



فصلنامه علوم محیطی، دوره هجدهم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹

۱۹-۴۰

طراحی شبکه پایش کیفی آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: آبخوان دشت گیلان)

سمیه جنت رستمی* و علی صلاحی

گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۲۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۰۹

جنت رستمی، س. و ع. صلاحی. ۱۳۹۹. طراحی شبکه پایش کیفی آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: آبخوان دشت گیلان). فصلنامه علوم محیطی. ۱۸(۲): ۱۹-۴۰.

سابقه و هدف: توزیع مکانی و دقت داده‌های کیفی در مدیریت منابع‌های آب زیرزمینی ضروری است. به‌طور معمول این داده‌ها از چاه‌های پایش جمع‌آوری می‌شود که به‌صورت مکانی در حوضه آبریز یا آبخوان مورد مطالعه توزیع شده است. در طراحی شبکه پایش، حداقل تعداد چاه‌های پایش با توزیع مکانی بهینه و مناسب از نظر اقتصادی مورد نیاز است. بنابراین نحوه توزیع چاه‌ها و تعداد آن‌ها در طراحی شبکه پایش کیفی یکی از موارد مهم در بهینه‌سازی مسأله‌های مربوط به آب زیرزمینی است. هدف از این مطالعه، یافتن شبکه پایش بهینه با حداقل تعداد چاه‌ها در آبخوان دشت گیلان است، به‌طوری‌که، توزیع مکانی مناسبی از نظر پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی داشته باشد. یکی از مهمترین معیارهای کیفیت آب زیرزمینی شوری است که در این مطالعه پارامتر EC^۱ به‌عنوان پارامتر کیفی در طراحی شبکه پایش انتخاب گردید.

مواد و روش‌ها: برای جستجوی بهینه شبکه پایش کیفی از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک (GA^۲) استفاده شد. در این روش، یک شبکه ممکن از چاه‌های پایش در منطقه، به‌عنوان یک کروموزوم در نظر گرفته می‌شود و هر چاه پایش، ژن‌های کروموزوم هستند که با ساختار دودویی (صفر و یک) کدگذاری می‌شوند. در صورتیکه انتخاب شود یک و در غیر این صورت صفر خواهد بود. در این مطالعه همزمان دو تابع هدف متضاد حل می‌شود. هدف اول حداکثر کردن تطابق (برازش) بین توزیع‌های EC محاسبه شده در شبکه پایش موجود و شبکه جدید است. که این تطابق با استفاده از کارایی مدل نش-ساتکلیف^۳ ارزیابی می‌شود. هدف دوم نیز با در نظر گرفتن محدودیت مربوط به هزینه، حداقل کردن تعداد چاه‌های پایش در شبکه جدید ایجاد شده می‌باشد. این دو هدف در یک تابع هدف تعریف می‌شود که در آن ترکیب‌های مختلفی از دو هدف با اعمال ضریب وزنی W مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نتایج و بحث: نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که انتخاب جواب بهینه تا حد زیادی به تعیین ضریب وزنی W بستگی دارد. بنابراین باید مقدار W با توجه به متعادلترین جواب انتخاب شود. متعادلترین جواب به این معناست که بین هزینه و پراکنش مکانی چاه‌ها در منطقه یک رابطه قابل قبولی برقرار باشد. در ادامه، برای انتخاب بهترین جواب بهتر است افزون بر استفاده از ضریب کارایی نش-ساتکلیف از سنج‌های عملکرد دیگری مانند RMSE، PBIAS، ضریب رگرسیون و انحراف معیار نیز استفاده شود. به‌طور کلی، نتایج به‌دست آمده در این مطالعه با توجه به این سنج‌ها قابل قبول بوده است. همچنین، بررسی توزیع مکانی و مقایسه میانگین مقادیر EC مشاهده شده در منطقه و EC محاسبه شده در شبکه بهینه با توجه به همه چاه‌های پایش انتخاب شده نشان می‌دهد که مقادیر بهینه بزرگتر از میانگین مقادیر مشاهده شده در منطقه است. بنابراین به‌وضوح نتیجه‌گیری می‌شود که شبکه بهینه، داده‌های کیفی آب زیرزمینی مناطق آلوده‌تر را فراهم می‌کند.

*Corresponding Author. Email Address: janatrostami@guilan.ac.ir

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که کاربرد روش بهینه‌سازی به‌طور قابل ملاحظه‌ای تعداد چاه‌های پایش را با توجه به توزیع مکانی مقادیر EC کاهش می‌دهد. افزون بر این، شبکه پایش طوری طراحی شد که تعداد نقاط نمونه‌برداری در مناطق با آلودگی کمتر، حذف شد و در مناطقی با آلودگی بیشتر، اضافه شد. در طراحی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی بهتر است به‌صورت دوره‌ای بهینه‌سازی انجام شود، زیرا انتظار می‌رود کارایی شبکه پایش با اضافه شدن چاه‌های جدید به شبکه تغییر کند. ارزیابی‌های پی در پی شبکه پایش به‌صورت هر چند سال یک بار، در تعیین ارزیابی درازمدت کیفیت آب زیرزمینی و عامل‌های موثر در آن کمک می‌کند که می‌تواند در برنامه‌ریزی و اعمال روش‌هایی برای بهبود کیفیت آب زیرزمینی موثر باشد.

واژه‌های کلیدی: مدیریت کیفی، شبکه پایش، آب زیرزمینی، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک.

مقدمه

شیمیایی و بیولوژیکی آب‌های زیرزمینی تعریف می‌شود. بهترین طراحی شبکه پایش به عامل‌های 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). شبکه‌های پایش کیفی آب زیرزمینی با استفاده از دو روش کلی طراحی می‌شوند، روش اول روش هیدروژئولوژیکی^۴ است که طراحی بر اساس قضاوت کمی و کیفی اطلاعات توصیفی به‌دست آمده توسط زمین‌شناسان انجام می‌شود. به‌دلیل اینکه در این روش، از روش‌های پیچیده‌ای استفاده نمی‌شود، به‌طور معمول در عمل از این روش استفاده می‌شود. روش دوم، روش آماری است که در این روش از روش‌های زمین‌آماري پیشرفته استفاده می‌شود که بر اساس رویکردهای شبیه‌سازی، واریانس یا احتمالات به‌دست می‌آید. متغیرهای اصلی این روش در رویکرد مبتنی بر شبیه‌سازی، هدایت هیدرولیکی و در رویکرد مبتنی بر واریانس، سنج‌های کیفی به‌دست آمده از چاه‌های پایش است (Loaiciga et al., 1992). روش‌های آماری مورد استفاده در طراحی بهینه شبکه‌های پایش آب زیرزمینی شامل روش‌های کربجینگ، IDW^۵، مونت کارلو^۶، فیلتر کالمن^۷ و آزمون t-student است که برای انواع طراحی‌های شبکه از قبیل تعیین زمان نمونه‌برداری، موقعیت مناسب چاه و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌طور کلی، برای تعیین موقعیت‌های مناسب قرارگیری چاه و زمان‌های نمونه‌برداری در شبکه‌ها می‌توان از روش‌های

منبع‌های آب‌های زیرزمینی یکی از حیاتی‌ترین منبع‌های طبیعی هستند که هسته سیستم محیط زیستی را تشکیل می‌دهند. این منبع‌ها تامین‌کننده اصلی مصرف‌های آب‌های آشامیدنی، فعالیت‌های خانگی، کشاورزی، صنعتی، تفریحی و محیط زیست می‌باشند. از آنجا که هر گونه آلودگی آب‌های زیرزمینی به‌طور مستقیم با ایمنی و سلامت انسان در ارتباط است، تعیین کیفیت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب‌های زیرزمینی برای مصرف‌های مختلف از اهمیت خاصی برخوردار است. تغییرات کیفی آب‌های زیرزمینی در یک منطقه، تابعی از پارامترهای فیزیکی و شیمیایی می‌باشد که به شدت تحت تأثیر فرآیندهای طبیعی مانند سازه‌های زمین‌شناسی و فعالیت‌های انسانی هستند (Chadalavada and Datta, 2008). تاکنون محققان زیادی تأثیر منبع‌های آلودگی و فرآیندهای صنعتی و طبیعی را در کیفیت آب‌های زیرزمینی مورد بررسی قرار دادند (Dieng et al., 2017; Raynauld et al., 2017; Wu et al., 2018). مدیریت سیستم‌های آب زیرزمینی مستلزم پایش دقیق بر میزان آب و کیفیت آب‌های زیرزمینی می‌باشد. داده‌ها و اطلاعات به‌دست آمده برای این نوع پایش به‌طور معمول از طریق شبکه چاه‌های پایش جمع‌آوری می‌شود که شامل مجموعه‌ای از چاه‌های مشاهداتی هستند که به‌صورت تصادفی در منطقه توزیع شده‌اند. تعداد و توزیع مکانی چاه‌های مشاهداتی در یک شبکه پایش، از پارامترهای مهم موثر بر نتایج مطالعات کیفی آب‌های زیرزمینی هستند (Ayvaz and Elci, 2018). بنابراین، در طراحی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی، توزیع زمانی و مکانی نمونه‌برداری کیفی برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی،

Jin *et al.* (2014), Yakirevich *et al.* (2013), chian (2010) و Luo *et al.* (2016) به منظور شناسایی منبع‌های آلودگی و (2005) Wu *et al.* (2009), 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 بود، اما بیشتر آن‌ها بر اساس جستجوی غیرخطی و روش‌های بهینه‌سازی به همراه روش‌های زمین‌آماری (Chadalavada and Dat- (2008; Mclean *et al.*, 2019 Bashi-Azghadi and Kerachian, 2010; Luo *et al.*, 2016) یا نقشه آسیب‌پذیری آبخوان (Baalousha, 2010) بوده است. شبکه چاه‌های پایش کارآمدتر با رتبه‌بندی چاه‌های نمونه‌برداری از طریق ارزیابی مقادیر مشاهدات اندازه‌گیری شده در هر چاه و بررسی تراکم چاه‌ها در منطقه به دست می‌آید. به این ترتیب، چاه‌هایی که دارای ارزش کم یا اضافی هستند از شبکه چاه‌های نمونه‌برداری حذف می‌شوند (Fisher, 2013).

