نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۶، مهر - آبان ۱۴۰۱، ص. ۷۸۸-۷۷۷

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.4, Vol. 16, Oct.-Nov. 2022, p. 777-788

مقاله علمی-پژوهشی

شناسایی شبکه بهینه پایش کیفی آب‌زیرزمینی با استفاده از الگوریتم جستجوی ممنوع (مطالعه موردی حوضه آبریز نیشابور)

محمد حسن مؤیدیان[۱]، علی اصغر بهشتی[۲*]، علی نقی ضیائی[۳]، رضا قنبری[٤]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۶

چکیده

مدیریت آب‌زیرزمینی نیازمند پایش دقیق کمی و کیفی آب‌زیرزمینی با توزیع مناسب مکانی و زمانی است. حداقل نمودن تعداد چاه‌های پایش با حداکثر توزیع مکانی برای اقتصادی کردن پایش سامانه‌های آب‌زیرزمینی، مورد نیازمدیران می‌باشد. بنابراین ساختار شبکه‌های پایش آب‌زیرزمینی و تعداد چاه‌های مورد نیاز به یک مسئله بهینه‌سازی مهندسی تبدیل می‌شود. هدف از این پژوهش یافتن شبکه‌های نماینده پایش بهینه با کمترین تعداد چاه که پوشش کافی برای شناخت کیفیت آب‌زیرزمینی در یک منطقه ایجاد کند، می‌باشد. با استفاده از این روش چاه‌های مازاد در شبکه شناسایی می‌شود. برای انجام این پژوهش از الگوریتم فرا ابتکاری جستجوی ممنوع استفاده شده است. تابع هدف در این پژوهش از دو هدف متقابل به هم تشکیل شده است. هدف اول حداکثرسازی تطابق بین توزیع شاخص کیفیت آب درونیابی شده در دو حالت با در نظر گرفتن تمام چاه های موجود و چاه‌های انتخاب شده از شبکه موجود می‌باشد. معیار ارزیابی این تطابق مدل نش-ساتکلیف می‌باشد. در این پژوهش کیفیت آب‌زیرزمینی با استفاده از یک شاخص کیفی آب که شامل ۹ پارامتر کیفی است بیان شده است. هدف دوم حداقل کردن تعداد چاه‌های پایش انتخاب شده برای اقتصادی کردن هزینه پایش در نظر گرفته شده است. دو هدف با استفاده از ضریب وزنی که اهمیت اهداف نسبت به هم را مشخص می‌کند در یک تابع جمع‌آوری شده است. مدل ذکر شده برای تعداد چاه های فعال مختلف به کار گرفته شد. همچنین با استفاده از الگوریتم جستجوی ممنوع بهترین ترکیب چاه های فعال مختلف که حداکثر تابع هدف را محقق می‌کند شناسایی شد. شبکه‌های بهینه پیشنهادی به مدیران و تصمیم‌گیران این پیشنهاد را می‌دهد که با توجه به اهداف مورد نظر، شبکه بهینه برای پایش کیفیت آب‌زیرزمینی را انتخاب نمایند. در نهایت مدل بهینه‌سازی توانست شبکه‌های نماینده پایش را بین ۳۴ تا ۷۵ درصد بهینه کند.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، شبکه پایش، کیفیت آب‌زیرزمینی

مقدمه

مدیریت آب‌زیرزمینی نیازمند پایش دقیق و صحیح کمی و کیفی آب‌زیرزمینی با توزیع مناسب مکانی و زمانی می‌باشد. برای بررسی وضعیت کیفی آب‌زیرزمینی در یک منطقه هر ساله نمونه‌برداری از چاه‌های پایش انجام می‌گیرد. این احتمال وجود دارد که چاه‌های پایشی که در گذشته حفر شده‌اند از تعداد و توزیع مکانی مناسبی برخوردار نباشد. بنابراین ممکن است هر ساله از چاه‌های پایشی نمونه‌برداری آب‌زیرزمینی صورت پذیرد که این چاه‌ها در تحلیل شرایط کیفی آب‌زیرزمینی تاثیر چندانی نداشته باشند و باعث افزایش هزینه‌های پایش گردند همچنین از طرفی این احتمال وجود دارد که نمونه‌برداری از چاه‌هایی که نیازمند پایش هستند، صورت نپذیرد بنابراین ضرورت دارد که تعداد چاه‌های پایش بهینه گردد تا هم هزینه‌های پایش بهینه گردد و هم پایشی دقیقی که بیانگر وضعیت کیفی کل حوضه باشد ایجاد شود. البته بایستی به این موضوع توجه داشت که شبکه بهینه پایش همواره اقتصادی‌ترین شبکه در صورتی که برای پایش دقیق‌تر نیاز به نمونه‌برداری بیشتری از چاه‌های پایش

۱- دانشجو کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- دانشیار، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۳- دانشیار، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
٤- دانشیار، دانشکده ریاضیات، گروه ریاضیات کاربردی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: Beheshti@um.ac.ir
DOR: 20.1001.1.20087942.1401.16.4.7.0

باشد نیست. شبکه بهینه پایش کیفی آب‌زیرزمینی اطلاعات کیفی موجود و وضعیت فعلی منطقه را با کمترین تعداد چاه فراهم می‌کند.

شبکه‌های پایش کیفی آب‌زیرزمینی عموماً با استفاده از دو رویکرد ایجاد می‌شوند. رویکرد اول راهکار هیدروژئولوژیکی است که در این روش مبنای طراحی وابسته به کیفیت و کمیت قضاوت متخصص زمین‌شناسی در توصیف اطلاعات است. از این روش صرفاً برای دستیابی به دید کلی از وضعیت کیفی آبخوان استفاده می‌شود و این روش هیچگونه عدم قطعیتی را لحاظ نمی‌کند. رویکرد دوم طراحی شبکه پایش کیفی آب‌زیرزمینی روش آماری است که شبکه پایش با استفاده از روش‌های پیشرفته‌ی زمین‌آمار که بر مبنای شبیه‌سازی، واریانس و احتمالات است، ایجاد می‌شود (Loaiciga et al, 1992). مطالعات انجام‌شده پیشین در جهت بهینه‌سازی شبکه‌های پایش کیفی آب‌زیرزمینی را به چند دسته می‌توان تقسیم‌بندی کرد. دسته اول پژوهش‌ها تمرکز در شناسایی توزیع بارهای آلاینده در آب‌زیرزمینی دارد. به عنوان نمونه در پژوهشی طراحی شبکه پایش بهینه پویا آب‌زیرزمینی برای انتقال آلاینده‌ها در سفره‌های آب زیرزمینی انجام شد. برای این منظور تابع هدفی متشکل از دو هدف در نظر گرفته شد. هدف اول در حداقل‌کردن مجموع چاه‌های پایشی که غلظت آلاینده در آنها اندازه‌گیری نشده، می‌باشد و هدف دوم در حداقل‌کردن واریانس تخمین غلظت آلاینده‌ها در موقعیت‌های مکانی‌ای که پایش صورت نگرفته است نقش داشته است. با در نظر گرفتن این اهداف در تابع هدف سبب شناسایی موقعیت‌های پایش بهینه که عدم قطعیتی زیادی در شبیه‌سازی غلظت آلاینده ها داشته‌اند شد (Chadalavada and Datta, 2008).

