بهینه‌سازی چند هدفه شبکه پایش آب‌های زیرزمینی با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک(NSGA-II) و روش کریجینگ بیزین تجربی(EBK) (مطالعه موردی دشت سیلاخور)

مهدی کماسی[۱]، حسام گودرزی[۲]

تاریخ ارسال:۱۳۹۸/۰۲/۲۴
تاریخ پذیرش:۱۳۹۸/۱۰/۲۳

مقاله برگرفته از پایان‌نامه قطع کارشناسی ارشد

چکیده

پژوهش حاضر به توسعه یک مدل بهینه شبکه پایش با دو هدف کمینه کردن هزینه‌های پایش شبکه و بیشینه نمودن دقت مکانی شبکه پایش بر اساس کمینه کردن مقدار جذر میانگین خطا پرداخته است. به عنوان مطالعه موردی، طراحی بهینه شبکه پایش آب‌های زیرزمینی در دشت سیلاخور واقع در استان لرستان مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور داده‌های مورد استفاده در این پژوهش بر اساس روش کریجینگ بیزین تجربی(EBK) در محیط نرم‌افزار ArcGIS تولید و توابع هدف و فرآیند بهینه سازی در محیط نرم‌افزار Matlab کد نویسی شد تا بر اساس قیود درنظر گرفته شده در نسخه دوم الگوریتم ژنتیک(NSGA-II) بتوان بهینه‌ترین حالت شبکه را شناسایی نمود. مدل بهینه، از روش درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله(IDW) برای تولید سطح آب زیرزمینی استفاده می‌نماید و سپس با مقادیر داده‌های مشاهداتی مقایسه می‌گردد. نتایج بدست آمده از پژوهش کفایت یک شبکه با دوازده ایستگاه پایش را با توزیع مکانی بهینه برای آبخوان دشت سیلاخور مناسب می‌داند در حالی که شبکه پایش فعلی بیست و نه ایستگاه پایش دارد. همچنین مقدار جذر میانگین مربعات خطا(RMSE) برای شبکه بهینه ۰/۶۰۵ متر برآورد گردید. شبکه پایش بهینه در مقایسه با شبکه مشاهداتی موجود توانسته است تعداد ایستگاه‌های شبکه پایش به میزان ۶۰ درصد کاهش داده، توزیع مکانی ایستگاه‌ها را بهبود ببخشد و پهنه‌بندی مناسبی را نیز برای نقاط فاقد آمار پیش‌بینی نماید.

واژه‌های کلیدی: شبکه پایش، بهینه‌سازی چند هدفه، الگوریتم ژنتیک، کریجینگ بیزین تجربی، دشت سیلاخور.

[۱] دانشیار، دکتری مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آیت اله العظمی بروجردی(ره)، بروجرد، ایران، تلفن:۰۶۶۴۲۴۶۸۳۲۰، پست الکترونیکی:komasi@abru.ac.ir (نویسنده مسئول)

[۲] دانشجو، کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آیت اله العظمی بروجردی(ره)، بروجرد، ایران، تلفن:۹۸۹۳۹۳۱۸۲۷۵۳، پست الکترونیکی:hesam.goudarzi@abru.ac.ir