هدف این مطالعه، طراحی شبکه پایش با کمترین تعداد چاه در منطقه است که اطلاعات کافی از کیفیت منبع‌های آب زیرزمینی آن منطقه را نمایش می‌دهد. این هدف با ارزیابی چاه‌های موجود در شبکه، با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی برآورده می‌شود. مسأله‌های مربوط به بهینه‌سازی آب زیرزمینی، به طور معمول دارای سطوح ناپیوسته، غیرمحدب و غیرخطی هستند (McKinney and Lin, 1994). استفاده از روش‌های بهینه‌سازی ریاضی کلاسیک در این گونه مسأله‌ها ممکن است منجر به مقادیر بهینه موضعی به جای بهینه سراسری شود، همچنین همگرایی جواب در این روش‌ها تا حد زیادی بستگی به انتخاب نقطه شروع اولیه دارد و در مسائل با تابع هدف قطعه‌ای و ناپیوسته ممکن است بهینه موضعی به دست آید (Arora, 2004). برای حل این مشکل در روش‌های ریاضی بر پایه گرادیان، استفاده از روش‌هایی مانند الگوریتم‌های تکاملی و فراکاووشی پیشنهاد شد که این الگوریتم‌ها قابلیت تعیین جواب بهینه

آماری، قضاوت کارشناسانه و یا ترکیبی از هر دو روش استفاده نمود (Rosen, 1997).

امروزه، با رواج استفاده از ابزارهای داده‌کاوی در علوم مهندسی آب، این ابزارها به طراحی شبکه پایش منبع‌های آب راه یافته‌اند، بنابراین می‌توان رویکرد داده‌کاوی را نیز به عنوان دسته سوم رویکردهای طراحی شبکه پایش در نظر گرفت (Mirzaie-Nodoushan *et al.*, 2017). به عنوان نمونه، Asefa *et al.* (2004) از روشی بر پایه ماشین بردار پشتیبان^۱ (SVM) و (Khader and McKee (2014) از روش ماشین بردار رابط (RVM)^۲ که یک الگوریتم یادگیری آماری است، برای طراحی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی استفاده کردند. انتخاب روش پایش، بر اساس مقیاس پایش در منطقه تعیین می‌شود. شبکه‌های پایش در مقیاس کوچک با استفاده از رویکردهای آماری طراحی می‌شود، در حالی که شبکه‌های پایش بزرگ (در مقیاس ملی) بیشتر با استفاده از رویکرد قضاوت بر اساس اطلاعات هیدروژئولوژیکی طراحی می‌شود، که به طور معمول مدل‌های منطقه‌ای از هر دو روش به صورت ترکیبی استفاده می‌کنند.

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 طوریکه 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 به نسبت کاملی از سیستم آب زیرزمینی منطقه خواهد بود. 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 هدف‌های مختلفی انجام می‌شود، به عنوان نمونه، (Kim and Wilson *et al.* (1992), Lee (2007), Khadar and Chadalavada and Datta (2008), and McKee (2018) برای شناخت توزیع پلوم‌های آلودگی، Bashi-Azghadi and Kera-, Datta *et al.* (2009)

آستانه-کوچصفهان از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. (2016) Aboutalebi *et al.* از الگوریتم NSGA-II برای طراحی بهینه شبکه پایش کیفی آب در سیستم رودخانه-مخزن استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از روش بهینه‌سازی چندهدفه خطای پیش‌بینی غلظت آلاینده و میانگین زمان تشخیص آلاینده در ایستگاه‌های نمونه‌برداری را حداقل کردند. (2017) Mirzaie-Nodoushan *et al.* برای حداقل کردن میانگین مربعات خطا و تعداد چاه‌های پایش کمی آب زیرزمینی در منطقه اشتهارد استان البرز از الگوریتم NSGA-II استفاده کردند. (2018) Ayvaz and Elçi از الگوریتم ژنتیک، برای طراحی یک شبکه بهینه پایش کیفی آب زیرزمینی در کشور ترکیه استفاده کرد. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که روش پیشنهاد شده به‌طور قابل توجهی سبب کاهش تعداد چاه‌های پایش گردید.

در این مطالعه برای طراحی بهینه پایش کیفی آب زیرزمینی دشت گیلان واقع در شمال ایران از روش بهینه‌سازی GA استفاده می‌شود. با توجه به اینکه، یکی از مهمترین معیارهای کیفیت آب زیرزمینی شوری است که با پارامترهایی نظیر کل جامدات محلول^{۱۱} (TDS)، یون کلر^{۱۲} (Cl) و هدایت الکتریکی (EC) اندازه‌گیری می‌شود، در این مطالعه پارامتر EC به‌عنوان پارامتر کیفی در طراحی شبکه پایش آب‌های زیرزمینی دشت گیلان انتخاب گردید.

مواد و روش‌ها

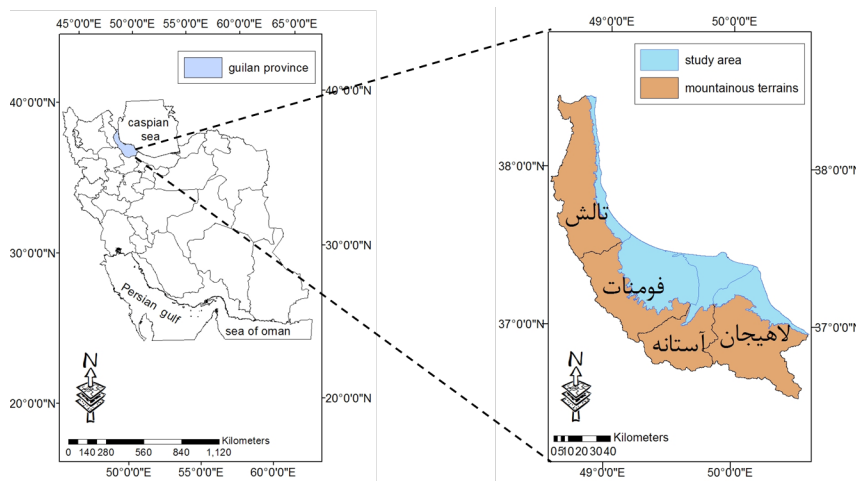
معرفی منطقه مورد مطالعه

استان گیلان با مساحت ۱۴۰۴۴ کیلومترمربع یکی از استان‌های شمال کشور است. این استان در امتداد بخش جنوبی دریای خزر به طول ۲۶۳ کیلومتر گسترش یافته که بخش غربی و جنوب شرقی استان توسط رشته کوه‌های البرز محدود شده است. زمین‌های استان متنوع و در محدوده بین منطقه‌های کوهستانی تا منطقه‌های ساحلی قرار می‌گیرد، به‌طوریکه در نواحی ساحلی ارتفاع سطح زمین پایینتر از ارتفاع سطح آزاد دریا است. آب و هوای استان، معتدل خزری و شبه مدیترانه‌ای است که دارای تابستان‌های گرم و شرجی و زمستان‌های سرد و مرطوب است. میانگین دمای ماهانه این

سراسری را در مسأله‌های غیرخطی و ناپیوسته دارند. همچنین این الگوریتم‌ها در مسأله‌های پیچیده و بزرگ به جای رسیدن به یک جواب بهینه موضعی، جواب نزدیک به بهینه سراسری را به‌دست می‌آورد. کاربر در اجراهای متوالی این الگوریتم‌ها با تعدادی از جواب‌های بهینه مواجه می‌شود که می‌تواند نتایج را مورد ارزیابی قرار دهد و در پایان یکی از جواب‌ها را به‌عنوان جواب بهینه انتخاب کند (Bateni *et al.*, 2015). استفاده از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی و فراکاشی در طراحی بهینه شبکه پایش آب زیرزمینی از اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادی رواج یافت، به‌طوریکه امروزه به یکی از روش‌های کارآمد و پرکاربرد در طراحی شبکه پایش تبدیل شده است (Mirzaie-No-*doushan et al.*, 2017). الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های بهینه‌سازی است که از ثنوری تکاملی داروین الهام گرفته شده است. در واقع این الگوریتم، بر پایه اصل تکاملی "پایداری بهترین‌ها" استوار است که اولین بار توسط Holland (1973) پیشنهاد شد. الگوریتم ژنتیک به‌طور گسترده برای حل مسأله‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود و در طراحی شبکه پایش کاربرد زیادی دارد. Cieniawski *et al.* (1995) نحوه انتخاب سیستم چاه‌های پایش را با روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک توسعه دادند. Al-Zah-*rani and Moied* (2003) از این الگوریتم برای بهینه‌سازی توزیع ایستگاه‌های پایش کیفی آب سطحی استفاده کردند و ایستگاه‌های نمونه‌برداری معرف منطقه را معرفی کردند. (2006) Yeh *et al.* با استفاده از کریجینگ فاکتوریل و الگوریتم ژنتیک روشی را برای بهینه‌سازی طراحی شبکه کیفی آب زیرزمینی چند متغیره مطرح کردند. Wu *et al.* (2005) با ادغام الگوریتم ژنتیک با مدل‌های شبیه‌سازی جریان و انتقال املاح آب زیرزمینی، شبکه پایش کیفی مقرون به صرفه‌ای را طراحی کردند. (2012) Dhar and Patil برای طراحی بهینه شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چند هدفه با مرتب‌سازی نامغلوب^{۱۰} (NSGA-II) استفاده کردند که برای نمایش تراکم‌های زمانی و مکانی از کریجینگ معمولی فازی استفاده کردند. (2017) Ganji-Khorramdel and Keykhaei برای طراحی بهینه شبکه پایش کمی آب زیرزمینی آبخوان

اقتصاد این استان به طور عمده بر پایه کشاورزی است و برنج محصول اصلی کشاورزی این منطقه است. محدوده مطالعاتی این تحقیق، دشت‌های آبرفتی استان با مساحت ۴۳۲۰ کیلومتر مربع است که در شکل ۱ نشان داده شده است. نیازهای آبی زمین‌های کشاورزی استان به صورت عمده از رودخانه سفیدرود تامین می‌شود که در طول دهه‌های گذشته

استان در محدوده ۳ درجه سانتیگراد در ماه دی تا ۳۰ درجه سانتیگراد در ماه تیر متغیر است. میانگین روزهای بارندگی استان ۱۳۵ روز در سال است که با میانگین بارندگی ۱۵۰۶ میلیمتر در سال، این استان به عنوان مرطوبترین استان کشور شناخته شده است. حدود ۳۰ درصد از زمین‌های استان شامل دشت‌های آبرفتی است که برای کشاورزی بسیار متناسب است.