دسته دوم پژوهش‌های انجام شده برای شناسایی منابع آلودگی ناشناخته در آب‌زیرزمینی تمرکز داشته است به عنوان مثال در مطالعه‌ای روشی برای بهینه‌سازی چاه‌های پایش در سامانه آب‌زیرزمینی برای شناسایی منبع آلودگی ناشناخته با استفاده از داده‌های چاه‌های پایش صورت پذیرفت. در این روش از دو مدل بهینه‌سازی تک‌منظوره و تحلیل مونت‌کارلو و همچنین بهینه‌سازی چندمنظوره با استفاده از کدهای MODFLOW,MT3D و برای پردازش داده‌های کمی و کیفی مدل شبیه‌سازی، از ماشین بردار پشتیبان[1] احتمالی (PVSM) استفاده شد. بهینه‌سازی تک منظوره که با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل مونت کارلو به دست آمد برای حداکثرسازی اطمینان‌پذیری شناسایی منبع آلودگی بوده است لذا در ایجاد موقعیت‌های اولیه چاه‌های نظارت کمک کرده است. تابع هدف چند منظوره مدل بهینه‌سازی برای حداقل‌سازی هزینه پایش با حداقل کردن تعداد چاه‌های پایش و همچنین حداکثر سازی اطمینان‌پذیری مدل در شناسایی منبع آلودگی و حداکثرسازی احتمال تشخیص منبع آلودگی ناشناخته به کار گرفته شد. روش PVSM با استفاده از نتایج حاصل از تابع هدف تک منظوره واسنجی و تایید شد و سپس به تابع هدف چند منظوره ارتباط داده شد. این روش نتایج مناسبی را در اختیار قرار داد و به عنوان آزمایش در قسمتی از شهر تهران به کار گرفته شد (Bashi-Azghadi and Kerachian, 2010) . دسته دیگر از پژوهش‌ها در راستای بهینه‌سازی شبکه پایش کیفی آب‌زیرزمینی بر روی حذف چاه‌های مازاد و حداقل‌کردن هزینه‌ها تمرکز دارد بدین منظور پژوهشی به جهت یافتن شبکه‌ی پایشی که با حداقل تعداد چاه بیشترین اطلاعات کافی هیدروژئولوژیکی در یک منطقه را ارائه می‌دهد، انجام شد. بدین منظور از سه روش ممکن بهینه‌سازی استفاده شد که روش اول در توصیف تحلیل‌های هیدروژئولوژیکی برای یافتن شبکه بهینه کاربرد داشته است. روش دوم با استفاده از تئوری نمونه‌برداری سعی در یافتن شبکه بهینه پایش کیفی آب‌زیرزمینی داشته است و در روش آخر با استفاده از مدل MSN[2] که ترکیبی از روش نمونه‌برداری طبقه‌بندی شده مکانی و درونیابی کریجینگ است، سعی در یافتن شبکه بهینه پایش داشته است. نتایج نشان داد که مدل MSN برای توزیع مکانی چاه‌های پایش موجود نتایج مناسب‌تری نسبت به دو روش دیگر ارائه می‌دهد (Guo et al, 2011). رویکرد دیگری که احتمالاً می‌توان این روش را نسبت به روش‌هایی که محققان در گذشته بررسی کرده‌اند در بهینه‌سازی شبکه پایش کیفی آب‌زیرزمینی موثرتر در نظر گرفت روشی است که با ارزیابی چاه‌های اندازه‌گیری شده و درجه‌بندی آنها، چاه‌هایی که از ارزش پایینی در فرآیند پایش برخوردارند را حذف و شبکه پایش را بهینه کرد (Fisher, 2013). به نظر می‌رسد هنوز روش‌های دیگری برای بهینه‌سازی شبکه پایش کیفی وجود دارد که در مطالعات می‌توان از آنها استفاده کرد همچنین استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی مختلف می‌تواند روش موثرتری در طراحی شبکه پایش بهینه کیفی آب‌زیرزمینی باشد. باید توجه داشت که مسائل مربوط به بهینه‌سازی آب‌زیرزمینی معمولاً سطوح جواب گسسته و محدب دارند (McKinney and lin, 1994). برای اینگونه مسائل روش‌های بهینه‌سازی خطی تا زمانی که مسئله با جواب اولیه خوبی آغاز نشود جواب مناسبی را ایجاد نمی‌کند (Arora, 2004). بنابراین الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری به دلیل اینکه نیاز به جواب اولیه ندارند ترجیح داده می‌شوند. ضرورت انجام این پژوهش بدین علت است که در بسیاری از دشت‌های کشور از جمله دشت نیشابور هنوز شبکه‌ی بهینه پایش کیفی آب‌زیرزمینی وجود ندارد و هرساله پایش کیفی با انتخاب چاه‌های تصادفی و بدون برنامه انجام می‌شود. لذا ضرورت دارد که بر اساس مدل‌های بهینه‌سازی مختلف این کار انجام

1- Probeblity Support Vector Machine

2- Mean of Surface with Non-homogeneity

شود بنابراین در این پژوهش هدف یافتن شبکه‌های نماینده بهینه پایش کیفی آب‌زیرزمینی که اطلاعات کافی از شرایط کیفی آب‌زیرزمینی قرار دهد، می‌باشد. این هدف با شناسایی چاه‌های مازاد در شبکه فعلی محقق می‌گردد. برای دستیابی به این هدف بر اساس بررسی‌های انجام شده و داده‌های موجود، مدل انتخاب شده بر اساس پژوهش (Ayvaz and Elci 2017) بوده است با این تفاوت که در پژوهش حاضر به جای انتخاب یک پارامتر کیفی آب که در پژوهش ذکر شده هدایت الکتریکی می‌باشد، شاخص کیفی‌ای که بیانگر بهتری از وضعیت کیفی یک نمونه آب است ارائه شده است. مدل بهینه‌سازی انتخاب شده در این پژوهش نسبت به مدل‌های غیرخطی بهینه‌سازی گذشته عملکرد بهتری در مسائل مربوط به پایش آب زیرزمینی دارد.

مواد و روش‌ها

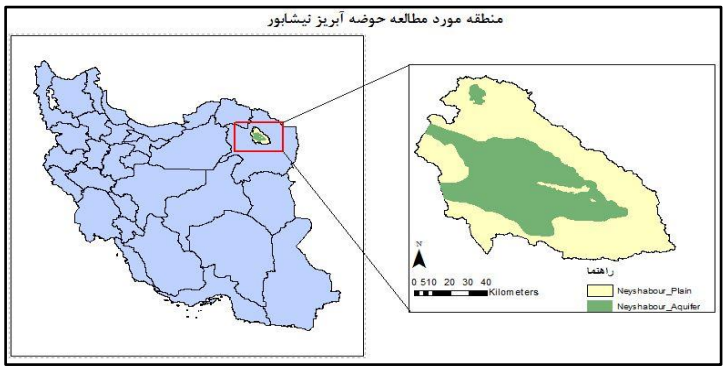
برای انجام این پژوهش نیاز به تعیین دوره مطالعه، تعیین شاخص کیفیت آب، مدل بهینه‌سازی، الگوریتم حل کننده این مدل و انتخاب بهترین مدل درون‌یابی بوده است. در این بخش به بررسی موارد ذکر شده و نحوه انتخاب آنها پرداخته شده است.