مقدمه

پایش، فرآیندی نظارتی با طرحی علمی و پویا است که بر مبنای مشاهده، اندازه‌گیری، نمونه‌برداری، ارزیابی و ثبت نتایج انجام می‌شود. بهینه‌سازی در شبکه پایش، فرآیند تصمیم‌گیری برای داشتن بهترین ترکیب در بین ایستگاه‌های موجود است.مطالعه، طراحی و اجرای هرگونه شبکه پایش بلندمدت بدون درنظر گرفتن فرآیند بهینه-سازی، هزینه‌های پایش را افزایش خواهد داد. از این رو مطالعه و طراحی شبکه پایش کمی و کیفی منابع آب باید بر مبنای فرآیندی دقیق صورت گیرد، فرآیندی که در آن، اهداف کاملا مشخص و معین شده باشند. شبکه پایش کمی آب زیرزمینی شامل تعدادی چاه مشاهداتی برای اندازه‌گیری تغییرات کمی آب زیرزمینی در آبخوان‌ها به صورت دوره‌ای و منظم است. (Hosseini and Kerachian, 2017). رویکرد و روش پژوهش در مدیریت منابع آب را می‌توان به دو دسته اصلی هیدروژئولوژیکی و آماری تقسیم کرد. هرچند، با رواج استفاده از ابزارهای داده‌کاوی در علوم مهندسی آب در دهه اخیر، این رویکرد نیز در دسته‌ای از پژوهش‌ها مورد توجه قرار گرفته است(جعفرزاده و همکاران، ۱۳۹۷.، Bashi-Azghadi & Kerachian, 2010; Khader & McKee, 2014). به همین سبب، می‌توان رویکرد داده‌کاوی را هم به عنوان نسل سوم از رویکردهای طراحی شبکه منظور کرد. به طورکلی رویکردهای هیدروژئولوژیکی با بهره‌گیری از اطلاعات هیدروژئولوژی همچون بارش، نرخ نفوذ و تبخیر منطقه به طراحی یک شبکه پایش با اهدافی شامل تعیین نوسانات سطح ایستابی، کشف آلودگی و... می‌پردازند. (Loaiciga et al., 1992). بهره‌گیری از روش‌های داده-کاوی به همراه رویکردهای آماری منجر به توسعه الگوریتم‌های ترکیبی شد. این فرآیند بیشتر در طراحی شبکه پایش مورد توجه قرار گرفته و نتایج قابل قبولی در بیشتر مطالعات ارائه نموده است. به عنوان نمونه فروغی و رضایی (۲۰۱۴)، به بهینه‌سازی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی در دشت تبریز با استفاده از روش زمین‌آمار[1] پرداختند. این پژوهش اطلاعات کمی وکیفی تعداد ۱۵۶ حلقه چاه در گستره آبخوان دشت تبریز، که توزیع بهینه-ای نداشتند را مورد مشاهده و مطالعه قرار داده است. در این پژوهش مدل‌های مختلف زمین‌آمار در شبیه‌سازی تغییرات تراز آب در دشت تبریز موردارزیابی و بررسی قرار گرفته و با استفاده از سه شیوه کاهش، افزایش و تغییر مکان چاه‌ها، شبکه پایش بهینه‌سازی شده است. نتایج بدست آمده نشان داد که با کاهش تعداد چاه‌های شبکه به میزان ۶۴٪ شبکه حاضر، شبکه بهینه برای پایش دشت حاصل می‌شود. همچنین بث و همکاران(۲۰۱۵) با استفاده از روش کریجینگ معمولی به طراحی شبکه پایش آب‌های زیرزمینی در فلوریدای آمریکا پرداختند. نتایج نشان داد برای کاهش خطای تخمین باید تعداد ۵۸ حلقه چاه موجود به ۴۴ حلقه چاه مشاهده‌ای در منطقه کاهش یابد. لیچ و همکاران(۲۰۱۶) تغذیه آب زیرزمینی را اساس طراحی شبکه پایش در نظر گرفتند و با استفاده از مدل بهینه‌سازی آنتروپی دوگانه به طراحی بهینه شبکه پایش آب‌های زیرزمینی پرداختند. بهره‌گیری از آنتروپی، روش مناسبی برای دست‌یابی به اطلاعات مشترک در بین چاه‌های مشاهداتی برای بهینه‌سازی بوده است. دهر و پتیل(۲۰۱۲) در پژوهش به ارایه روشی برای طراحی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی تحت شرایط عدم قطعیت شناختی در پیش‌بینی حرکت توده آلودگی با استفاده از نسخه دوم الگوریتم ژنتیک و کریجینگ پرداختند که بررسی نتایج بدست آمده، از کارآمدی روش پیشنهادی آن دو حکایت دارد. گنجی و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهش دیگری به بهینه‌سازی شبکه پایش تراز آب زیرزمینی با استفاده از روش فراکاوشی اجزای جمعی گسسته به منظور حداقل نمودن خطای درونیابی در شبکه بهینه شده پرداختند. شبکه مورد بررسی در پژوهش یاد شده با ۵۷ چاه مشاهده‌ای بود که در پایان به یک شبکه با ۴۲ حلقه چاه با درصد خطای مجاز ۳٪ کاهش یافت. میرزایی ندوشن و همکاران (۲۰۱۶) به طراحی دوهدفه شبکه پایش سطح آب زیرزمینی در دشت اشتهارد پرداختند. در این پژوهش، الگوریتم ژنتیک با