شکل ۱- محدوده منطقه مورد مطالعه
Fig. 1- Location map of the study area

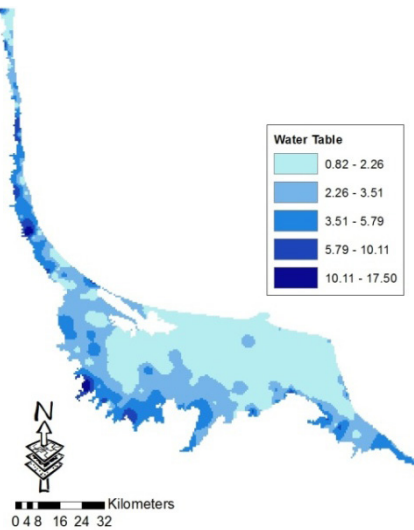
سازمان آب منطقه‌ای استان گیلان از طریق شبکه‌ای از چاه‌های پایش و با دو بار نمونه‌برداری در ماه‌های اسفند و شهریور هر سال اندازه‌گیری و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی استان شامل ۱۴۰ چاه نمونه‌برداری است که در لایه‌های عمیق (۳۲ حلقه) و نیمه عمیق (۱۰۸ حلقه) استان حفر شده است. سازمان آب منطقه‌ای پارامترهای زیادی را برای نمونه‌های برداشتی از چاه‌ها اندازه‌گیری و ارزیابی می‌کند که در این مطالعه هدایت الکتریکی (EC) به عنوان پارامتر اصلی آب زیرزمینی در بهینه‌سازی شبکه پایش مورد استفاده قرار می‌گیرد. EC برای ارزیابی کلی کیفیت آب زیرزمینی، پارامتر شاخص است که توزیع مکانی آن اندازه‌گیری شده برای هر دوره پایش سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ در شکل ۳ آورده شده است.

الگوریتم بهینه‌سازی

در این مطالعه برای جستجوی بهینه شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک (GA) استفاده گردید. GA یکی از الگوریتم‌های جستجوی تکاملی است که از مکانیسم

این رودخانه منبع اصلی تامین آب استان بوده است، با این وجود، افزایش وقوع خشکسالی‌ها در سال‌های اخیر، به همراه افزایش نیازهای آبی استان سبب افزایش روند کاهش منابع آب‌های سطحی در دسترس استان شده است. این عامل‌ها سبب شده است تا کشاورزان برای تامین نیازهای آبی خود به سمت استخراج بیشتر از آب‌های زیرزمینی روی آوردند. آب‌های زیرزمینی مورد نیاز برای مصرف‌های کشاورزی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از ۴۸۹۱۱ حلقه چاه نیمه عمیق و ۹۲۵ چاه عمیق استخراج می‌شود که این چاه‌ها در لایه‌های آزاد و تحت فشار حفر شده‌اند. میانگین عمق چاه‌های نیمه عمیق و عمیق به ترتیب ۱۱/۴ و ۷۹/۷ متر است. با توجه به شکل ۲، عمق سطح ایستابی در این ناحیه نسبت به سطح زمین بالاست. بنابراین، بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی ممکن است موجب آلودگی آبخوان‌ها و پیشروی آب شور شود.

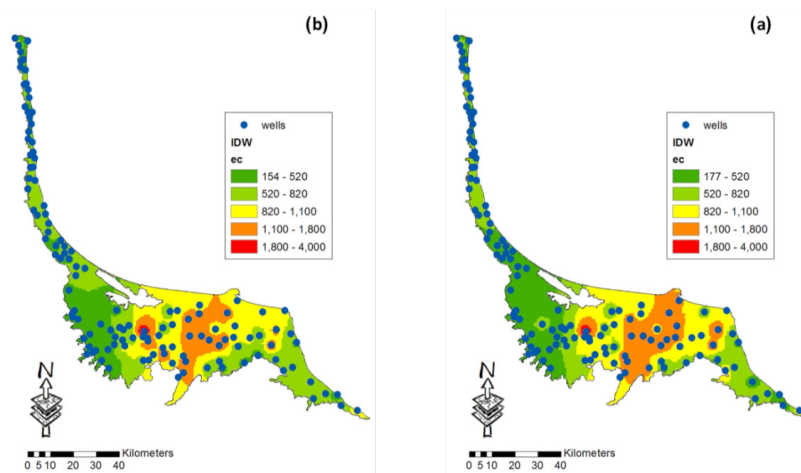
بالا بودن سطح ایستابی و آبشویی زمین‌های کشاورزی و آلوده بودن رودخانه‌ها در این استان سبب آلوده شدن آب‌های زیرزمینی می‌شود. کیفیت آب‌های زیرزمینی استان توسط



شکل ۲- میانگین عمق سطح ایستابی (سال آبی ۹۵ - ۱۳۹۴)
Fig. 2- The average depth of the water table (2016-2017)

- انتخاب^{۱۳}: دو کروموزوم بر اساس شایستگی والد انتخاب می‌شوند، که در این مرحله کروموزوم‌هایی که دارای برازش بالاتری هستند، شانس بیشتری برای انتخاب شدن دارند.
- تقاطع^{۱۴}: انجام یا عدم انجام تقاطع با یک عدد تصادفی مشخص می‌شود. در صورت انجام عمل تقاطع، والدین به فرزندان جدید تبدیل می‌شوند و در صورتی که عمل تقاطع انجام نگیرد، فرزندان دقیقاً نسخه‌ای از والدین خواهند بود.
- جهش^{۱۵}: انجام یا عدم انجام جهش با یک عدد تصادفی مشخص می‌شود. این عملگر برخی از اجزای فرزندان جدید را تغییر می‌دهد.
- پذیرش: فرزندان جدید در جمعیت جدید جای می‌گیرند.

انتخاب طبیعی و بقاء تقلید می‌کند و برای حل مسأله‌های بهینه‌سازی ترکیبی که دارای مجموعه جواب‌های ممکن زیادی است، استفاده می‌شود. پیاده‌سازی GA با یک جمعیت اولیه از کروموزوم‌های تصادفی (جواب‌های ممکن) شروع می‌گردد. پس از کدگذاری کروموزوم‌ها، مجموعه‌ای از عملگرهای تولیدمثل شامل جهش و تقاطع تعیین می‌شود که برای اصلاح کروموزوم‌ها در نسل جدید مورد استفاده قرار می‌گیرد. در هر نسل، میزان برازش هر کروموزوم در جمعیت محاسبه می‌شود که با توجه به مقادیر برازش بالاتر، زیرمجموعه‌ای از کروموزوم‌های جمعیت فعلی انتخاب و وارد جمعیت جدید می‌شود. جمعیت جدید با گام‌های زیر انتخاب می‌شود:



شکل ۳- توزیع مکانی EC اندازه‌گیری شده در (a) شهریور ۱۳۹۵ (b) اسفند ۱۳۹۴
Fig. 3- The spatial distribution of EC value in (a): September 2017 and (b): March 2017

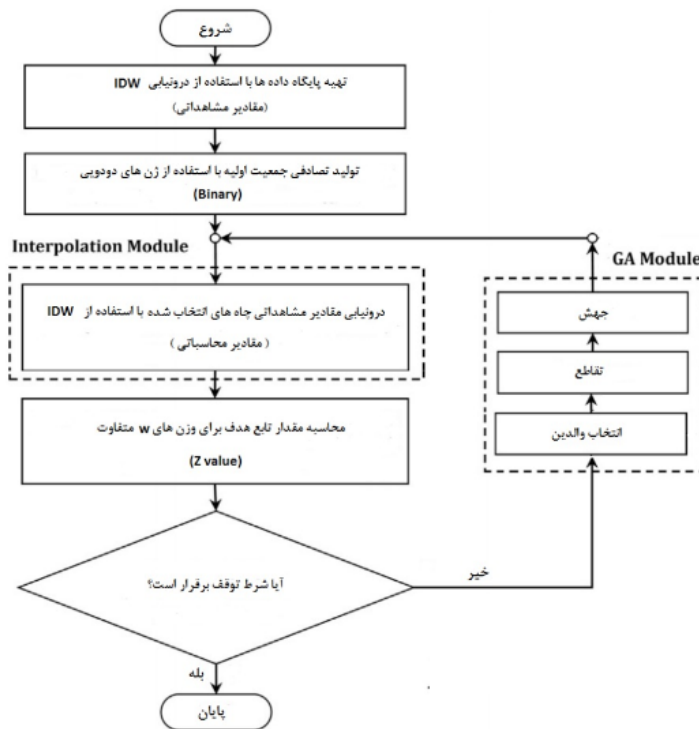
طراحی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود. بنابراین در ادامه، افزون بر نحوه تشکیل پایگاه داده، توابع هدف، محدودیت‌های مدل بهینه‌سازی و همچنین روند فرآیند شبیه‌سازی شرح داده می‌شود.

پایگاه داده: برای برآورد مقادیر EC در کل محدوده مورد مطالعه، از آمار چاه‌های پایش کیفی موجود در منطقه

این فرآیندها تا زمانی که معیار توقف تعریف شده توسط کاربر محقق نشود، تکرار می‌شود.

روش تحقیق

برای طراحی شبکه پایش کارآمد و تعیین موقعیت بهینه چاه‌های پایش در محدوده مطالعاتی، ابتدا پایگاه داده‌ای از داده‌های پارامتر EC آب زیرزمینی تهیه می‌شود. در مرحله بعد،



شکل ۴- فلوجارت روش تحقیق

Fig. 4- Flowchart of the methodology

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 EC مشاهده شده و محاسبه شده به دست می‌آید (رابطه ۱).

$$f_1 = 1 - \frac{\sum_1^n (EC_{obs_i} - EC_{est_i})^2}{\sum_1^n (EC_{obs_i} - \bar{EC}_{obs})^2} \quad (1)$$

در این رابطه، EC_{obs_i} مقدار پارامتر هدایت الکتریکی مشاهداتی در نقطه i ؛ EC_{est_i} هدایت الکتریکی محاسبه شده

استفاده می‌شود. در این راستا، روش درون‌یابی IDW مورد استفاده قرار گرفت. IDW با استفاده از نرم‌افزار GIS، مقادیر EC آب زیرزمینی را برای تمام نقاط پتانسیل در محدوده مورد مطالعه محاسبه می‌کند و EC در تمام محدوده به صورت گسسته و در نقاط با فاصله‌های مشخص برآورد می‌گردد. EC محاسبه شده، به صورت شبکه‌ای منظم با ۵۸۹ سلول به ابعاد ۲/۷ کیلومتر در ۲/۷ کیلومتر در محدوده ایجاد شد. در مسأله طراحی شبکه، این پایگاه داده به عنوان مقادیر مشاهداتی EC آب زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود.

