i} - \overline{TDS_{est}})^2 \times \sum_{i=1}^n (TDS_{obs_i} - \overline{TDS_{obs}})^2}} \quad (8)$$

نتایج بدست آمده از معادلات ۶ تا ۸ در جدول ۴ آورده شده است. همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، مقادیر PBIAS بین وزن‌های مختلف از ۰/۷۹۵ برای $w=0/1$ تا ۱/۵۹۹ برای $w=2$ تغییر

در ادامه، تغییرات مقادیر میانگین TDS در دو دوره بهینه‌سازی و اعتبارسنجی در جدول ۶ آورده شده است. مقایسه مقادیر جدول ۶ نشان می‌دهد که با کاهش تعداد چاه‌های پایش، میانگین TDS کاهش نمی‌یابد و با افزایش تعداد چاه‌های پایش میانگین TDS افزایش می‌یابد. این موضوع تأیید کننده این مطلب است که مدل بهینه‌سازی در فرآیند جستجو، ابتدا نقاط واقع در مناطق با TDS بالاتر را انتخاب می‌کند و سپس، نقاطی را انتخاب می‌کند که دارای TDS کمتری هستند. بنابراین با رعایت توزیع مکانی چاه‌ها و صرفه اقتصادی بهتر است وزنی انتخاب گردد که TDS بالاتری دارد.

Table 5- Validation of the model results for $w \leq 1$

جدول ۵- اعتبارسنجی نتایج مدل برای $w \leq 1$			
W	PBIAS	RMSE	r
0.1	0.795	10.880	0.985
0.5	0.512	36.834	0.793
1	1.584	38.161	0.781
1.2	1.293	38.350	0.776
1.5	1.507	40.069	0.756
1.7	1.264	40.961	0.738
2	1.599	42.505	0.716
5	1.394	43.731	0.695
10	1.537	48.097	0.611

Fig. 6- Changes in mean TDS values in quality monitoring wells ($\mu\text{s/cm}$)

جدول ۶- تغییرات مقادیر میانگین TDS در چاه‌های پایش کیفی (واحد: $\mu\text{s/cm}$)

MODFLOW	Without optimization		Optimization using different weights								
	-	w = 0.1	w = 0.5	w = 1	w = 1.2	w = 1.5	w = 1.7	w = 2	w = 5	w = 10	
	N=20	n= 302	n= 67	n= 46	n= 45	n= 39	n= 31	n= 25	n= 21	n= 13	
	353.863	371.211	356.676	355.674	359.468	358.440	359.195	358.335	359.522	358.795	359.304

آب زیرزمینی با تعداد چاه‌های متفاوت ایجاد می‌شود. مقایسه میانگین مقادیر TDS مشاهده شده در منطقه و TDS محاسبه شده در شبکه بهینه با توجه به همه چاه‌های پایش انتخاب شده نشان می‌دهد که مقادیر بهینه‌شده بزرگتر از میانگین مقادیر مشاهده شده در منطقه است. بنابراین، به وضوح نتیجه‌گیری می‌شود که شبکه بهینه‌شده داده‌های کیفی آب زیرزمینی مناطق آلوده‌تر را فراهم می‌کند. همچنین، در طراحی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی بهتر است به صورت دوره‌ای بهینه‌سازی انجام شود زیرا ارزیابی‌های پی در پی شبکه پایش به صورت هر چند سال یک بار، در تعیین ارزیابی درازمدت کیفیت آب زیرزمینی و عوامل مؤثر در آن کمک می‌کند که می‌تواند در برنامه‌ریزی و اعمال روش‌هایی برای بهبود کیفیت آب زیرزمینی مؤثر باشد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Support Vector Machine
- 2- Advection
- 3- Dispersion
- 4- Diffusion
- 5- Chemical Reaction
- 6- Method of Characteristic

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه برای طراحی شبکه پایش از روش مدل‌سازی کمی و کیفی به عنوان یکی از روش‌هایی که برای ارزیابی اینکه آیا چاه‌های پایش موجود در شبکه دقت کافی در تخمین پارامترهای کیفی موردنظر را دارند یا نه، استفاده شد. بنابراین، ابتدا با استفاده از مدل‌های MODFLOW و MT3D فرآیند جریان و انتقال املاح (TDS) شبیه‌سازی می‌شود، سپس مقادیر TDS درونیابی‌شده با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده در چاه‌های پایش موجود در منطقه با TDS بدست آمده در هر یک از سلول‌ها (نقاط پتانسیل) مقایسه می‌شود و دقت داده‌های موجود موردبررسی قرار می‌گیرد. در ادامه با توجه به پایگاه داده تولید شده توسط مدل MODFLOW و MT3D برای کاهش اطلاعات اضافی یا افزایش اطلاعات در نقاط پرت یا گم‌شده منطقه مورد مطالعه از روش بهینه‌سازی استفاده می‌شود. با توجه به نتایج بهینه‌سازی، هر چه تعداد چاه‌های بیشتری از شبکه پایش حذف شود، در عین حال که هزینه‌ها را کاهش می‌دهد، به همان اندازه پراکنش مکانی چاه‌ها در شبکه پایش نیز کاهش می‌یابد. بنابراین سعی شد در مدل بهینه‌سازی، علاوه بر هزینه، توزیع مکانی چاه‌ها در منطقه نیز در نظر گرفته شود که با اعمال هر دو هدف در یک تابع هدف، اهمیت نسبی اهداف با استفاده از ضریب وزنی w نشان داده شد. با توجه به اینکه چه وزنی انتخاب می‌شود، شبکه‌های بهینه‌سازی کیفی