[1] Geostatistic Interpolation Approach

اهداف کمینه نمودن مقدار جذر میانگین خطا[1](RMSE) و کمینه نمودن تعداد چاه‌ها اجرا شد. نتیجهٔ این پژوهش ارایه یک جبهه پرتو[2] با نمایش تعداد چاه‌ها در مقابل RMSE متناظر با آن بود. لوو و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهش دیگری به بهینه‌سازی بلند مدت شبکه پایش آب-های زیرزمینی با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. در این پژوهش چهار تابع هدف برای بهینه‌سازی شبکه مشاهداتی در نظر گرفته شد که با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک تلاش در بدست آوردن جبهه پرتو هر یک از هدف‌های چهارگانه مورد توجه قرار گرفته است. نکته مهم دیگری که در شبکه پایش باید در نظر گرفت توزیع مکانی شبکه پایش است. با توجه به ناشناخته و پیچیده بودن تغییرات مکانی داده‌ها، از روش‌های مختلف درونیابی استفاده می‌شود و این روش‌ها با استفاده از رویکرد اعتبارسنجی تقابلی مقایسه می‌شوند و از بین آنها روشی که کمترین خطا را در پیش‌بینی دارد، انتخاب می‌گردد. به طور کلی روش‌های مختلفی برای درونیابی وجود دارد که در نگاه کلی می‌توان آنها را به دو دسته روش‌های قطعی شامل وزن‌دهی عکس فاصله، توابع پایه شعاعی، چند جمله‌ای‌های کلی و محلی و روش‌های زمین آماری شامل کریجینگ تقسیم‌بندی کرد. بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته از روش درونیابی کریجینگ برای برآورد تراز ایستابی در محدوده مورد مطالعه خود برای تشکیل پایگاه داده استفاده نموده اند(صفوی گردینی و همکاران، ۱۳۹۷؛ Pourshahabi et al., 2018; Esquivel et al., 2015). قربانی و همکاران (۲۰۱۸)، به ارزیابی روش کریجینگ بیزین تجربی در پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که دقت روش کریجینگ بیزین تجربی در مقایسه با سایر روش-های کریجینگ در تخمین سطح آب زیرزمینی بیشتر بوده و توانسته است مقدار خطا را تا حد مطلوبی کاهش دهد. روش کریجینگ بیزن تجربی طیف هموارتری را از تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد و الگوی ترسیم شده تراز آب زیرزمینی با این روش نیز متناسب با شیب عمومی منطقه مورد مطالعه است.

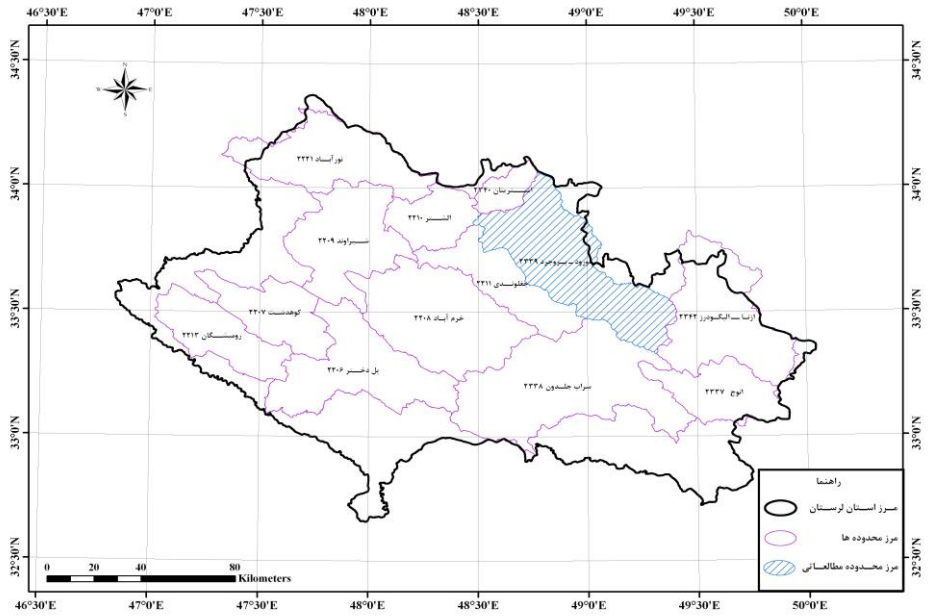
با رویداشت به توانایی روش کریجینگ بیزین تجربی در پیش‌بینی مکانی و نسخه دوم الگوریتم ژنتیک در یافتن نقاط بهینه، پژوهش حاضر به طراحی شبکه پایش چند هدفه آب‌های زیرزمینی در دشت سیلاخور با استفاده از داده‌های ۲۹چاه پیزومتری می‌پردازد. این پژوهش طراحی شبکه پایش بر اساس کمینه نمودن هزینه احداث و قرائت چاه‌ها و همچنین بیشینه کردن دقت مکانی مورد ارزیابی قرار می‌دهد. هدف اصلی این پژوهش ارایه روشی برای طراحی بهینه شبکه پایش آب‌های زیرزمینی به شکلی قابل اعتماد و کارآمد از تمام نقاط پتانسیل آبخوان می‌باشد.