مدل بهینه‌سازی: تعریف یک مدل طراحی شبکه پایش برای مسأله بهینه‌سازی ضروری است. مدل بهینه‌سازی

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 به‌دست آمده، زیرمجموعه‌ای از کروموزوم‌های جمعیت قبلی انتخاب و وارد نسل جدید می‌شود، که این فرآیند با استفاده از روش چرخه رولت^{۱۶} انجام می‌شود. بعد از این فرآیند، جواب‌های ممکن در جمعیت جدید بر اساس احتمال تقاطع (P_{score}) تعیین می‌شود. به‌طور معمول برای اجتناب از جواب‌های مشابه در نسل‌های متوالی، مقدار (P_{score}) را بالا در نظر می‌گیرند. مطالعات انجام شده در زمینه بهینه‌سازی آب‌های زیرزمینی نشان داد که به‌طور معمول این ضریب را بین ۰/۵ تا ۱ در نظر می‌گیرند. گام نهایی فرآیند جهش است که برای افزایش تنوع جمعیت با اصلاح جواب‌های قبلی بکار گرفته می‌شود. این فرآیند با استفاده از احتمال جهش (P_{mut}) کنترل می‌شود که برای حفظ تنوع ژنتیکی در جمعیت از یک نسل به نسل بعدی استفاده می‌شود. همانند (P_{score})، در صورتیکه (P_{mut}) بین ۰/۰۵ تا ۰/۲۵ باشد، تغییرات افزایشی به‌نسبت قوی در الگوریتم خواهد بود (Fisher, 2013; Ayvaz and Kentel, 2015). این مرحله‌ها تا زمانی که شرط توقف برقرار شود تکرار می‌شود. با توجه به موارد بیان 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.

نتایج و بحث

شکل ۵، همگرایی رسیدن به جواب بهینه در الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، مدل بهینه‌سازی پس از شروع فرآیند جستجو، بعد از ۱۰۰۰ نسل به جواب بهینه همگرا می‌شود. همچنین نتایج مدل برای مقادیر w کوچکتر از یک در جدول ۱ نشان داده شده است.

برای $w=0.1$ ، مقدار تابع هدف نهایی ۰/۹۶۵ به‌دست آمد که کارایی مدل نش- ساتکلیف ۰/۹۸۹ برآورد گردید. این نتایج با افزایش ۶/۳ درصدی از شبکه فعلی چاه‌های پایش

در نقطه i ؛ EC_{obs} ، میانگین هدایت الکتریکی مشاهداتی و n ، تعداد کل نقاط کیفی حوضه می‌باشد. در این بخش، ابتدا با استفاده از روش درون‌یابی IDW، مقادیر EC محاسبه‌ای و سپس با استفاده از مقادیر مشاهداتی موجود در پایگاه داده و رابطه ۱ مقادیر f_1 محاسبه می‌شود. تعداد چاه‌های شبکه نیز مشخص و به‌عنوان تابع هدف دوم معرفی می‌شود. لازم به بیان است که مقادیر f_1 بین ۱ تا $-\infty$ به‌دست می‌آید و هنگامی که مقدار f_1 برابر یک می‌شود، EC محاسبه‌ای با EC مشاهده‌ای برابر است. هنگامی که $f_1=1$ باشد، مدل از نظر عملکرد و دقت به بهترین جواب رسیده است. درحالی‌که، 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).

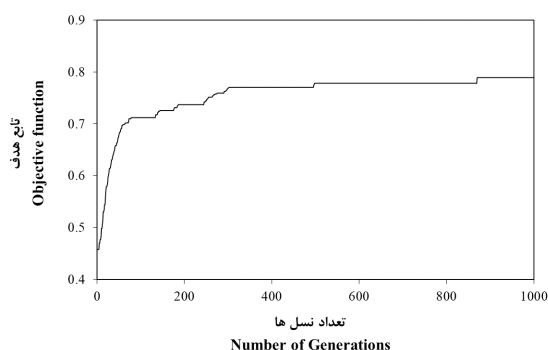
$$f_2 = \frac{\bar{n}}{n} \quad (2)$$

در این رابطه، \bar{n} ، تعداد چاه‌های انتخاب شده و n تعداد کل چاه‌های موجود در منطقه می‌باشد. با توجه به اینکه بیشترین مقدار هر دو تابع هدف یک است اما دارای ماهیت متفاوتی هستند. بنابراین با اعمال ضریب وزنی w ، هر دو هدف در یک تابع هدف به‌صورت 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 مرحله‌های اصلی یک مسأله بهینه‌سازی، بررسی محدودیت‌ها و محاسبه توابع هدف است. در بررسی محدودیت‌های مسأله 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 EC محاسبه شده در تمام نقاط پتانسیل به‌دست 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 به‌دست می‌آید.

بهینه‌سازی: پیاده‌سازی GA با تولید یک جمعیت از



شکل ۵- همگرایی رسیدن به جواب برای $w=1$
 Fig. 5- Convergence plots for $w=1$

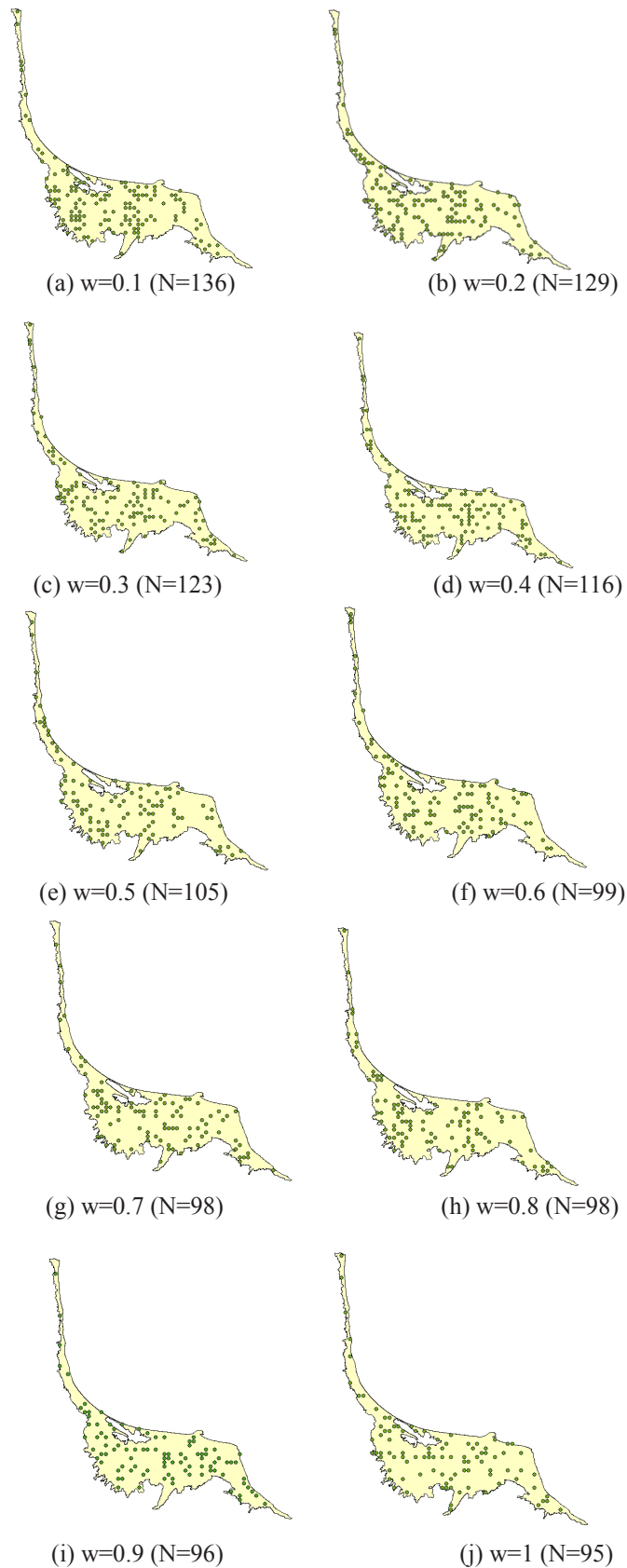
در هر دو وزن، یکسان و برابر ۹۸ به دست آمد. مقادیر Z و f_1 با افزایش مقادیر w از ۰/۷ به ۰/۸ کاهش می‌یابد، در حالی که مقدار f_2 ثابت باقی می‌ماند. این نتیجه نشان می‌دهد که برای وزن‌های ۰/۷ و ۰/۸، اگرچه تعداد چاه‌های منتخب یکسان است اما موقعیت‌های متفاوتی برای چاه‌ها تعیین می‌شود که منجر به کاهش کارایی مدل نش- ساتکلیف می‌شود. با توجه به نوع تابع هدف، برای مقادیر مشابه w ، هر چه تعداد چاه‌ها کمتر باشد، به همان نسبت، مقدار f_2 بی‌کی که به دست می‌آید اثر منفی بر روی مقادیر f_1 می‌گذارد. بنابراین مدل بهینه‌سازی در طول فرآیند بهینه‌سازی، برای اصلاح مقادیر f_1 ، تمایل به ثابت نگهداشتن تعداد چاه‌ها و جستجو برای تعیین موقعیت‌های بهتر چاه‌ها دارد (شکل‌های g و h شکل

به دست آمد. لازم به بیان است که تعداد چاه‌های موجود با توجه به آمار چاه‌های اندازه‌گیری شده در منطقه، ۱۲۸ در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج بیان شده در جدول ۱، با افزایش ضریب وزنی w ، مقدار تابع هدف کاهش می‌یابد. هنگامی که $w=0.1$ تا $w=1$ افزایش می‌یابد، مقدار تابع هدف از ۰/۹۶۵ تا ۰/۷۸۹ کاهش می‌یابد. همچنین، همین روند در مدل کارایی نش- ساتکلیف نیز دیده می‌شود که با افزایش وزن از ۰/۱ تا ۱، مقدار این ضریب از ۰/۹۸۹ تا ۰/۹۵۷ کاهش می‌یابد. هنگامی که $w=1$ است، تعداد چاه‌ها ۹۵ به دست آمد که این نتیجه با کاهش ۲۵/۸ درصدی شبکه فعلی چاه‌های پایش در منطقه به دست می‌آید. ارزیابی نتایج در وزن‌های ۰/۷ و ۰/۸ نشان می‌دهد که تعداد چاه‌های بهینه شبکه پایش