دوره مطالعه

برای انتخاب دوره مطالعه نیاز به انتخاب چاه‌های پایشی که طی دو سال متوالی و در فصل بهار پارامترهای کیفی آب‌زیرزمینی اندازه‌گیری شده باشد، است (Ayvaz and Elci ,2017). بدین منظور با بررسی داده‌های کیفی برداشت شده توسط شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۷ به جهت یافتن بیشترین تعداد چاهی که در دو دوره اندازه گیری پارامترهای کیفی در آنها انجام شده باشند دو سال ۱۳۹۰-۱۳۹۱ با ۴۹ حلقه چاه به عنوان دوره مطالعه در نظر گرفته شد که بهار سال ۱۳۹۰ به طور مستقیم در فرآیند بهینه‌سازی و بهار ۱۳۹۱ برای صحت‌سنجی مدل به کار گرفته شد.

منطقه مورد مطالعه

حوضه‌ی آبریز نیشابور جزئی از حوضه‌ی آبریز کویر مرکزی ایران بوده و در سمت غرب آن قرار می‌گیرد. موقعیت حوضه‌ی آبریز نیشابور در طول جغرافیایی ´۱۷ °۵۸ تا ´۳۰ °۵۹ شمالی و عرض جغرافیایی ´۴۰ °۳۵ تا ´۳۶ °۳۹ واقع شده است. وسعت این محدوده ۷۲۹۳ کیلومتر مربع می‌باشد. از مساحت کل این محدوده ۳۸۹۱/۵ کیلومتر مربع آن دشت و ۳۴۰۱/۵ کیلومتر مربع را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. همچنین حوضه‌ی آبریز نیشابور تقریباً به صورت مستطیل شکل با طول حدود ۱۲۵کیلومتر (در جهت شمال غرب –جنوب شرق) و عرض متوسط ۶۰کیلومتر می‌باشد. (ولایتی، ۱۳۷۸)



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه حوضه‌ی آبریز نیشابور

ایجاد شاخص کیفیت آب

شاخص کیفیت آب متشکل از چند پارامتر کیفی است که در مجموع شرایط کیفی یک نمونه آب را نشان می‌دهد. در این پژوهش روش محاسبه‌ی شاخص کیفیت آب بر مبنای پژوهش(Tiwari and Mishra,1985) و (Al-Mashagbah, 2015) بوده است. برای این منظور تعداد ۹ پارامتر کیفی انتخاب و با استفاده از استاندارد کیفیت آب آشامیدنی ایران برای حداکثر مقادیر مجاز، نرمال شده است. پارامترهای کیفی ذکر شده بر اساس اهمیت در ارزیابی کیفیت آب آشامیدنی با استفاده از ضریب وزنی (W_j ; j = 1,2,…,n) که n تعداد پارامترهای کیفی است، وزن‌دهی شده است. وزن‌ها از اهمیت زیاد تا اهمیت کم مقادیر چهار تا یک را دریافت کرده‌اند. جدول ۱ لیست پارامترهای کیفی و وزن‌های نسبت داده شده را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن وزن برای هر پارامترکیفی ذکر شده، وزن مربوط به هر پارامتر کیفی به صورت زیر محاسبه می‌گردد

$$\tilde{w}_j = \frac{W_j}{\sum_{j=1}^{n} W_j};\ j = 1.2 \ldots . n \qquad (۱)$$

برای نرمال کردن هر پارامتر کیفی، مقدار غلظت هر پارامتر کیفی

اندازه‌گیری شده بر حداکثر غلظت مجاز تعیین شده تقسیم شده است. مقادیر حداکثر غلظت پارامترهای کیفی توسط موسسه استاندارد ایران تعیین شده است (موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، ۱۳۸۷).

$$q_j = \frac{Cj}{Sj} \times 100 \; ; j = .2 \ldots . n \qquad (۲)$$

در رابطه‌ی بالا Cj غلظت پارامتر کیفی اندازه‌گیری شده در نمونه آب‌زیرزمینی و Sj مقدار حداکثر مجاز غلظت پارامتر کیفی بر اساس استاندارد ایران است. برای هر پارامتر کیفی SI به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$SI_j = \tilde{w}_j \times q_j \; ; j = 1.2.3 \ldots . n \qquad (۳)$$

در نهایت شاخص کیفیت آب به صورت زیر مشخص می‌شود:

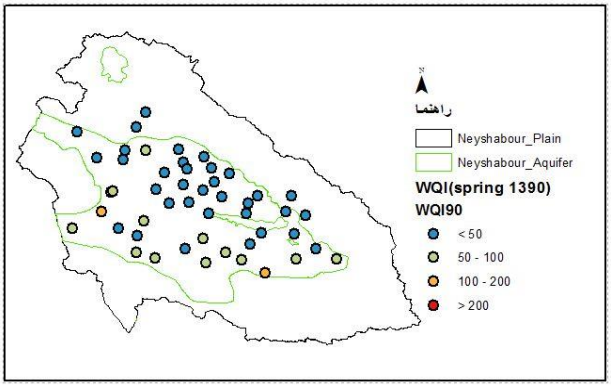
$$WQI = \sum_{j=1}^{n} SIj \qquad (۴)$$

جدول ۱- پارامترهای کیفی انتخاب شده و وزن نسبت داده شده به هر پارامتر

پارامتر کیفی	واحد	استاندارد سازمان جهانی بهداشت (WHO)	استاندارد کیفیت آب آشامیدنی ایران	وزن
PH	–	۶/۵ – ۸/۵	۶/۹ – ۵	۴
EC	µs/cm	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۴
$SO4^{2-}$	mg/l	۵۰۰	۴۰۰	۴
Cl^{-}	mg/l	۲۵۰	۴۰۰	۳
Na^{+}	mg/l	۲۰۰	۲۰۰	۲
Mg^{2+}	mg/l	۱۵۰	۳۰	۲
Ca^{2+}	mg/l	۲۰۰	۳۰۰	۲
TDS	mg/l	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲
K	mg/l	۲	۱۲	۱

جدول۲- وضعیت کیفیت آب بر اساس شاخص کیفیت آب (Şener et al, 2017)

وضعیت کیفیت آب	شاخص کیفیت آب (WQI)
عالی	WQI<۵۰
خوب	۱۰۰<WQI< ۵۰
ضعیف	۲۰۰<WQI<۱۰۰
نامناسب	۳۰۰<WQI<۱۰۰



شکل ۲- توزیع شاخص کیفی آب چاه‌های پایش آب‌زیرزمینی در دوره اول (بهار ۱۳۹۰) بر اساس کلاسه بندی (Şener et al, 2017)

مقادیر کمتر شاخص کیفی آب بیانگر کیفیت بهتر آب می‌باشد. کلاسه‌بندی شاخص کیفیت آب توسط مطالعه (Şener et al, 2017) انجام شده است. جدول ۲ کلاسه‌بندی شاخص کیفیت آب برای مقاصد شرب را نشان می‌دهد و شکل ۲ وضعیت کیفیت آب چاه‌های حوضه‌آبریز نیشابور بر اساس شاخص WQI نشان می‌دهد.

مدل بهینه‌سازی:

در این پژوهش از الگوریتم جستجوی ممنوع (Tabu Search) برای یافتن شبکه بهینه پایش کیفی آب‌زیرزمینی استفاده شده است.