مواد و روش‌ها

معرفی مطالعه موردی:

محدوده مطالعاتی در این پژوهش دشت سیلاخور بخشی از شهرستان‌های دورود و بروجرد واقع در استان لرستان می‌باشد این ناحیه با وسعت نسبتا زیاد به میزان ۲۵۴۵/۸ کیلومتر مربع در شمالی‌ترین قسمت حوزه آبریز کارون بزرگ بوده و زهکش اصلی این محدوده را رودخانه-های سیلاخور، ماربره و تیره تشکیل می‌دهند. شکل(۱)، منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. برای مدلسازی و طراحی شبکه بهینه در این پژوهش از دادهای آماری هفده سال اخیر دشت سیلاخور استفاده گردید که مشخصات آماری برای ایستگاه‌های مختلف آن در جدول(۱) بیان شده است. شایان ذکر است که در این آبخوان ۲۹ ایستگاه متفاوت موجود است که در هر منطقه سطح پزومتری آبخوان توسط یک چاه پیزومتری اندازه-گیری شده است.

[1] Root Mean Square Error
[2] Pareto



شکل(۱): محدوده مورد مطالعه، دشت سیلاخور

مبانی روش زمین آمار کریجینگ

روش زمین آمار کریجینگ یک درون‌یاب مکانی است که برای بدست آوردن برآورد خطی ناریب استفاده می‌شود. بهترین برآورد کننده خطی ناریب باید حداقل واریانس خطای برآورد را داشته باشد. معادله کلی کریجینگ به صورت رابطه(۱) تعریف می‌گردد (Huang et al., 2012).

(۱)

$$Z^*(x_p)=\sum_{i=1}^{n}\lambda_i Z(x_i)$$

در رابطه (۱)، $Z^*(x_p)$ مقدار محاسبه شده در مکان x_p، $Z(xi)$ مقدار معلوم در مکان λi xi وزن مرتبط با داده‌ها است. فرم کلی معادلات کریجینگ به شکل رابطه(۲) است.

(۲)

$$\sum_{l=1}^{v}\sum_{i=1}^{n_l}\lambda_{il}\gamma_{lv}(x_i,x_j)-\mu_v=\gamma_{uv}(x_j,x)$$

$$\sum_{i=1}^{n_l}\lambda_{il}=\begin{Bmatrix}1,1=u\\0,1\neq u\end{Bmatrix}$$

که u و v متغیرهای کوواریته اولیه و ثانویه هستند. در روش کریجینگ تغییرات u و v دارای همبستگی متقاطع است. برای آنالیز کریجینگ نیم تغییرنما متقاطع باید در ابتدا تعیین شود. در هر نقطه باید u و v اندازه‌گیری شده باشد و نیم تغییرنما متقاطع با معادله (۳) برآورد می‌شود.

جدول(۱): مشخصات آماری شبکه مشاهداتی موجود در آبخوان سیلاخور

سری زمانی ماهانه(۲۰۴ ماه)	میانگین	کمینه	بیشینه
تراز متوسط آب زیرزمینی (متر)	۱۴۹۹/۷۴	۱۴۹۶/۲۹	**۱۵۰۳/۲۱**
بارش (میلی متر)	۴۲/۷۶	۰	**۲۵۵/۲۵**
دما (درجه سلسیوس)	۱۵/۰۵	-۶	**۲۹/۹۰**
دبی (متر مکعب بر ثانیه)	۵۷/۳۹	۶/۳۷	**۴۸۲/۱۶**

(۳)

$$\begin{cases}\sum_{l=1}^{v}\sum_{i=1}^{n_l}\lambda_{il}\gamma_{lv}(x_i,x_j)-\mu_v=\gamma_{uv}(x_j,x)\\ \sum_{i=1}^{n_l}\lambda_{il}=\begin{cases}1, & 1=\mathrm{u}\\ 0, & 1\neq\mathrm{u}\end{cases}\end{cases}$$

مطلق بودن تخمین در درونیابی از ویژگی های عمده مدل کریجینگ می‌باشد. بدین مفهوم که مقدار تخمین کمیت در نقاط نمونه برداری با مقدار اندازه گیری شده برابر می‌باشد و واریانس تخمین صفر می‌گردد (Huang et al., 2012).