جدول ۱- نتایج به دست آمده برای $w \leq 1$

Table 1. Obtained results for $w \leq 1$

ضریب وزنی Weighting coefficient (w)	عملکرد مدل نش- ساتکلیف NS model Efficiency (f_1)	نسبت تعداد چاه‌های انتخاب شده به همه چاه‌های موجود در منطقه Ratio between the number of selected and all available monitoring wells (f_2)	تابع هدف Objective function (Z)	تعداد چاه‌های منتخب Number of selected wells (N)
0.1	0.989	0.240	0.965	136
0.2	0.984	0.228	0.939	129
0.3	0.980	0.217	0.915	123
0.4	0.978	0.205	0.896	116
0.5	0.977	0.185	0.884	105
0.6	0.976	0.175	0.871	99
0.7	0.974	0.173	0.853	98
0.8	0.971	0.173	0.833	98
0.9	0.966	0.169	0.814	96
1.0	0.957	0.168	0.789	95



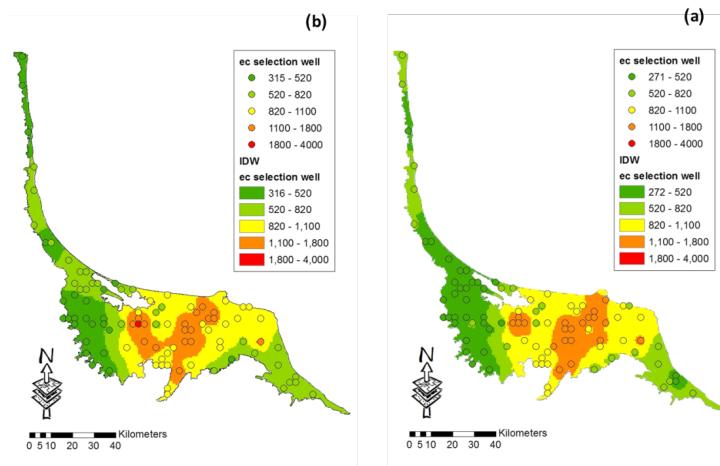
شکل ۶- موقعیت بهینه چاه‌های پایش برای $w \leq 1$
Fig. 6- Optimum locations of monitoring wells for $w \leq 1$

نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک در فرآیند بهینه‌سازی منجر به انتخاب چاه در موقعیت‌هایی شد که از نظر کیفی دارای وضعیت بحرانی‌تری بودند. بخش شرقی آبخوان فومنات، آبخوان آستانه-کوچصفهان و بخش غربی آبخوان چابکسر - لاهیجان نسبت به دیگر مناطق دارای مقادیر EC بالاتری هستند، بنابراین انتظار می‌رود تعداد پراکنش چاه‌ها در این نواحی به اندازه کافی باشد. افزون بر این، تعداد چاه‌های پایش انتخاب شده در اطراف تالاب انزلی نسبت به شرایط موجود خیلی بیشتر شده است.

نتایج به‌دست آمده برای وزن‌های متفاوت و در محدوده وسیعتری بین ۰/۰۱ و ۱۰۰۰ در جدول ۲ آورده شده است. افزون بر این، نمودار همگرایی اجرای مدل بهینه‌سازی برای

۶. بررسی موقعیت چاه‌های پایش در شکل ۶ برای وزن‌های مختلف نشان می‌دهد که پراکندگی چاه‌ها در منطقه، در همه وزن‌ها دارای پوشش مناسبی است، به طوری که، مقایسه شبکه چاه‌های بیان شده در شکل‌های g و h شکل ۶ نشان می‌دهد که موقعیت چاه‌ها در این روش دارای توزیع مکانی متفاوتی است، حتی اگر تعداد چاه‌ها ثابت باشد. با این وجود، با مقایسه مقادیر هدایت الکتریکی (EC) در این دو شبکه که در جدول ۳ آورده شده است، می‌توان شبکه مناسب را انتخاب نمود. لازم به بیان است که جزئیات بیشتر در این راستا، در بخش مربوطه مطرح می‌گردد.

نقشه درون‌یابی شده مقادیر EC آب زیرزمینی برای $w=1$ در شکل ۷ آورده شده است. نحوه توزیع چاه‌ها در این شکل



شکل ۷- نقشه EC درون‌یابی شده با استفاده از چاه‌های پایش انتخاب شده در مدل بهینه‌سازی در (a) شهر یور ۱۳۹۵ (b) اسفند ۱۳۹۴ ($w=1$)
Fig. 7- Interpolation map of EC with monitoring wells selected by the optimization in (a): September 2017 and (b): March 2017 ($w=1$)

برای تابع هدف کلی نتیجه می‌دهد. با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول ۲، مقدار تابع هدف نهایی برای $w=0.01$ ، $w=0.996$ به دست آمد که متناظر با آن کارایی مدل نش- ساتکلیف ۱/۰۰ برآورد گردید. این نتایج با انتخاب ۲۱۶ چاه پایش به دست آمد. این نتیجه نشان می‌دهد که با کاهش مقدار w به ۰/۰۱، تعداد چاه‌های پایش نسبت به شبکه چاه‌های موجود ۶۸/۸ درصد افزایش می‌یابد. در وزن‌های ۰/۶ تا ۱، تعداد چاه‌های منتخب در شبکه پایش کمابیش یکسان است. اما هنگام افزایش ۱۰ برابری وزن‌ها چنین رفتار مشابهی دیده نشده و تعداد چاه‌ها با افزایش وزن‌ها در بازه ۱۰ تا ۱۰۰۰، کاهش

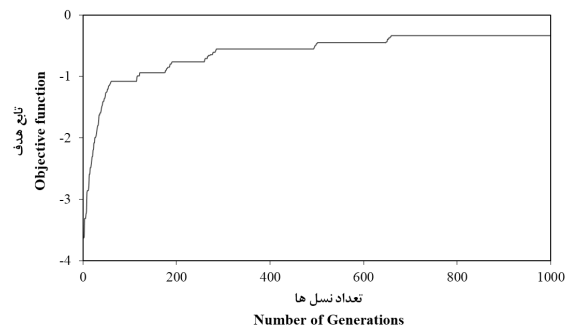
$w=10$ نیز در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که در شکل نشان داده شده است، روند همگرایی $w=10$ مشابه نتایج به دست آمده در $w=1$ بیان شده در شکل ۵ است. فرآیند بهینه‌سازی در هر دو نمودار همگرایی شکل‌های ۵ و ۸، با انتخاب تعداد بیشتری از چاه‌ها در منطقه شروع می‌شود و به تدریج با تکامل GA، تعداد آن‌ها کاهش می‌یابد و به یک مقدار ثابتی همگرا می‌شود. تفاوت اصلی این دو نمودار در این است که در $w=10$ ، مقدار تابع هدف منفی نیز به دست می‌آید. تخصیص وزن بیشتر به تابع Z_2 منجر به افزایش قابل ملاحظه عبارت دوم تابع هدف Z نسبت به عبارت اول می‌شود که در نهایت مقادیر منفی را

جدول ۲- نتایج به‌دست آمده برای مقادیر مختلف w
 Table 2. Obtained results for different w values

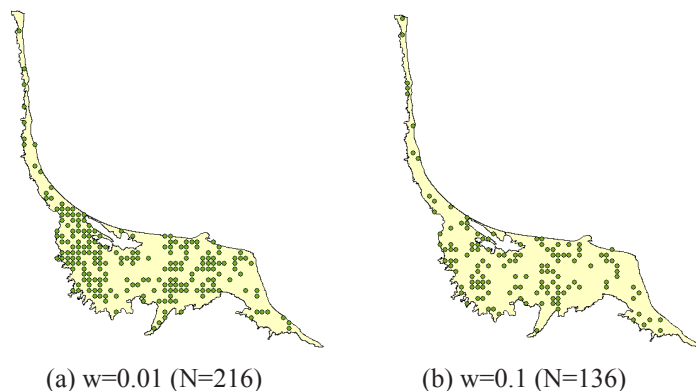
ضریب وزنی Weighting coefficient (w)	عملکرد مدل نش- ساتکلیف NS model efficiency (f_1)	نسبت تعداد چاه‌های انتخاب شده به همه چاه‌های موجود در منطقه Ratio between the number of selected and all available monitoring wells (f_2)	تابع هدف Objective function (Z)	تعداد چاه‌های منتخب Number of selected wells (N)
0.01	1.0	0.381	0.996	216
0.1	0.989	0.240	0.965	136
1	0.957	0.168	0.789	95
10	0.936	0.127	-0.334	72
100	0.869	0.113	-10.419	64
1000	0.765	0.090	-89.182	51

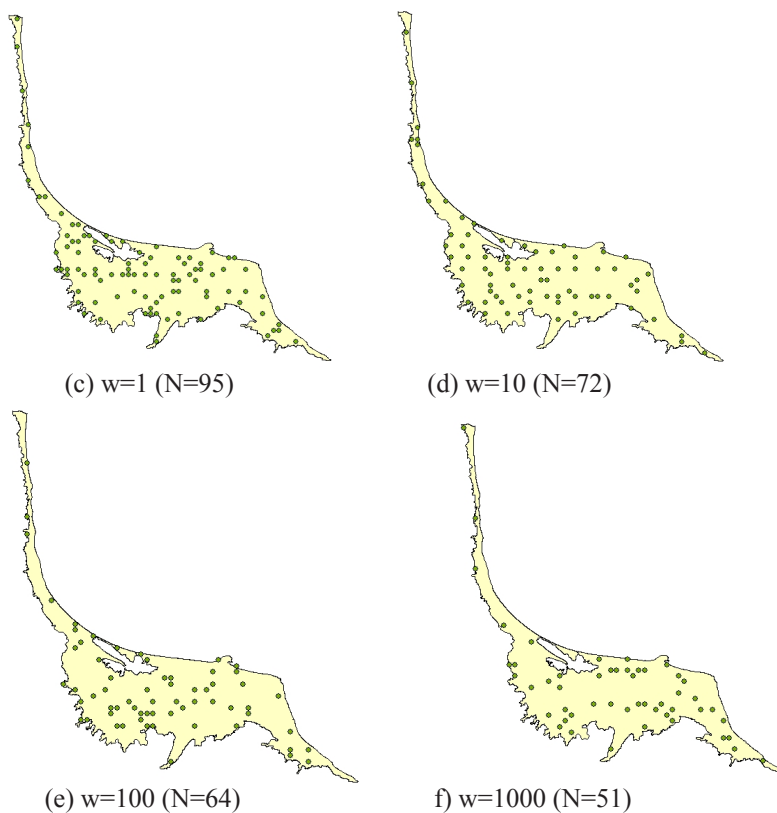
حالت $w=10$ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، پراکنش چاه‌ها در نواحی بحرانی‌تر مناسب است. در مجموع با توجه به کاهش تعداد چاه‌ها در $w=10$ نسبت به $w=1$ ، توزیع چاه‌ها در نقاط حساس با توجه به نقشه درون‌یابی EC موفق بوده است. در این مرحله، نتایج به‌دست آمده از وزن‌های مختلف برای انتخاب وزن مناسب و تعداد چاه‌های متناظر با آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد، هنگامی که

قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. به‌عنوان نمونه، هنگامی که $w=10$ باشد، تعداد چاه‌های پایش ۷۲ است، در حالی که، با $w=100$ ، تعداد چاه‌های پایش به ۶۴ رسید. مقایسه مقادیر کارایی مدل نش- ساتکلیف در این مورد نشان داد که با افزایش وزن از $w=10$ به $w=100$ ، مقدار این کارایی از ۰/۹۳۶ به ۰/۸۶۹ کاهش می‌یابد. نحوه توزیع چاه‌های منتخب در حالت افزایش ۱۰ برابری وزن‌ها در شکل ۹ آورده شده است. به‌عنوان نمونه، نقشه درون‌یابی شده EC، با توجه به چاه‌های انتخاب شده در

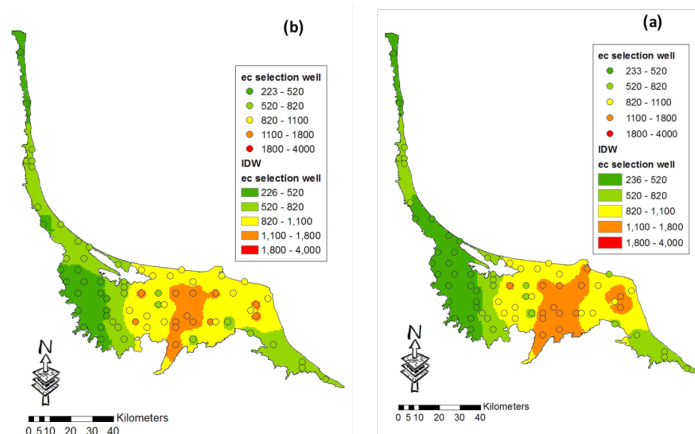


شکل ۸- همگرایی رسیدن به جواب برای $w=10$
 Fig. 8- Convergence plots for $w=10$





شکل ۹- موقعیت بهینه چاه‌های پایش برای وزن‌های مختلف
Fig. 9- Optimum locations of monitoring well for different w values



شکل ۱۰- نقشه EC درون‌یابی شده با استفاده از چاه‌های پایش انتخاب شده در مدل بهینه‌سازی در (a) شهریور ۱۳۹۵ (b) اسفند ۱۳۹۴ ($w=10$)

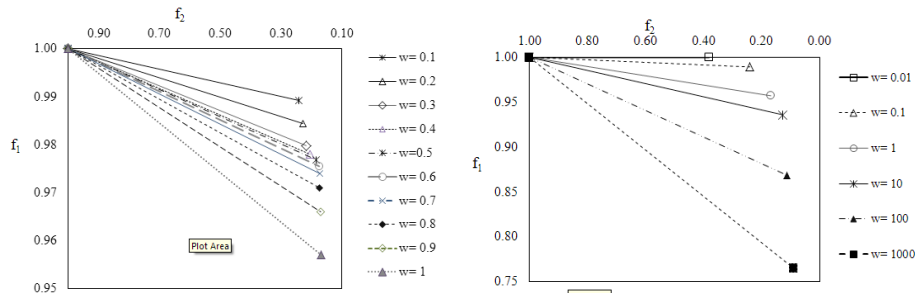
Fig. 10- Interpolation map of EC with monitoring wells selected by the optimization in (a): September 2017 and (b): March 2017 ($w=10$)

است اما دقت نتایج ارزیابی کیفی منطقه نسبت به واقعیت پایین خواهد بود. برای افزایش این دقت، با توجه به نتایج جدول ۱، بهتر است وزن‌ها در محدوده بین $0/6$ تا ۱ انتخاب شود، زیرا در این وزن‌ها مقدار کارایی مدل نش- ساتکلیف نیز مطلوب است. Trade-off بین توابع f_1 و f_2 برای وزن‌های

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 (f_1) مقایسه می‌گردد، کاهش می‌یابد. بنابراین، اگرچه کاهش تعداد چاه‌ها از نظر اقتصادی به صرفه

اقتصادی پایینتر و انتخاب تعداد کمتری از چاه‌ها است. اعتبارسنجی نتایج: اعتبارسنجی این اطمینان را ایجاد می‌کند که شبکه پایش بهینه دقت کافی را برای مجموعه داده‌های مختلف ندارد. در این مرحله ضریب کارایی نش-

مختلف در شکل ۱۱ نشان داده شده است. به‌طور کلی، برای وزن‌های کوچکتر از یک جواب‌ها بیشتر متمایل به سمت هزینه بیشتر و انتخاب تعداد چاه‌های بیشتر است و برای وزن‌های بزرگتر از یک جواب‌ها بیشتر متمایل به سمت هزینه

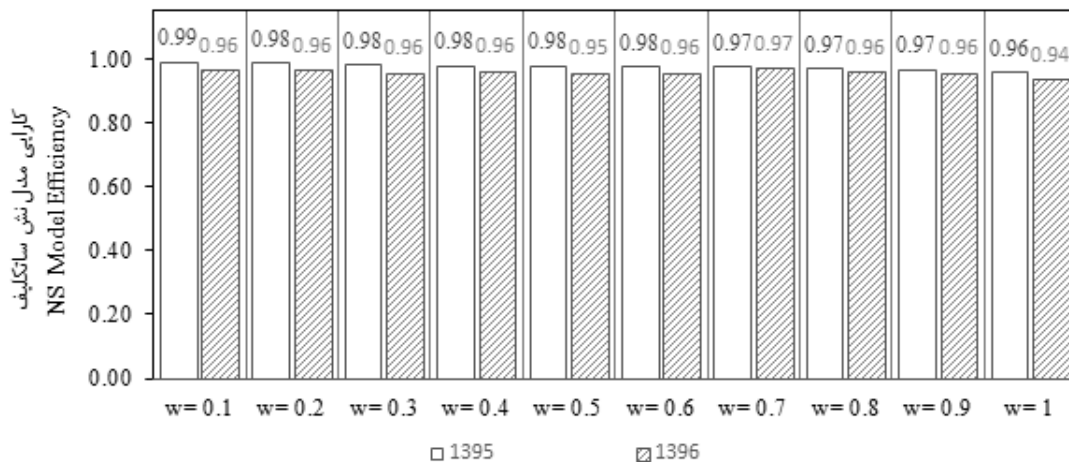


شکل ۱۱- trade-off بین f_1 و f_2
Fig. 11- Trade-off between f_1 and f_2

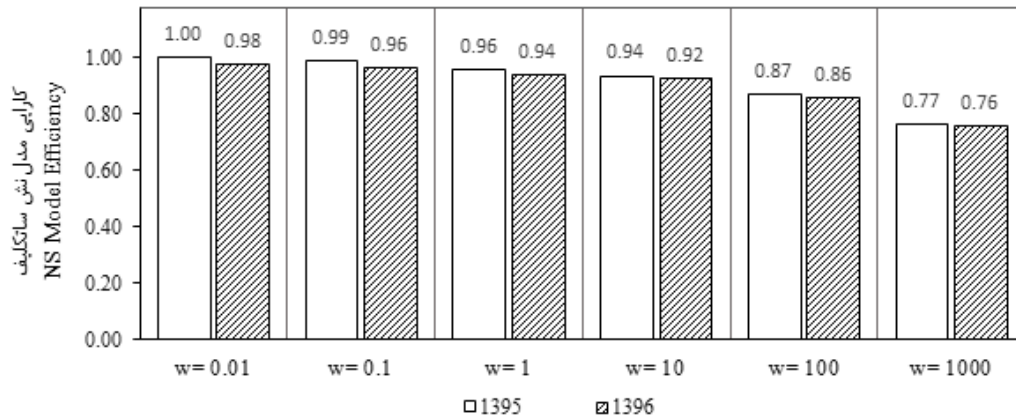
شکل ۱۳ نتایج مدل در دوره بهینه‌سازی و اعتبارسنجی برای ضرایب وزنی ۰/۰۱، ۰/۱، ۱، ۱۰ و ۱۰۰ در کلاس "خوب" قرار می‌گیرد و هر دو دوره در دیگر وزن‌های مطرح شده در شکل ۱۲ در کلاس "خیلی خوب" قرار می‌گیرد. برای اطمینان بیشتر از نتایج اعتبارسنجی، از سنج‌های دیگری از قبیل درصد بایاس^{۱۷} (PBIAS)، جذر میانگین مربعات خطا^{۱۸} (RMSE)، ضریب همبستگی (r) و انحراف معیار (s) نیز برای ارزیابی عملکرد مدل استفاده می‌شود. در ادامه، معادله هر یک از این سنج‌ها در رابطه‌های (۴) تا (۷) آورده شده است.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (EC_{est_i} - EC_{obs_i})}{\sum_{i=1}^n EC_{obs_i}} \times 100 \quad (4)$$

ساتکلیف توزیع EC را برای سال آبی ۹۶-۱۳۹۵ نشان می‌دهد. (Moriassi et al. (2007) طبقه‌بندی توصیفی ضریب نش- ساتکلیف را با بررسی مطالعات مختلف مدل‌سازی در مقیاس حوضه آبریز بیان نمودند. با توجه به طبقه‌بندی آن‌ها، مقدار معیار نش- ساتکلیف بین ۰/۷۵ تا ۱ در کلاس "خیلی خوب"، ۰/۶۵ تا ۰/۷۵ در کلاس "خوب"، ۰/۵ تا ۰/۶۵ در کلاس "قابل قبول" و کوچکتر از ۰/۵ در کلاس "غیرقابل قبول" قرار دارد. بر این اساس، نتایج مدل بهینه‌سازی در دوره بهینه‌سازی (سال ۹۵ - ۱۳۹۴) و اعتبارسنجی (سال ۹۶ - ۱۳۹۵)، هنگامی که ضریب وزنی w بین ۰/۱ تا ۱ انتخاب شود، در کلاس "خیلی خوب" قرار می‌گیرد. همچنین با توجه به نتایج بیان شده در