الگوریتم جستجوی ممنوع زیرمجموعه‌ای از الگوریتم‌های فرا ابتکاری[1] بوده که با به کارگیری روش‌های جستجوی محلی سعی در یافتن جواب نزدیک به بهینه و یا حتی بهینه دارد. مبنای کار این الگوریتم عدم بررسی حرکتهایی که از پیش توسط الگوریتم بررسی شده و یا حرکتهایی که بهبودی در تابع هدف ایجاد نمی‌کنند، می‌باشد. (Glover and Laguna, 1998)

برای حل مدل بهینه‌سازی توسط الگوریتم جستجوی ممنوع هر چاه پایش با استفاده از شناسه‌ای که شامل اعداد صحیح است شناخته می‌شود. از آنجا که در منطقه مورد مطالعه تعداد ۴۹ حلقه چاه وجود دارد لذا شناسه هر چاه به صورت Id = [0,1,2,...,48] در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای ورودی برای الگوریتم جستجوی ممنوع شامل تعداد چاه فعال در شبکه، تعریف همسایگی[2]، تعداد همسایگی، فهرست ممنوع[3] و معیار رضایتمندی[4] از الگوریتم می‌شود. از آنجایی که مسائل مربوط به آب‌زیرزمینی جزء مسائل غیرپیوسته[5] و محدب می‌باشد لذا مسئله را برای تعداد مشخصی چاه حل کرده و به صورت گسسته تعداد چاه‌های پایش را کاهش داده و خروجی بررسی می‌شود.

در این پژوهش شروع فرآیند بهینه‌سازی با درنظر گرفتن ۳۲ حلقه چاه (حدود ۶۵ درصد فعال) بوده است. همسایگی برای ایجاد نسل‌های جدید از جمعیت اولیه تعریف می‌شود. ساختار همسایگی در این پژوهش بدین صورت است که از هر جمعیت تعداد ۵ چاه به صورت تصادفی حذف و با ۵ چاه تصادفی دیگر جایگزین می‌شود. به عبارت دیگر اگر یکی از جواب‌های اولیه مسئله شامل مجموعه چاه‌ها با شناسه S0 = [0,1,2,3,4,5,6,7,8,9] باشد همسایگی N1 = [5,6,7,8,9,10,11,12,13,14] تعریف می‌شود. شکل ۳ بیانگر این همسایگی است.

فهرست ممنوع حرکت‌هایی(مجموعه جواب‌هایی) است که قبلاً توسط الگوریتم بررسی شده است و این فهرست از بررسی مجدد حرکات تکراری جلوگیری می‌کند همچنین معیار رضایتمندی در این پژوهش تعداد تکرار الگوریتم برای ۳ مرتبه می‌باشد. شکل۴ فلوچارت الگوریتم جستجوی ممنوع را نشان می‌دهد. این الگوریتم با استفاده از زبان برنامه نویسی Python برای محیط Arc GIS نوشته شده است.

تابع هدف در این پژوهش از ترکیب دو هدف متقابل با هم با یک ضریب تاثیر که اهمیت اهداف نسبت به هم را مشخص می‌کند تشکیل شده است. هدف اول حداکثرسازی تطابق درون‌یابی شاخص کیفیت آب (WQI) بین شبکه جدید انتخاب شده از شبکه اولیه (توسط الگوریتم جستجوی ممنوع) با درون‌یابی شاخص کیفیت آب شبکه موجود متشکل از کل چاه‌ها است. ارزیابی این تطابق بر اساس معیار آماری ارزیابی مدل نش- ساتکلیف می‌باشد.

هدف دوم حداقل‌سازی تعداد چاه‌های پایش در شبکه جدید ایجاد شده برای حداقل کردن هزینه‌های پایش می‌باشد. بیان ریاضی تابع هدف را می‌توان به صورت زیر نمایش داد:

$$Z = f1 - \omega f2 \qquad (۵)$$

$$f_2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(\widetilde{WQJ_\iota} - \widetilde{wQJ_\iota^*})^2}{\sum_{i=1}^{n}(\widetilde{wQJ_\iota^*} - \overline{wQJ^*})^2} \qquad (۶)$$

$$f_2 = \frac{\tilde{\eta}}{nb} \qquad (۷)$$

معادله (۵) تابع هدف مسئله می‌باشد و معادله (۶) و (۷) به ترتیب هدف اول حداکثر سازی تطابق مدل نش-ساتکلیف و حداقل‌سازی تعداد چاه‌های پایش در شبکه انتخاب شده از شبکه اولیه می‌باشد. شروط و قیود مسئله به صورت زیر می‌باشد:

$$\widetilde{WQJ_\iota} = \begin{cases} \widetilde{WQJ_\iota} & \text{اگر } i \text{ امین نقطه شبکه درون آبخوان قرار داشته باشد} \\ 0 & \text{غیر اینصورت} \end{cases} \qquad (۸)$$

$$\widetilde{WQI\iota} = \langle wQI_k . \tilde{\eta} \rangle_{mx.my} \; ; \; i = 1,2,3,...,m_x.m_y; \qquad (۹)$$

$$k = 1,2,3,...,n_b$$

$$\tilde{\eta} = \sum_1^{n_b} \eta_k \qquad (۱۰)$$

$$\eta_k = \begin{cases} 1 & \text{اگر } k \text{ امین چاه پایش فعال باشد} \\ 0 & \text{غیر اینصورت} \end{cases} \qquad (۱۱)$$

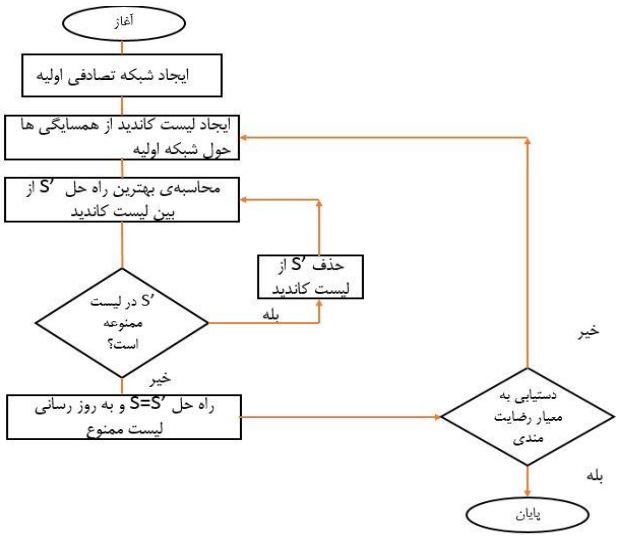
$$k = 1,2,3,...,n_b$$

در روابط بالا wQI_k اطلاعات کیفی آب‌زیرزمینی در k امین چاه پاپش (k = 1,2,3,…,nb = 49) ، η_k متغیر عددی که مقادیر ۱ و ۰ را برای چاه‌های به ترتیب فعال و غیر فعال در شبکه را می‌گیرد. $\tilde{\eta}$ تعداد چاه‌های فعال در شبکه که از مجموع مقادیر η_k به دست می‌آید. $\langle wQIk.\tilde{\eta} \rangle mx.my$ برداشت مقادیر مدل درونیابی در روی هر سلول و تبدیل آن به مختصات دو بعدی بر روی شبکه می‌باشد. لازم به ذکر است که برای برداشت مقادیر درون‌یابی پارامتر شاخص کیفی آب، بر روی منطقه مورد مطالعه شبکه‌ای گرید بندی شده مربعی با ابعاد هر سلول ۱km^2 ایجاد شده است. $\widetilde{WQI\iota}$ اطلاعات کیفی درونیابی شده در i امین سلول شبکه به گونه‌ای که اگرi امین سلول درون محدوده مطالعاتی باشد مقدار $\widetilde{WQI\iota}$ برای آن در نظر گرفته

1- metaheuristic
2- Neighbour structure
3- Tabu list
4- Satisfaction criterion
5- Non-Continuoues

می‌شود و در غیر این صورت اگر سلول خارج از محدوده مورد مطالعه باشد اطلاعات کیفی درونیابی شده برای آن نقطه صفر در نظر گرفته می‌شود. $\widetilde{wQJ_i^*}$ مقدار اطلاعات کیفی آب‌زیرزمینی در i امین سلول (i = 1,2,3,...,mx.my) که با استفاده از درونیابی تمام چاه‌ها به صورت فعال به دست می‌آید. $\overline{wQJ^*}$ میانگین $\widetilde{wQJ_i^*}$ در روی هر سلول درون محدوده مورد مطالعه می‌باشد.