روش کریجینگ بیزین تجربی(EBK[1])

این روش یکی از روش‌های درون‌یابی است که در تحلیل‌های زمین آمار استفاده می‌گردد و نسبت به سایر روش‌های زمین آمار نیازی به تنظیم دستی پارامترها برای دستیابی به جواب‌های دقیق ندارد و طی فرآیند مدلسازی این تنظیمات را به صورت خودکار انجام می‌دهد. تفاوت این روش با سایر روش‌های کریجینگ در احتساب خطای‌های برآورد نیم‌تغییرنما است. این در حالی است که در سایر روش‌های کریجینگ، نیم‌تغییرنما از مکان‌هایی با داده‌های مشخص استفاده می‌کند و سپس از این نیم-تغییرنمای منفرد برای پیش‌بینی در مکان‌های نامشخص استفاده می‌شود. از جمله مزایای روش EBK می‌توان نیاز به حداقل عملیات در مدلسازی، پیش‌بینی خطای استاندارد دقیق‌تر از سایر روش‌های کریجینگ، پیش‌بینی دقیق داده‌های غیرایستا و دقت بیشتر نسبت به سایر روش‌های کریجینگ برای داده‌های کوچک اشاره نمود(Krivoruchko., 2012).

روش وزن‌دهی معکوس فاصله(IDW)

روش IDW یکی از روش‌های ساده درون‌یابی فضایی بشمار می‌رود که به عنوان نماینده روش‌های قطعی تشریح می‌گردد. تخمین IDW در نقاط با مقدار مجهول $\hat{Z}(x_0)$ با کمک میانگین وزنی همه اندازگیری-های موجود انجام می‌شود. به طور معمول وزن متناسب با معکوس فاصله است، بنابراین نزدیک‌ترین مشاهدات در دسترس تاثیر بیشتری در تخمین مقدار مجهول دارند. رابطه(۴)، بیانگر این روش است.

(۴)

$$\hat{Z}(x_0)=\frac{\sum_{j:\|x_j-x_0\|\le h}w(x_j)Z(x_j)}{\sum_{j:\|x_j-x_0\|\le h}w(x_j)},\quad w(x_j)=1/\|x_j-x_0\|^{-p}$$

که در آن، $\hat{Z}(x_0)$ مقدار مجهول در نقطه x_0، $Z(x_j)$ اندازه‌گیری‌های در دسترس در نقاط x_j، $w(x_j)$ وزن‌هایی که متناسب با فاصله بین x_0 و x_j هستند. معمولا این وزن‌ها به صورت توابع توانی فاصله اقلیدسی بین دو نقطه فضایی انتخاب می‌شوند($\|x_j-x_0\|^{-p}$) مقدار p معمولا دو انتخاب می‌گردد (صابری و سلطانی، ۱۳۹۶).

الگوریتم ژنتیک NSGA-II

الگوریتم ژنتیک از پرکاربردترین و قدرتمندترین الگوریتم‌های موجود در حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه است. در این الگوریتم، در گام اول جمعیت اولیه به صورت تصادفی تولید می‌شود، سپس بر اساس شایستگی جمعیت در هر نسل مرتب می‌گردد. الگوریتم ژنتیک شامل عملگرهای کدگذاری، ارزیابی، انتخاب، ترکیب، جهش و رمزگشایی است. ابتدا متغیرهای مساله کدگذاری می‌شود. در مرحله ارزیابی تابع برازندگی از روی توابع هدف هر رشته را با یک مقدار عددی ارزیابی می‌کند و کیفیت آن را مشخص می‌نماید. هر چه کیفیت رشته جواب بیشتر باشد مقدار برازندگی جواب بیشتر بوده و احتمال مشارکت برای تولید نسل بعدی افزایش خواهد یافت. در مرحله انتخاب یک جفت از کروموزم‌ها برگزیده می‌شوند تا با هم ترکیب شوند. روند انتخاب حالت تصادفی دارد و معیار انتخاب برازندگی است. در عملگر ترکیب نسل قدیمی کروموزم‌ها با یکدیگر مخلوط و ترکیب می‌شوند و نسل تازه‌ای از کروموزم‌ها را پدید می‌آورند. عملگر ترکیب سبب از بین رفتن پراکندگی یا تنوع ژنتیکی جمعیت می‌شود و

[1] Empirical Bayesian kriging

در واقع اجازه می‌دهد ژن‌های خوب با یکدیگر ترکیب شوند. پس از آن، عملگر جهش جواب‌های ممکن دیگر را تولید می‌کند. عملگر جهش باعث جستجو در فضاهای دست نخورده‌ی مساله می‌گردد و مهم‌ترین وظیفه آن جلوگیری از همگرایی در بهینه محلی است. شکل(۲)، شمای کلی این عملگرها را نشان می‌دهد(Konak et al., 2006).