شکل ۱۲- اعتبارسنجی شبکه چاه‌های بهینه برای وزن‌های مختلف
Fig. 12- Verification of the identified well network for different w values



شکل ۱۳- اعتبارسنجی شبکه چاه‌های بهینه برای وزن‌های مختلف
 Fig. 13- Verification of the identified well network for different w values

این مقادیر در دوره اعتبارسنجی بیشتر از دوره بهینه‌سازی برآورد شده است. این می‌تواند به این دلیل باشد که در دوره اعتبارسنجی از شبکه چاه‌های شناسایی شده به‌طور مستقیم و بدون بهینه‌سازی استفاده می‌شود. با توجه به مطالعات Singh *et al.* (2004)، در صورتیکه مقادیر RMSE جوابی کوچکتر از نصف s باشد، آن راه‌حل می‌تواند به‌عنوان راه‌حلی با خطای کمتر طبقه بندی شود. در این راستا، با در نظر گرفتن مقادیر s به‌دست آمده، مقایسه این نسبت در دو دوره بهینه‌سازی و اعتبارسنجی نشان داد که همه وزن‌ها، این شرایط برقرار است، بنابراین جواب‌های حاصل دارای خطای کمی هستند. 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 به‌دست آمده برای وزن‌های مختلف و برای هر دو دوره بهینه‌سازی و اعتبارسنجی بزرگتر از ۰/۹۷ است و همچنین همه موارد دارای تخمین‌های قابل قبولی هستند.

در ادامه، تغییرات مقادیر میانگین EC در دو دوره بهینه‌سازی و اعتبارسنجی در جدول ۵ آورده شده است. مقایسه مقادیر جدول ۵ نشان می‌دهد که با کاهش تعداد چاه‌های پایش، میانگین EC افزایش و با افزایش تعداد چاه‌های پایش، میانگین EC کاهش می‌یابد. این موضوع تأیید کننده این مطلب است که مدل بهینه‌سازی در فرآیند جستجو، ابتدا نقاط واقع در منطقه‌های با EC بالاتر را انتخاب می‌کند و سپس، نقاطی را که دارای EC کمتری هستند، برمی‌گزیند. بنابراین با رعایت توزیع مکانی چاه‌ها و صرفه اقتصادی بهتر

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (EC_{est_i} - EC_{obs_i})^2} \quad (5)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(EC_{est_i} - \overline{EC}_{est}) \times (EC_{obs_i} - \overline{EC}_{obs})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (EC_{est_i} - \overline{EC}_{est})^2 \times \sum_{i=1}^n (EC_{obs_i} - \overline{EC}_{obs})^2}} \quad (6)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (EC_{est_i} - \overline{EC}_{est})^2} \quad (7)$$

نتایج به‌دست آمده از معادلات (۴) تا (۷) در جدول‌های ۳ و ۴ آورده شده است. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، مقادیر PBIAS در دوره بهینه‌سازی بین وزن‌های مختلف از ۰/۲۵- برای w=0.3 تا ۱/۵۹۰ برای w=1 تغییر می‌کند و در دوره اعتبارسنجی این مقادیر بین ۰/۱۷۶- برای w=0.3 تا ۰/۶۲ برای w=0.6 تغییر می‌کند. PBIAS، میزان میانگین انحراف مقادیر محاسبه‌شده را نسبت به مقادیر مشاهده‌شده بر حسب درصد نشان می‌دهد. به‌طوریکه، هر چه مقدار آن به صفر نزدیکتر باشد، اختلاف کمتر بین مقادیر محاسبه‌ای و مشاهده‌ای را نشان می‌دهد. بنابراین، با توجه به مقادیر به‌دست آمده، به استثنای چند مورد در بقیه موارد مقادیر محاسبه شده بیشتر از مقادیر مشاهده‌ای بوده است. همچنین نتایج حاصل از دوره اعتبارسنجی اختلاف قابل ملاحظه‌ای با مقادیر به‌دست آمده در دوره بهینه‌سازی ندارد. Moriasi *et al.* (2007) در 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 به‌دست آمده در این مطالعه، تخمین‌ها بسیار خوب بوده است. به‌همین ترتیب، مقایسه مقادیر RMSE برای وزن‌های مختلف در دوره بهینه‌سازی و اعتبارسنجی نشان می‌دهد

جدول ۳- اعتبارسنجی نتایج مدل برای $w \leq 1$
 Table 3. Verification of the model results for $w \leq 1$

ضریب وزنی Weighting coefficient (w)	بهینه‌سازی Optimization				اعتبارسنجی Verification			
	PBIAS	RMSE	r	s	PBIAS	RMSE	r	s
0.1	0.351	48.069	0.995	453.283	0.004	78.502	0.983	395.912
0.2	0.892	58.379	0.993	453.653	0.158	79.456	0.984	395.956
0.3	-0.250	61.058	0.990	417.473	-0.176	83.052	0.979	370.117
0.4	-0.082	69.089	0.990	438.852	-0.174	84.457	0.982	395.383
0.5	0.653	72.911	0.989	456.989	-0.055	90.976	0.978	400.478
0.6	0.112	70.230	0.989	427.024	0.620	86.799	0.979	383.588
0.7	0.676	64.938	0.990	434.924	0.570	70.205	0.986	396.603
0.8	0.305	55.787	0.992	435.499	0.199	79.400	0.980	373.434
0.9	0.808	70.201	0.988	417.575	0.254	82.397	0.978	370.589
1.0	1.590	99.834	0.980	451.786	0.236	119.148	0.972	416.938

جدول ۴- اعتبارسنجی نتایج مدل برای وزن‌های مختلف
 Table 4. Verification of the model results for different w values

ضریب وزنی Weighting coefficient (w)	بهینه‌سازی Optimization				اعتبارسنجی Verification			
	PBIAS	RMSE	r	s	PBIAS	RMSE	r	s
0.01	0.379	39.798	1.00	451.213	-0.098	59.187	0.990	392.945
0.1	0.351	48.069	0.995	453.283	0.004	78.502	0.983	395.912
1	1.590	99.834	0.980	451.786	0.236	119.148	0.972	416.938
10	0.146	111.035	0.969	401.636	-0.507	108.103	0.966	384.567
100	3.580	155.463	0.936	402.003	2.355	147.919	0.940	383.908
1000	-0.615	108.247	0.930	375.150	0.597	109.648	0.961	352.969

جدول ۵- تغییرات مقادیر میانگین EC در چاه‌های پایش کیفی (واحد: $\mu\text{Siemens/cm}$)
 Table 5. Changes of mean EC values in monitored groundwater quality (unit: $\mu\text{Siemens/cm}$)

سال آبی Year	دوره Period	بدون بهینه‌سازی Without optimization		بهینه‌سازی با وزن‌های مختلف Optimization using different weights					
		-		w = 0.01	w = 0.1	w = 0.5	w = 1	w = 10	w = 100
		n= 128		n= 216	n= 136	n= 105	n= 95	n= 72	n= 64
1394-95	1	780.21	747.45	791.07	775.81	790.60	758.52	743.99	
	2	786.30	768.66	796.70	788.87	789.40	771.57	776.81	
1395-96	1	803.47	885.22	824.32	837.20	848.42	814.47	791.84	
	2	810.66	786.88	815.69	814.02	814.15	807.07	795.75	

توزیع بهینه چاه‌های پایش نمی‌شود. بنابراین استفاده از روش بهینه‌سازی برای کاهش اطلاعات اضافی و یا افزایش اطلاعات در نقاط گم شده یا پرت منطقه مورد مطالعه، راه‌حلی موثر در طراحی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی است. با توجه به موارد بیان شده، هدف این مطالعه، طراحی بهینه شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی با فرض موجود بودن شبکه پایش فعلی در منطقه است. برای رسیدن به این هدف،

است وزنی انتخاب گردد که EC بالاتری دارد.

نتیجه‌گیری

شبکه‌های پایش آب زیرزمینی به‌طور معمول با رعایت توزیع همگن چاه‌های پایش در منطقه طراحی می‌شود. با این حال، به‌دلیل اینکه ممکن است در توزیع چاه‌ها در منطقه برخی از نقاط در نظر گرفته نشود یا در بعضی از مناطق داده‌ها اضافی و تکراری باشد، این رویکرد همیشه منجر به

این چاه‌ها در منطقه‌های مهم و بحرانی مانند نقاطی که دارای کیفیت نامناسبتری هستند انتخاب شود. بنابراین در ارزیابی نتایج مدل بهینه‌سازی، شبکه‌ای از چاه‌ها مناسبتر است که داده‌های کیفی آب زیرزمینی را در مناطق آلوده‌تر بهتر منعکس کند. مقایسه میانگین مقادیر EC مشاهده شده در منطقه و EC 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 به‌وضوح 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 به‌صورت هر چند سال یک بار، در تعیین ارزیابی درازمدت کیفیت آب زیرزمینی و عامل‌های موثر در آن کمک می‌کند که می‌تواند در برنامه‌ریزی و اعمال روش‌هایی برای بهبود کیفیت آب زیرزمینی موثر باشد. در این نوع روش‌های بهینه‌سازی بهتر است از تصمیم‌گیری‌های فردی اجتناب شود و از معیارهای عملکردی مانند RMSE، PBIAS و غیره استفاده گردد، اگر از چنین معیارهایی برای ارزیابی عملکرد جواب‌های بهینه استفاده شود دیگر نیازی به استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری پیچیده مانند روش‌های نمونه‌گیری بالا، مکعب لاتین^{۱۱} و نمونه‌گیری اهمیت^{۱۲} برای کاهش واریانس نخواهد بود.

پی‌نوشت‌ها

¹ Electrical conductivity

² Genetic Algorithm

³ Nash-Sutcliffe

⁴ Hydrogeological method

⁵ Inverse Distance Weighting

⁶ Monte Carlo

⁷ Kalman filter

⁸ Support Vector Machine

⁹ Regression Vector Machine

¹⁰ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

¹¹ Total Dissolved Solids

¹² Chlorine

¹³ Selection

مجموعه داده‌های سال آبی ۹۵ - ۱۳۹۴ برای بهینه‌سازی و سال آبی ۹۶ - ۱۳۹۵ برای انجام فرآیند اعتبارسنجی استفاده گردید.