شکل ۳- نمونه ایجاد همسایگی حول جواب اولیه S0



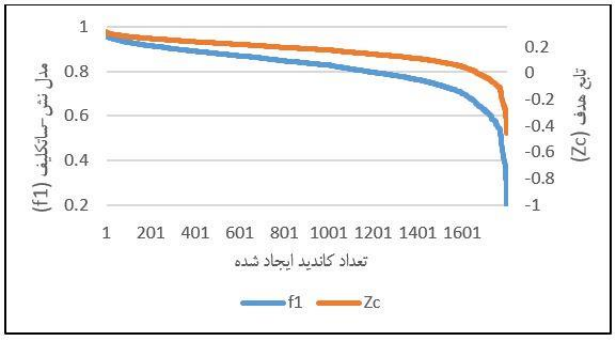
شکل ٤- فلوچارت الگوریتم جستجوی ممنوع

رابطه‌ی (۵) بیان ریاضی تابع هدف است. تابع هدف استفاده شده در این پژوهش از دو هدف مختلف تشکیل شده است. هدف اول (f_1) در رابطه‌ی (۶) بیانگر حداکثرسازی مدل نش – ساتکلیف که با استفاده از محاسبه‌ی بین $\widetilde{WQJ_i}$ و $\widetilde{wQJ_i^*}$ برای هر سلول درون محدوده مورد مطالعه به دست می‌آید. قابل ذکر است که دامنه مقادیر ممکن برای f_1 از $[1, -\infty]$ است. مقدار ($f1 = 1$) به معنای برابری $\widetilde{WQJ_i}$ با $\widetilde{wQJ_i^*}$ برای هر سلول شبکه می‌باشد. دو هدف اشاره شده f_1 و f_2 با استفاده از ضریب وزنی ω که برای تنظیم کردن اهمیت f_2 و f_1 است درون یک تابع جمع شده‌اند. مقادیر مختلف ω حل‌های بهینه مختلفی را در اختیار قرار می‌دهد.

انتخاب روش درون‌یابی

برای یافتن بهترین روش درون‌یابی به طوری که بیشترین تطابق بر داده‌های موجود را داشته باشد از اعتبار سنجی متقابل[1] استفاده شده است. قبل از ایجاد لایه رستر درون‌یابی، ارزیابی دقت مدل درون‌یابی در تخمین مقادیر نقاط ناشناخته مهم است. رویکرد روش اعتبار سنجی متقابل با حذف یک داده و پیش‌بینی آن با استفاده از داده‌های باقیمانده می‌باشد. با استفاده از این روش می‌توان مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده را مقایسه کرد و پس از آن روشی که کمترین خطا در پیش‌بینی نقاط اندازه‌گیری نشده را در اختیار قرار دهد به عنوان مدل درون‌یابی انتخاب می‌شود. برای بررسی اعتبارسنجی متقابل از نرم افزار Arc GIS ۱۰.۵ و با استفاده از افزونه Geostatistical Analyst استفاده شد.

1- Cross- Validation



شکل۵- نمودار نتایج تابع هدف برای ۳۲ حلقه چاه فعال در شبکه

جدول۳ - نتایج تابع هدف به دست آمده برای مقادیر مختلف ضریب تاثیر

تعداد چاه فعال ($\tilde{\eta}$)	نسبت تعداد چاه فعال به کل چاه‌ها (f_2)	مدل نش-ساتکلیف (f_1)	تابع هدف (Zc)	ضریب تاثیر (ω)
۳۲	۰/۶۵۳	۰/۹۷۰	۰/۹۰۵	۰/۱
۲۵	۰/۵۱۰	۰/۹۳۷	۰/۸۳۵	۰/۲
۲۲	۰/۴۴۸	۰/۹۲۴	۰/۷۹۰	۰/۳
۲۰	۰/۴۰۸	۰/۹۰۷	۰/۷۴۴	۰/۴
۱۷	۰/۳۴۶	۰/۹۰۵	۰/۷۳۱	۰/۵
۱۵	۰/۳۰۶	۰/۹۰۱	۰/۷۱۷	۰/۶
۱۲	۰/۲۴۴	۰/۸۸۶	۰/۷۱۵	۰/۷
۱۲	۰/۲۴۴	۰/۸۸۵	۰/۶۸۹	۰/۸
۱۲	۰/۲۴۴	۰/۸۷۹	۰/۶۵۹	۰/۹
۱۲	۰/۲۴۴	۰/۸۷۱	۰/۶۲۶	۱/۰
۱۱	۰/۲۲۴	۰/۸۳۹	۰/۶۱۵	۱

روش‌های مختلف درون‌یابی از جمله عکس فاصله وزن‌دهی شده[1]، توابع شعاعی[2] و روش کریجینگ[3] مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای روش زمین‌آمار کریجینگ معمولی مدل‌های نیم متغیرنما دایره‌ای، کروی، نمایی، گوسین و ثابت مورد آزمایش قرار گرفت. معیار خطاسنجی برای انتخاب مدل درون‌یابی که بیشترین برازش به داده‌های شاخص کیفی بهار ۱۳۹۰ (WQI 1390) داشته باشد جذر میانگین مربعات خطا است. پس از مقایسه RMSE روش‌های مختلف، روش(IDW) با داشتن کمترین RMSE به عنوان مدل درون‌یابی انتخاب شد.

نتایج و بحث

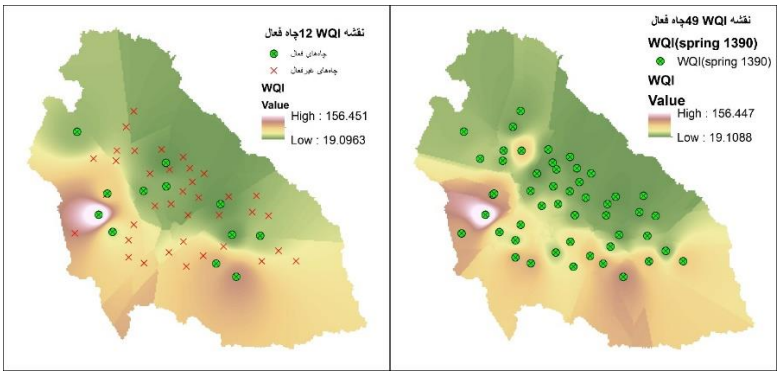
در این قسمت ابتدا به بررسی نتایج حاصل از حل مسئله با استفاده از الگوریتم جستجوی ممنوع که برای شبکه‌های با تعداد چاه‌های فعال مختلف به کار گرفته شده می‌پردازیم. سپس به صحت‌سنجی شبکه‌های شناسایی شده توسط الگوریتم پرداخته می‌شود. شکل ۵ نتایج تابع هدف با ۳۲ حلقه چاه برای ۱۸۰۰ نسل ایجاد شده توسط الگوریتم را نشان می‌دهد.