الگوریتم NSGA-II یکی از رایج‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه نخبه‌گرا می‌باشد که نسخه بهبود یافته NSGA است. الگوریتم NSGA-II برگرفته از الگوریتم GA است با این تفاوت که الگوریتم در رده‌ی الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه قرار می‌گیرد و در مساله بهینه‌سازی هم‌زمان چند هدف را دنبال می‌نماید. همچنین دو ویژگی اصلی آن نخبه‌گرایی و فاصله ازدحام است. روند نخبه‌گرایی در NSGA-II به این صورت است که پس از ایجاد جمعیت اولیه، جمعیت بر پایه برتری نسل‌ها در جبهه‌های متعدد مرتب می‌گردد. اولین جبهه یک مجموعه نسبت به سایر جبهه‌ها برتر است چرا که هیچ یک از کروموزوم‌های این جبهه توسط سایر کروموزوم‌ها مغلوب نمی‌شوند. کروموزوم‌های جبهه دوم توسط کروموزوم‌های جبهه اول مغلوب می‌شوند اما نسبت به جبهه‌های بعدی برتر هستند. این روند در تمامی جبهه‌های بعدی نیز ادامه دارد و به این صورت روند نخبه-گرایی در هر نسل مشخص می‌شود. علاوه بر این، NSGA-II مقیاسی به نام فاصله ازدحام که فاصله هر کروموزوم نسبت به همایگانش را نشان می‌دهد، در نظر می‌گیرد. فاصله ازدحام همان فاصله اقلیدسی را بین کروموزوم‌ها را بر اساس m هدف در یک فضای m بعدی نمایش می‌دهد. در واقع NSGA-II به کمک فاصله ازدحام تلاش دارد تا جمعیت با تنوع بهتر ایجاد نماید تا در فرآیند نخبه‌گرایی جواب‌های بیهنه دقیق‌تری را ارائه نماید. از آنجا که الگوریتم NSGA-II در شمار الگوریتم-های بهینه‌سازی چند هدفه است، در پایان فرآیند بهینه-سازی مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه را ارائه می‌دهد که به مجموعه جواب پرتو معروف است(Konak et al., 2006).

توابع هدف در فرآیند بهینه‌سازی شبکه پایش

طراحی بهینه شبکه پایش آب‌های زیرزمینی نیازمند اهداف مشخص است تا بتوان به این وسیله فرآیند بهینه-سازی را مقید نمود. به این منظور دو تابع هدف برای طراحی بهینه شبکه پایش تعریف می‌گردد. ۱-کمینه کردن تعداد چاه‌های مشاهداتی در محدوده مطالعه به عنوان نماینده هزینه‌های احداث، نگهداری و قرائت سطح آب. ۲-بیشینه کردن دقت پایش مکانی با کاهش مقدار جذر میانگین مربعات خطا(RMSE) بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر مدلسازی شده در نقاط پتانسیل احداث چاه. این توابع در روابط (۵)، (۶) و (۷) بیان گردیده است.

(۵)
$$Minimization\{f_1(number\ of\ wells) = f_1(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N)\}$$

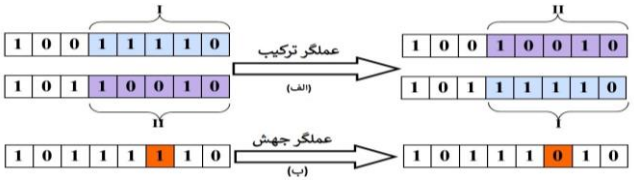
(۶)
$$Minimization\{f_2(RMSE) = f_2(RMSE_1, RMSE_2, RMSE_3, \dots, RMSE_N)\}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}(Hobs_i^t - Hest_i^t)^2}{TN}} \quad (۷)$$

که در آن f_1 تابع هدف اول، f_2 تابع هدف دوم، $RMSE$ جذر میانگین خطا، X نماینده چاه‌های پتانسیل، N تعداد چاه‌های پتانسیل، f_2 تابع هدف دوم، $Hobs^t_i$ تراز آب زیرزمینی مشاهداتی در نقطه i و زمان t، $Hest^t_i$ تراز آب زیرزمینی تخمین زده شده در مدل شبیه‌ساز در نقطه i و زمان t و T کل بازه زمانی مورد استفاده است.

آماره‌های ارزیابی

به منظور ارزیابی و صحت سنجی داده‌های درونیابی شده از سه معیار ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE)[1]، ریشه دوم میانگین مربع خطای استاندارد شده (RMSSE) و ضریب همبستگی[2] (CC) که در روابط (۸) تا (۱۰) نشان داده شده ست، استفاده گردید.