۶- مراجع

- Alizadeh M R, Nikoo M R, and Rakhshandehroo G R (2017) Hydro-environmental management of groundwater resources: A fuzzy-based multiobjective compromise approach. *Journal of Hydrology* 551:540-554
- Ayvaz M T, and Elçi A (2018) Identification of the optimum groundwater quality monitoring network using a genetic algorithm based optimization approach. *Journal of Hydrology* 563:1078-109
- Ayvaz M T, and Kentel E (2015) Identification of the best booster station network for a water distribution system. *Journal of Water Resources Planning and Management* 141:4014-4076
- Baalousha H (2010) Assessment of a groundwater quality monitoring network using vulnerability mapping and geostatistics: a case study from Heretaunga Plains, New Zealand. *Agricultural Water Management* 97(2):240-246
- Barca E, Bruno D E, Lay-Ekuakille A, Maggi S, and Passarella S (2018) Retrospective analysis: A validation procedure for the redesign of an environmental monitoring network. *Measurement* 113:211-219
- Bashi-Azghadi SN, and Kerachian R (2010) Locating monitoring wells in groundwater systems using embedded optimization and simulation models. *Science of the Total Environment* 408(10):2189-2198
- Chadalavada S, and Datta B (2008) Dynamic optimal monitoring network design for transient transport of pollutants in groundwater aquifers. *Water Resources Management* 22:651-670
- Datta B, Chakrabarty D, and Dhar A (2009) Optimal dynamic monitoring network design and identification of unknown groundwater pollution sources. *Water Resources Management* 23:2031-2049
- Dhar A, and Datta B (2010) Logic-based design of groundwater monitoring network for redundancy reduction. *Journal of Water Resources Planning and Management* 136(1):88-94
- Fisher J C (2013) Optimization of water-level monitoring networks in the eastern Snake River Plain aquifer using a kriging-based genetic algorithm method. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2013-5120 (DOE/ID-22224), Reston, VA.
- Ghodrati A R, Sobh Zahedi S, and Dadashi M A (2007) Investigation on Industrial Pollution of Zarjub River-Rasht City- Guilan Province. *Journal of the Iranian Natural Resources* 60(1):213-224
- Guo Y, Wang J F, and Yin X L (2011) Optimizing the groundwater monitoring network using MSN theory. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 21:240-242
- Jin X, Ranjithan R S, and Mahintakumar G (2014) A monitoring network design procedure for three-dimensional (3d) groundwater contaminant source identification. *Environmental Forensics* 15(1):78-96
- Khader A, and McKee M (2014) Use of a relevance vector machine for groundwater quality monitoring network design under uncertainty. *Environmental Modelling & Software* 57:115-126
- Kim K H, and Lee K K (2007) Optimization of groundwater-monitoring networks for identification of the distribution of a contaminant plume. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 21(6):785-794
- Luo Q, Wu J, Yang Y, Qian J, and Wu J (2016) Multi-objective optimization of long-term groundwater monitoring network design using a probabilistic Pareto genetic algorithm under uncertainty. *Journal of Hydrology* 534:352-363
- McLean M I, Evers L, Bowman A W, Bonte M, and Jones W R (2019) Statistical modelling of groundwater contamination monitoring data: A comparison of spatial and spatiotemporal methods. *Science of The Total Environment* 652:1339-1346
- Mogheir Y, Lima J L M P, and Singh V P (2009) Entropy and multi-objective based approach for groundwater quality monitoring network assessment and redesign. *Water Resources Management* 23:1603-1620
- Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, Bingner R L, Harmel R D, and Veith T L (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50(3):885-900
- Rahmawati N, Vuillaume J F, and Purnama I L S (2013) Salt intrusion in Coastal and Lowland areas of Semarang City. *Journal of Hydrology* 494:146-159
- Santhi C, Arnold J G, Williams J R, Dugas W A, Srinivasan R, and Hauck L M (2001) Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association* 37:1169-1188

- Tabatabaei S H, and Ghazali M (2011) Accuracy of interpolation methods in estimating the groundwater level (Case study: Farsan- Jooneghan and SefidDasht Aquifers). *Journal of Water and Soil Science* 15(57):11-22 (In Persian)
- Van Liew M W, Arnold J G, and Garbrecht J D (2003) Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between models. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 46(6):1539-1551
- Wilson C R, Einberger C M, Jackson R L, and Mercer R B (1992) Design of ground-water monitoring networks using the Monitoring Efficiency Model (MEMO). *Groundwater* 30(6):965-970
- Wu J, Zheng C, and Chien C C (2005) Cost-effective sampling network design for contaminant plume monitoring under general hydrogeological conditions. *Journal of Contaminant Hydrology* 77:41-65
- Yakirevich A, Pachepsky Y A, Gish TJ, Guber A K, Kuznetsov M Y, Cady R E, and Nicholson T J (2013) Augmentation of groundwater monitoring networks using information theory and ensemble modeling with pedotransfer functions. *Journal of Hydrology* 501(25):13-24
- Yang X S, Gandomi A H, Talatahari S, and Alavi A H (2012) *Geotechnical and transport engineering* (1st ed.). *Metaheuristics in Water*, Elsevier, Amsterdam
- Zheng C, Hill M C, and Hsieh P A (2001) MODFLOW-2000, the US Geological Survey modular groundwater model: User guide to the LMT6 package, the linkage with MT3DMS for multi-species mass transport modeling.
- Zheng C, Hill M C, Cao G, and Ma R (2012) MT3DMS: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)* 55(4):1549–1559