برای ω =۰/۱ مقدار تابع هدف مقدار ۰/۹۳۹ به دست آمده است که این مقدار برای مدل ۰/۹۷۰ است. این نتیجه با در نظر گرفتن ۶۵ درصد کل چاه‌های موجود در منطقه به عبارتی ۳۲ حلقه چاه می‌باشد. همانطور که از جدول۳ مشخص است، هر چه مقدار ω افزایش یافته است، تابع هدف از مقدار ۰/۹۳۹ به ۰/۵۶۵ کاهش یافته. این الگو همچنین در مدل نش – ساتکلیف نیز دیده می‌شود به گونه‌ای که مقدار مدل نش-ساتکلیف از ۰/۹۷۰ به ۰/۸۷۱ کاهش یافته است. این نتیجه با در نظر گرفتن ۲۴ درصد از کل چاه‌های موجود در منطقه به دست آمده است. با توجه به نتایج مشخص است که رابطه‌ی بین تابع هدف و مدل نش – ساتکلیف، مستقیم است به عبارتی هرچه مقدار f_1 کاهش یافته است مقدار تابع هدف مسئله نیز در پی آن کاهش

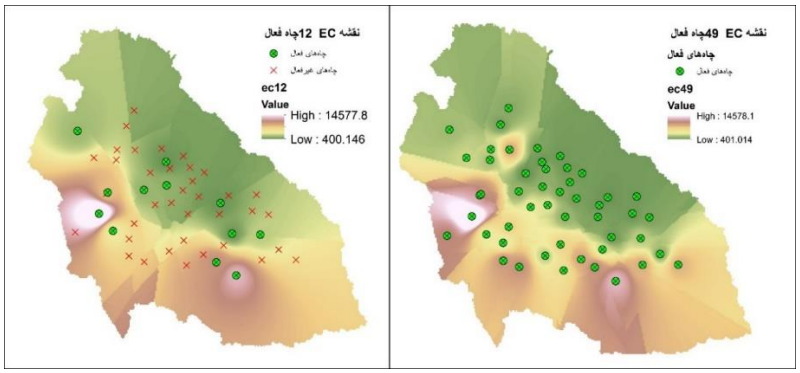
1- Inverse Distance Weighting
2- Radial Basis Functions
3- Kriging

یافته است. نتیجه دیگر به دست آمده از این پژوهش بدین صورت است که با ثابت ماندن تعداد چاه‌ها در تعداد ۱۲ حلقه چاه شاهد مقادیر مختلف f_1 بوده‌ایم. این مقادیر نشان‌دهنده آن است که موقعیت‌های مختلف چاه‌های پایش مقادیر مختلفی از مدل نش – ساتکلیف در اختیار قرار می‌دهد. همچنین همانطور که از نتایج مشخص است با کاهش تعداد چاه‌ها تغییرات f_1 نسبت به f_2 بسیار کندتر بوده این نتایج سبب می‌شود که شبکه بهینه شبکه‌ای با تعداد کمتر چاه باشد. این روند تا ۱۲ حلقه چاه ادامه داشته است.

پس از آن هر شبکه‌ای با تعداد کمتر از ۱۲ حلقه چاه از بهینه بودن دور شده لذا می‌توان حل مسئله را در شبکه‌ی با ۱۲ حلقه چاه در نظر گرفت. نتیجه دیگر به دست آمده از این پژوهش بدین صورت است که الگوریتم پیشنهادی همواره چاه‌هایی که مقادیر آلودگی بالایی دارند را نشان داده است به عبارتی در شبکه پیشنهادی برای هر تعداد چاه فعال همواره چاه‌هایی که شاخص کیفی نامناسبی داشته‌اند در شبکه بهینه حضور داشته‌اند. شکل ۶ و ۷ به ترتیب توزیع شاخص کیفی آب و هدایت الکتریکی را برای شبکه اولیه شامل ۴۹ حلقه چاه و شبکه‌ی شامل ۱۲ حلقه چاه را نشان می‌دهد همانگونه که از درونیابی توزیع شاخص در منطقه مشخص است روش پیشنهادی تمایل بالایی برای نشان دادن نقاط با آلودگی بالا را دارد.



شکل ٦- نقشه درونیابی شاخص کیفی آب برای شبکه اولیه (٤٩ حلقه چاه) و شبکه بهینه‌سازی شده (۱۲ حلقه چاه)

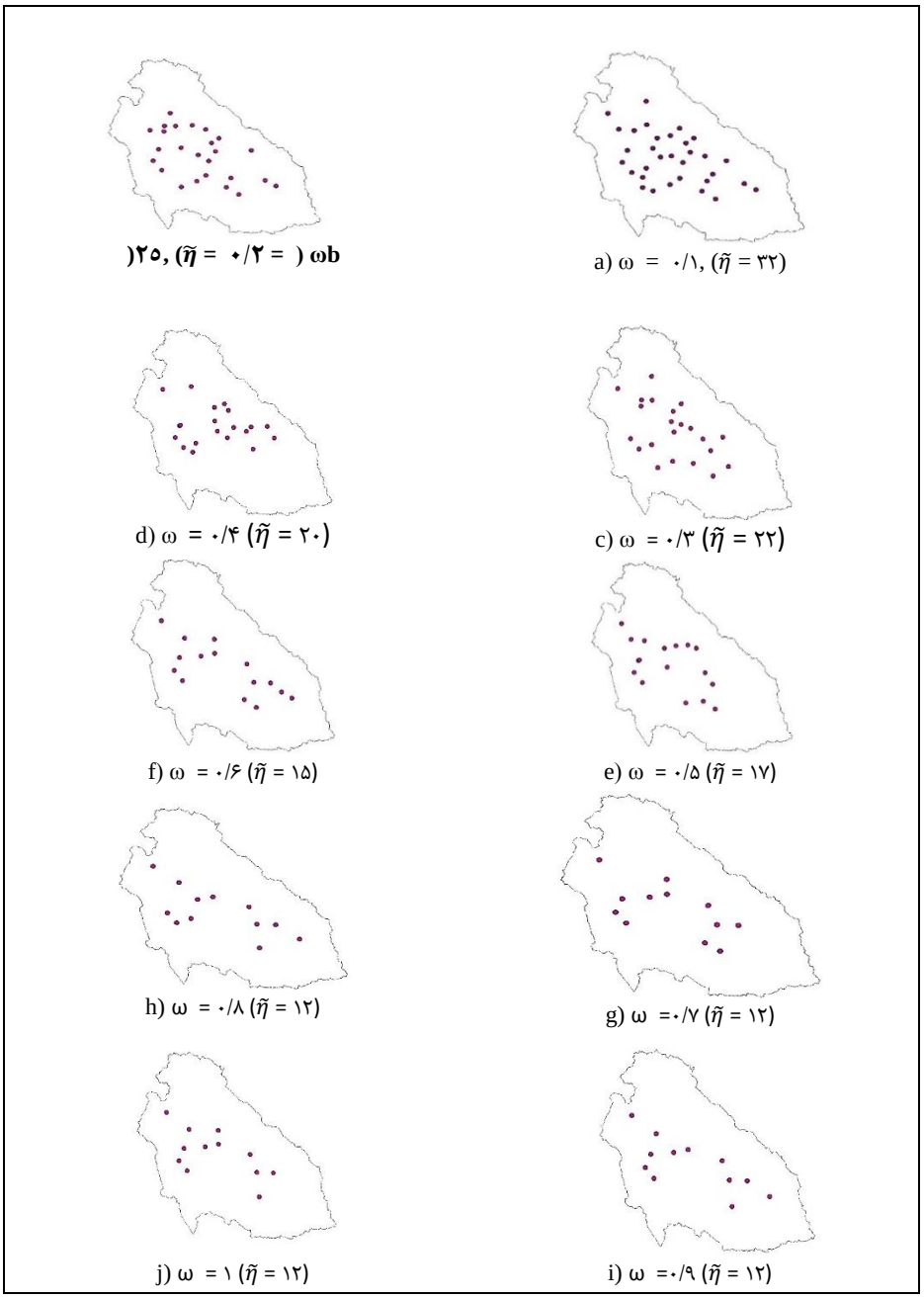


شکل۷- نقشه درونیابی هدایت الکتریکی (EC) برای شبکه اولیه (٤٩ حلقه چاه) و شبکه بهینه‌سازی شده (۱۲ حلقه چاه)