شکل(۲): (الف)عملگر ترکیب، (ب) عملگر جهش در فرآیند الگوریتم ژنتیک

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(X_{pi} - X_{mi}\right)^2} \quad (۸)$$

$$\mathrm{RMSSE} = \frac{\mathrm{RMSE}}{\mathrm{S}} \quad (۹)$$

$$CC = \frac{\sum Z_p * Z_m}{n},\ Z_p = \frac{X_p - \overline{X_p}}{n},\ Z_m = \frac{X_m - \overline{X_m}}{n} \quad (۱۰)$$

که در این روابط، هرکدام از پارامترها به ترتیب عبارتند از: X_{pi}: مقدار داده مشاهده شده، X_{mi}: مقدار داده محاسبه شده توسط مدل، $\bar{X}_p$: میانگین مقدار مشاهده شده، $\bar{X}_m$: میانگین مقدار داده محاسبه شده توسط مدل، n: تعداد داده‌ها(کماسی و شرقی، ۱۳۹۶).

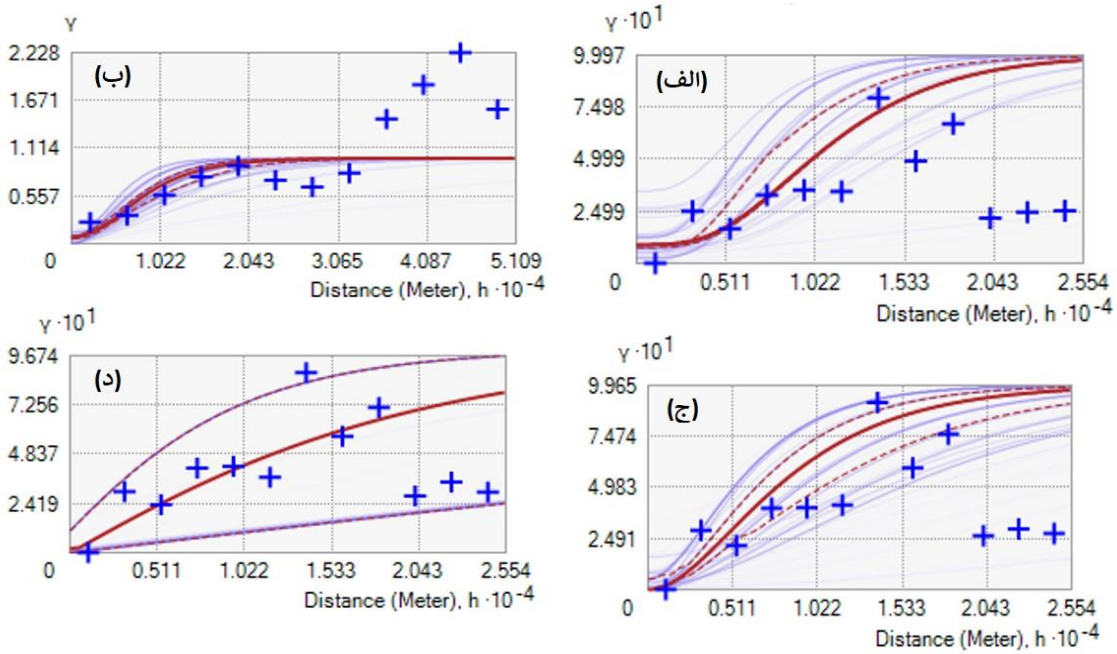
نتایج و بحث

در این پژوهش داده‌های ماهانه تراز آب در دشت سیلاخور بدست آمده از بیست و نه حلقه چاه مشاهداتی در بازه زمانی ۱۳۹۳-۱۳۷۶ برای تهیه پایگاه داده مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های بیست و نه حلقه چاه مشاهداتی در محیط نرم‌افزار ArcGIS بارگذاری و با استفاده از روش کریجینگ بیزین تجربی(EBK) در محدوده مورد مطالعه درونیابی گردید. این روش با چهار مدل نیم‌تغییرنمای K-Bessel، K-Bessel Detrended، Detrended Exponential و Whittle Detrended استفاده شده است. شکل(۳)، نیم‌تغییرنماهای روش کریجینگ بیزین تجربی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل شماره (۳) مشاهده می‌شود خطوط قرمز ممتد مقادیر میانه و خط چین‌ها مقادیر ۲۵ و ۷۵ درصد آستانه را نشان می‌دهند. خطوط آبی رنگ که در این جا به شکل ابر نیم تغییرنما ترسیم شده‌اند نیز متناسب با وزن نیم تغییرنماهای تخمینی می‌باشند، به‌طوری که ضخامت بیش‌تر خطوط، افزایش وزن نیم تغییرنماها را نشان می دهند، یعنی بیشتر نیم تغییرنماهای ترسیمی در آن نواحی بوده است. همان‌طورکه در نمودار نیز مشخص است، مدل برازش داده شده دارای اثر قطعه‌ای کمی است که این موضوع نشان‌دهنده غلبه بیش‌تر واریانس بخش ساختاری نیم تغییرنما بر واریانس بخش تصادفی آن است. نتایج مربوط به ارزیابی متقابل برآورد تراز آب در جدول شماره (۲) ارائه شده است. همانگونه که در این جدول مشخص است، کمترین مقدار RMSE شده بین مقادیر واقعی و برآورد شده در روش کریجینگ بیزن تجربی با نیم تغییرنمای K-Bessel Detrended با مقدار ۲۰/۸۷ متر می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌گردد که روش کریجینگ بیزن تجربی با نیم تغییرنمای K-Bessel Detrended، بر اساس معیار میانگین توان دوم خطا (۲۰/۸۷) متر و بیشترین ضریب همبستگی (۰/۸۲) بهترین روش درون‌یابی می‌باشد. روش‌های کریجینگ بیزین با مدل‌های Whittle Detrended، K-Bessel و Exponential Detrended به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