رویکرد مورد استفاده در این مطالعه، با بررسی شرایط موجود در شبکه پایش، آن را برای کاهش یا افزایش چاه‌های پایش در منطقه طراحی می‌کند. به این معنی که یک سری از چاه‌ها در منطقه غیرفعال می‌شوند و چاه‌هایی نیز به منطقه اضافه می‌شوند. بدیهی است که کاهش یا افزایش تعداد چاه‌های پایش در شبکه سبب کاهش یا افزایش هزینه می‌شود که با اعمال تابع هدف اقتصادی در تابع هدف اصلی، هزینه‌ها در تعیین جواب بهینه اعمال می‌شود. با توجه به نتایج بهینه‌سازی، حذف بعضی از چاه‌ها از برنامه نمونه‌برداری، موقتی است زیرا ممکن است در آینده شرایطی ایجاد شود که از نظر کیفی مناطقی بحرانی شوند و نیاز به چاه‌های بیشتری در آن مناطق باشد بنابراین بهتر است فرآیند طراحی شبکه پایش به‌صورت دوره‌ای و چند سال یک بار با توجه به شرایط کیفی موجود طراحی شود. با توجه به موارد بیان شده، 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 گردید در مدل بهینه‌سازی، افزون 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.

نتایج ارزیابی وزن‌های مختلف در تعیین جواب بهینه نشان داد که جواب بهینه وابستگی زیادی به انتخاب w دارد بنابراین باید مقدار w با توجه به متعادلترین جواب انتخاب شود. متعادلترین جواب به این معناست که بین هزینه و پراکنش مکانی چاه‌ها در منطقه دارای یک Trade-off قابل قبولی باشد. برای انتخاب مناسب جواب بهتر است افزون بر استفاده از ضریب کارایی نش - ساتکلیف از سنج‌های عملکرد دیگری مانند RMSE، PBIAS و ضریب رگرسیون نیز استفاده شود. با توجه به اینکه چه وزنی انتخاب می‌شود، شبکه‌های بهینه پایش کیفی آب زیرزمینی با تعداد چاه‌های متفاوت ایجاد می‌شود. در طراحی توزیع مکانی چاه‌های پایش بهتر است

¹⁴ Crossover¹⁵ Mutation¹⁶ Roulette Wheel¹⁷ PBIAS¹⁸ Root Mean Square Error¹⁹ Latin Hypercube Sampling²⁰ Importance Sampling

منابع

Aboutalebi, M., Bozorg-Haddad, O. and Loáiciga, H.A., 2016. Multiobjective design of water-quality monitoring networks in river-reservoir systems. *Journal of Environmental Engineering*. 143, 04016070.

Al-Zahrani, M.A. and Moied, K., 2003. Optimizing water quality monitoring stations using genetic algorithms. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 28, 57–75.

Arora, J.S., 2004. *Introduction to Optimum Design*. Elsevier Academic Press, San Diego, CA, USA.

Asefa, T., Kemblowski, M.W., Urroz, G., McKee, M. and Khalil, A., 2004. Support vectors-based groundwater head observation networks design. *Water Resources Research*. 40, W11509.

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.

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, 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, S.N. and Kerachian, R., 2010. Locating monitoring wells in groundwater systems using embedded optimization and simulation models. *Science of the Total Environment*. 408, 2189–2198.

Bateni, S.M., Mortazavi-Naeini, M., Ataie-Ashtiani, B., Jenga, D.S. and Khanbilvardifi, R., 2015. Evaluation of methods for estimating aquifer hydraulic parameters. *Applied Soft Computing*. 28, 541-549.

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.

Cieniawski, S.E., Eheart, J.W. and Ranjithan, S., 1995. Using genetic algorithm to solve a multiobjective groundwater monitoring problem. *Water Resources Research*. 31, 399–409.

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, 88–94.

Dhar, A. and Patil, R.S., 2012. Multiobjective design of groundwater monitoring network under epistemic uncertainty. *Water Resources Management*. 26, 1809–1825.

Dieng, N.M., Orban, P., Otten, J., Stumpp, C., Faye, S. and Dassargues, A., 2017. Temporal changes in groundwater quality of the Saloum coastal aquifer. *Journal of Hydrology*. 163, 163-182.

Fisher, J.C., 2013. Optimization of water-level monitoring networks in the eastern Snake River Plain aquifer.

- uifer using a kriging-based genetic algorithm method. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2013-5120 (DOE/ID-22224), Reston, VA, USA.
- Ganji-Khorramdel, N. and Keykhaei, F., 2017. Optimal design of observation wells in a groundwater monitoring network using Meta-Heuridtic genetic algorithm. *Journal of Watershed Management Research*. 7, 159-166.
- 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.
- Holland, J., 1973. Genetic algorithms and the optimal allocation of trials. *SIAM Journal on Computing*. 2, 88-105.
- 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, 785-794.
- Loaiciga, H.A., Charbeneau, R.J., Everett, L.G. and Fogg, G.E., 1992. Review of ground-water quality monitoring network design. *Journal of Hydraulic Engineering*. 118, 11-37.
- 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.
- McKinney, D.C. and Lin, M.D., 1994. Genetic algorithm solution of groundwater management models. *Water Resources Research*. 30, 1897-1906.
- 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.
- Mirzaie-Nodoushan, F., Bozorg-Haddad, O. and Loaiciga, H.A., 2017. Optimal design of groundwater-level monitoring networks. *Journal of Hydroinformatics*. 19, 920-929.
- Mogheir, Y., de 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., Binger, 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, 885-900.
- Raynauld, M., Peel, M., Lefebvre, R., Molson, J.W., Crow, H., Ahad, J.M.E., Ouellet, M. and Aquilina, L., 2016. Understanding shallow and deep flow for assessing the risk of hydrocarbon development to groundwater quality. *Marine and Petroleum Geology*. 78, 728-737.
- Rosen, M.R., 1997. The National Groundwater Monitoring Network (NGMP): structure, implementation and preliminary results. Institute of Geological and Nuclear Sciences Limited, New Zealand.
- 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.
- Singh, J., Knapp, H.V. and Demissie, M., 2004. Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. ISWS CR 2004-08. Champaign, Ill.:

Illinois State Water Survey, USA.

Van Liew, M.W., Arnold, J.G. and Garbrecht, J.D., 2003. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: choosing between models. *Trans. ASAE*. 46, 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, C., Wu, X., Qian, C. and Zhu, G., 2018. Hydro-geochemistry and groundwater quality assessment of high fluoride levels in the Yanchi endorheic region, northwest China. *Applied Geochemistry*. 98, 404-417.

Wu, J., Zheng, C. and Chien, C.C., 2005. Cost-effec-

tive sampling network design for contaminant plume monitoring under general hydrogeological conditions. *Journal of contaminant Hydrology*. 77, 41–65.

Yakirevich, A., Pachepsky, Y.A., Gish, T.J., 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. *Metaheuristics in Water*. Geotechnical and Transport Engineering, First ed. Elsevier, Amsterdam.

Yeh, M.S., Lin, Y.P. and Chang, L.C., 2006. Designing an optimal multivariate geostatistical groundwater quality monitoring network using factorial kriging and genetic algorithms. *Environmental Geology*. 50, 101–121.





Environmental Sciences Vol.18/ No.2/ Summer 2020

19-40

Designing an optimal groundwater quality monitoring network using a genetic algorithm-based optimization approach (case study: Guilan's aquifer)

Somaye Janatrostami* and Ali Salahi

Department of Water Engineering, College of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

Received: 2019.01.11 Accepted: 2019.07.31

Janatrostami, S. and Salahi, A., 2020. Designing an optimal groundwater quality monitoring network using a genetic algorithm-based optimization approach (case study: Guilan's aquifer). *Environmental Sciences*. 18(2): 19-40.

Introduction: Spatial distribution and accuracy of groundwater quality data are required for the management of groundwater resources. These data are usually collected from monitoring wells, which are spatially distributed in the studied aquifer. In the design of a monitoring network, the minimum number of monitoring wells with an optimum spatial distribution is necessary to ensure cost-efficiency. Therefore, the configuration of the wells' distribution and their number in groundwater monitoring networks are important in groundwater optimization. This study aimed to find an optimal monitoring network with a minimum number of wells in the Guilan's aquifer so that it can provide sufficient spatial distribution in terms of groundwater quality. Salinity is one of the most important criteria for the quality of groundwater, and so electrical conductivity (EC) was selected as a quality parameter in the design of the monitoring network in this study.

Material and methods: Genetic optimization algorithm (GA) was used to search for optimal quality monitoring network. In this method, a possible network of monitoring wells located in the aquifer was considered for each "chromosome". Then each monitoring well in this network was represented by a binary bit. Finally, they were coded by bit value equal to 1 for the well that was selected for the network or by bit values equal to 0 for the well that was not selected for the network. In this paper, two conflicting objective functions were simultaneously solved. The first objective function was the maximization of the match between the interpolated EC distributions obtained from data of all available monitoring wells and the wells from the newly generated network. The match was evaluated using the Nash-Sutcliffe (NS) model efficiency. The second objective was the minimization of the number of monitoring wells in the newly generated network by considering cost-related constraints. These two objectives were integrated into a single objective function where different combinations of both objectives were investigated by considering two cases.

Results and discussion: The results showed that the relative importance of each objective was expressed using

*Corresponding Author. *Email Address:* janatrostami@guilan.ac.ir

the weighting coefficient (w). It was shown that the solution of the optimization was strongly dependent on the selection of w . Therefore, a w -value resulted from the most balanced solution should be selected. The most balanced solution was when there was a correlation between cost and spatial distribution. To choose the best solution, it is highly recommended to evaluate additional performance indicators besides NS coefficient such as the RMSE, PBIAS, regression coefficient, and standard deviation. Additionally, the mean values of EC observed in the optimized network were higher than those in all monitoring wells. Therefore, it could be clearly concluded that the optimized network provided groundwater quality data from more polluted areas.

Conclusion: The results showed that the optimization approach significantly reduced the number of monitoring wells with the spatial distribution of the EC values. Additionally, the monitoring network was optimized to remove sampling points from less polluted areas and select those in more polluted areas. The optimal design of the monitoring network should be performed periodically. Since monitoring efficiency is expected to change when the data of the new wells become available, a re-evaluation of the optimized monitoring network considering the addition of new wells every few years may help the determination of the long-term effectiveness of a groundwater quality monitoring program.

Keywords: Quality management, Monitoring network, Groundwater, Optimization, Genetic algorithm.