صحت‌سنجی شبکه‌های پایش بهینه شناسایی شده

در مرحله‌ی بعد صحت‌سنجی[1] شبکه‌های پایش یافت شده انجام شده است. بدین منظور از داده‌های دوره دوم (بهار۱۳۹۱) استفاده شده است. برای انتخاب بهترین روش درون‌یابی منطبق بر سری دوم داده‌ها نیز فرایند صحت‌سنجی متقابل انجام می‌شود. براساس نتایج همانند روش درون‌یابی برای دوره اول، کمترین میزان RMSE تولید شده برای روش درون‌یابی عکس فاصله معکوس بوده است. پس از انتخاب روش درون‌یابی برای دوره دوم داده‌ها، مقدار تابع هدف برای شبکه‌های شناسایی شده طی فرآیند بهینه‌سازی به دست آورده شده است. جدول۴ مقایسه‌ی نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل بهینه‌سازی شبکه پایش کیفی را با مقایسه‌ی مدل نش – ساتکلیف(f_1) ناشی از درونیابی توزیع شاخص کیفی (WQI) بین دوره اول (بهار ۱۳۹۰) و دوره دوم (بهار ۱۳۹۱) نشان می‌دهد.

1- Verification



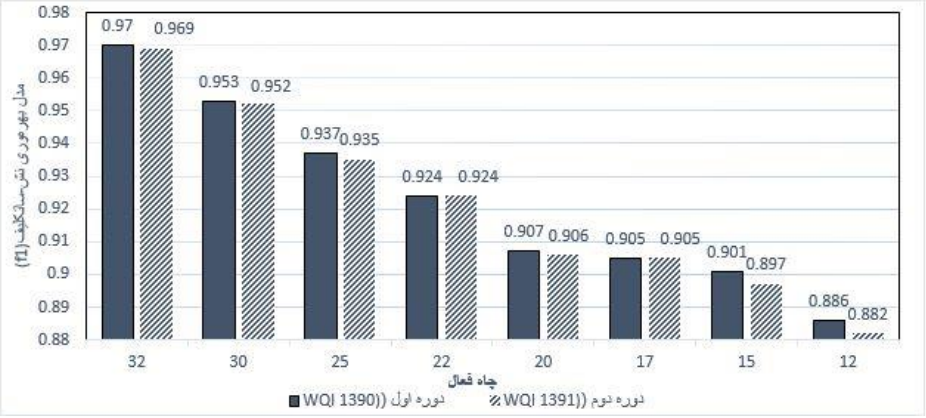
شکل ۸- چاه‌های پایش شناسایی شده طی فرآیند بهینه‌سازی برای تعداد چاه‌های فعال مختلف

برای بیان درجه درستی یک مدل از درصد بایاس استفاده می‌شود. بایاس نزدیکی میانگین یک سری داده‌ی اندازه‌گیری شده توسط مدل را با مقادیر واقعی نشان می‌دهد. هرچه مقادیر بایاس ایجاد شده به صفر نزدیکتر باشد، سری داده‌های مرتبط به مقادیر واقعی نزدیک‌تر بوده و بیانگر صحت مدل است. بر اساس رابطه‌ی ۱۲ مقدار بایاس هر شبکه به دست آمده است.

$$\text{PBIAS} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\widetilde{WQ}_i - \widetilde{wQ}_i^*)}{\sum_{i=1}^{n}\widetilde{wQ}_i^*} \times 100 \qquad (۱۲)$$

طبق نتایج به دست آمده از جدول۴ مقادیر درصد سوگیری بین ۴/۳۹- درصد برای (ω=۱) تا ۶/۳۳ درصد برای (ω = ۰/۳) در مرحله بهینه‌سازی به دست آمده است. همین روند در مرحله‌ی صحت‌سنجی دیده می‌شود با این تفاوت که درصد بایاس(PBIAS) در مرحله‌ی صحت‌سنجی نسبت به بهینه‌سازی کاهش یافته است. مقادیر RMSE با استفاده از رابطه‌ی ۱۳ به دست آمده است.

$$\text{RMSE}=\left(\sqrt{\left(\frac{1}{mx.my-1}\times\sum_{i=1}^{mx.my}(\widetilde{WQ}_i - \widetilde{wQ}_i^*)^2\right)}\right) \qquad (۱۳)$$



شکل ۹- مقایسه‌ی شاخص ارزیابی مدل نش-ساتکلیف تولید شده توسط شبکه‌های پایش بین دوره اول و دوره دوم

جدول ٤- صحت سنجی شبکه‌های پایش برای تعداد مختلف چاه فعال

صحت سنجی		بهینه‌سازی		ضریب تاثیر	تعداد چاه فعال
RMSE	PBIAS	RMSE	PBIAS	ω	(η̃)
۴/۳۷	۰/۹۱	۴/۵۴	۰/۸۱	۰/۱	۳۲
۶/۳۰	۳/۳۸	۶/۶۴	۳/۲۳	۰/۲	۲۵
۶/۸۳	۵/۹۷	۷/۲۶	۶/۳۳	۰/۳	۲۲
۷/۶۰	۴/۶۵	۸/۰۳	۵/۱۳	۰/۴	۲۰
۷/۶۲	۳/۳۷	۸/۱۴	۳/۸۵	۰/۵	۱۷
۷/۹۵	۱/۱۳	۸/۳۲	۱/۳۸	۰/۶	۱۵
۸/۵۱	۲/۲۲	۸/۹۰	۲/۶۷	۰/۷	۱۲
۸/۴۰	۲/۳۰	۸/۹۵	۲/۷۸	۰/۸	۱۲
۸/۵۷	۲/۷۱	۹/۱۹	۳/۰	۰/۹	۱۲
۸/۹۷	-۴/۶۴	۹/۴۹	-۴/۳۹	۱/۰	۱۲

طبق نتایج روند افزایش RMSE در مرحله‌ی بهینه‌سازی قابل مشاهده است به گونه‌ای که کمترین میزان RMSE در مرحله‌ی بهینه‌سازی ۴/۵۴ برای ضریب تاثیر(ω=۰/۱) و بیشترین ۹/۴۹ برای ضریب تاثیر(ω = ۱) می‌باشد. همین روند افزایشیRMSE در مرحله صحت‌سنجی قابل مشاهده است. کمترین میزان ۴/۳۷ برای ضریب تاثیر(ω=۰/۱) و بیشترین ۸/۹۷ برای ضریب تاثیر(ω = ۱) به دست آمده است. با مقایسه جذر میانگین توان دوم خطاهای تولید شده و بایاس در مرحله‌ی بهینه‌سازی و صحت‌سنجی به این نتیجه می‌توان رسید که مدل در مرحله‌ی صحت‌سنجی خطای کمتری تولید کرده و دقت مدل برای این مرحله بیشتر از مرحله بهینه‌سازی است. با توجه به جدول۴ و شاخص خطاسنجی RMSE هر چه میزان چاه فعال برای شبکه کاهش یافته میزان RMSE هم در مرحله بهینه‌سازی و هم صحت‌سنجی افزایش یافته است که این مسئله نتیجه‌ای قابل انتظار است. به عبارتی دیگر با کاهش تعداد چاه‌های فعال از ۳۲ حلقه چاه برای ضریب تاثیر (ω = ۰/۱) به ۱۲ حلقه چاه برای ضریب تاثیر (ω = ۰/۷) مدل بهینه‌سازی (تابع هدف) بهبود می‌یابد اما هم زمان میزان خطای مدل افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

معمولاً شبکه‌های پایش آب‌زیرزمینی را به گونه‌ای طراحی می‌کنند که از توزیع یکنواختی در منطقه برخوردار باشد. فرض اساسی در این پژوهش وجود یک شبکه پایش برای اصلاح و بهینه‌سازی آن است همچنین نیاز به حداقل یک دوره نمونه‌برداری از داده‌های کیفی چاه‌های پایش بوده است. پس از آن فرآیند بهینه‌سازی برای شناسایی چاه‌های مازاد به کار گرفته شد. با شناسایی چاه‌های پایش کم اثر در تحلیل وضعیت کیفی آب زیرزمینی، هزینه پایش نیز کاهش می‌یابد و این نتیجه‌ای مورد انتظار از فرآیند بهینه‌سازی می‌باشد. این روش بر روی هر دو پارامتر هزینه و پوشش یکنواخت چاه‌های پایش در منطقه تمرکز داشته است به گونه‌ای که پس از بهینه‌سازی، شبکه‌های پایش پیشنهادی به طور یکنواخت در منطقه پراکنده شده‌اند. نتایج به دست آمده از فرآیند بهینه‌سازی دو موضوع را بیان می‌کند اولاً تعداد چاه‌های موجود برای بررسی و پایش وضعیت کیفی آب‌زیرزمینی حوضه‌ی آبریز نیشابور ضرورت نداشته است و نتیجه دیگری که از این پژوهش به دست آمد نشان می‌دهد که با تغییر ضرایب تاثیر (ω)، مدل شبکه‌های بهینه متفاوتی را ارائه می‌دهد بنابراین با توجه به

اینکه کدام هدف اهمیت داشته باشد نتایج بهینه‌سازی متفاوت می‌شود. اگر برای تصمیم‌گیران هدف دستیابی به شبکه‌ی پایش با حداقل خطا بدون در نظر گرفتن مباحث اقتصادی و هزینه‌ی پایش باشد، مدل شبکه‌ی شامل ۳۲ حلقه چاه را پیشنهاد می‌دهد اما اگر هدف حداقل‌کردن هزینه‌های پایش باشد مدل شبکه‌ی شامل ۱۲ حلقه چاه را پیشنهاد می‌دهد.

منابع

ولایتی، س. ۱۳۷۸. بررسی عوامل مؤثّر بر تغییرات کیفی آبخوان نیشابور، فصلنامه‌ی تحقیقات جغرافیایی. ۱۴۹: ۱۳۴-۱۱۹.

مؤسسه استاندارد وتحقیقات صنعتی ایران. ۱۳۸۷. آب آشامیدنی – ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی. تجدید نظر پنجم.

Loaiciga, H.A. and et al. 1992. Review of Ground-Water Quality Monitoring Network Design. Journal of Hydraulic Engineering. 118(1): 11-37.

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.

Bashi-Azghadi, N. 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.

Guo, Y., Wang, J.F. and Yin, X.L. 2011. Optimizing the groundwater monitoring network using MSN theory, Social and Behavioral Sciences. 21: 240-242.

McKinney, D.C. and Lin, M.D. 1994. Genetic algorithm solution of groundwater management models. Water Resource Research. 30(6): 1897–906.

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

Fisher, J.C. 2013. Optimization of water-level monitoring networks in the eastern Snake River Plain aquifer using a kriging-based genetic algorithm method, scientific investigations report. 2013-5120 U.S

Al-Mashagbah, A. 2015. Assessment of Surface Water Quality of King Abdullah Canal, Using Physico-Chemical Characteristics and Water Quality Index, Jordan. Journal of Water Resource and Protection. 7: 339-352.

Tiwari, T.N. and Mishra, M.A.1985. A preliminary assignment of water quality index of major Indian rivers. Indian journal of Environmental Protection 5(4), 276-279.

Şener, Ş., Şener, E. and Davraz, A. 2017. Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey). Science of the Total Environment.

Glover, F. and Laguna, M. 1998. Tabu search in Handbook of combinatorial Optimization. Springer. Tamer Ayvaz, M and Elçi, A. 2017. Seeking the optimum groundwater monitoring network using a genetic algorithm approach. 563:1078-1091

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.4, Vol. 16, Oct.-Nov. 2022, p. 777-788

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۶، مهر - آبان ۱۴۰۱، ص. ۷۸۸-۷۷۷

Identification of the Optimum Groundwater Quality Monitoring Network Using Tabu search (Case study of Neyshabur Watershed)

M. Moayyedian[1], A. Beheshti[2]*, A. Ziaei[3], R. Ghanbari[4]

Recived: Apr.21, 2022 Accepted: Jun.06, 2022

Abstract

Groundwater management requires accurate quantitative and qualitative monitoring of groundwater with proper spatial and temporal distribution. Minimizing the number of monitoring wells with maximum spatial distribution for making it economical to monitor groundwater systems is required by managers. Therefore, the structure of groundwater monitoring networks and the number of required wells becomes an engineering optimization problem. The purpose of this study is to find candidates for optimal monitoring network with the least number of wells that provide sufficient coverage to identify groundwater quality in an area. Hence, the excess wells in the network are identified. The meta-heuristic Tabu search algorithm has been used in this research. The objective function in this study consists of two conflicting goals. The first goal is the maximization of the match between the interpolated groundwater quality index distributions obtained using data from all wells and the wells from newly-generated network. The Nash-Sutcliffe model was utilized as a criterion to evaluate this compliance. In this study, groundwater quality is expressed using a water quality index, including nine quality parameters. The second goal is to minimize the number of monitoring wells selected to save on monitoring costs. The two mentioned goals are summed up in a function using a weight coefficient that determines the importance of the goals compared to each other. The mentioned model was used for a number of different active wells. Also, using the Tabu search algorithm, the best combination of different active wells that achieves the maximum objective function was identified. Optimal networks suggest managers and decision makers to choose the optimal network to monitor water quality according to the accepted budget and error. Consequently, this optimizing model could reduce the number of monitoring wells by 34 - 75%.

Keyword: Groundwater quality, Monitoring network, Optimization

1- MSc Student, Department of water engineering and science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad, Iran
2- Associate Professor, Department of water engineering and science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad, Iran
3- Associate Professor, Department of water engineering and science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad, Iran
4- Associate Professor, Department of Applied Mathematics, Faculty of Mathematics, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad, Iran
(*-Corresponding Author Email : Beheshti@um.ac.ir)