[1] Root Mean Squared Error
[2] Correlation Coefficient

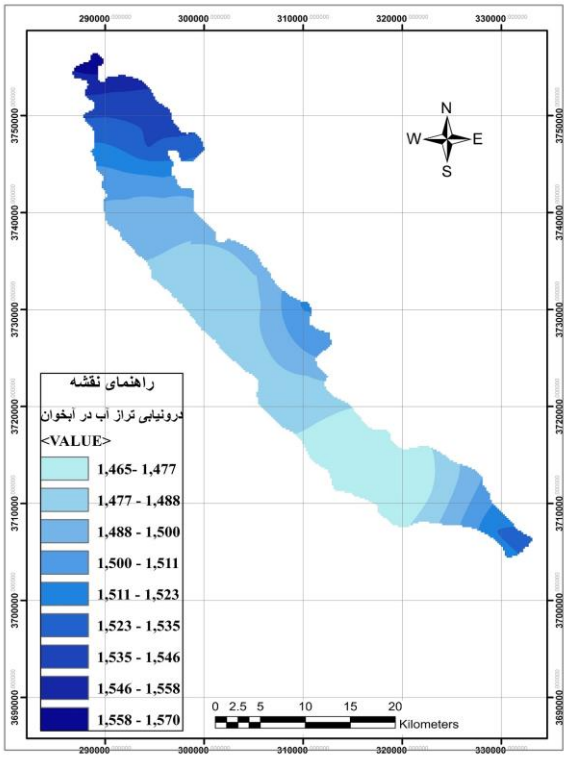
جدول(۲): خطاهای تخمین زده شده برای هریک از روش‌های نیم تغییرنما در مدل EBK

نیم‌تغییرنما	RMSE(m)	RMSEE	CC
K-Bessel Detrended	۲۰/۸۷	۰/۹۹	**۰/۸۲**
K-Bessel	۲۱/۷۵	۰/۹۳	**۰/۸۱**
Whittle Detrended	۲۱/۵۹	۰/۹۵	**۰/۸۱**
Exponential Detrended	۲۲/۰۰	۱/۰۲	**۰/۸۰**

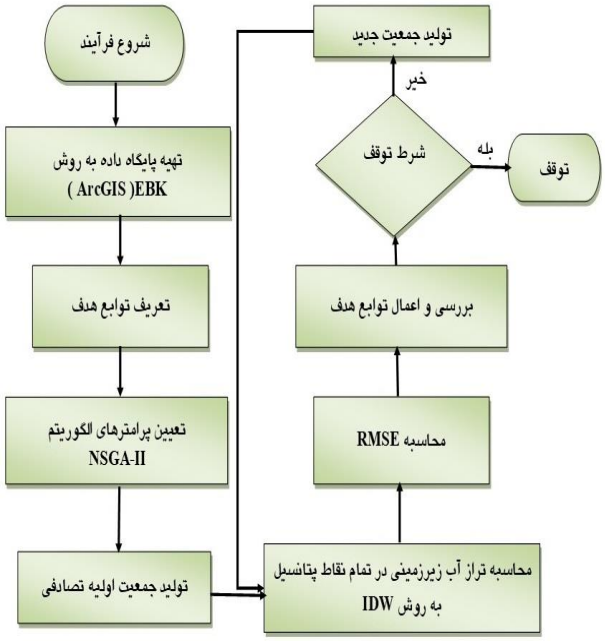


شکل(۳): نمودار نیم تغییرنما در روش کریجینگ بیزین تجربی (الف)K-Bessel Detrended ، (ب) K-Bessel، (ج) Whittle Detrended، (د) Exponential Detrended

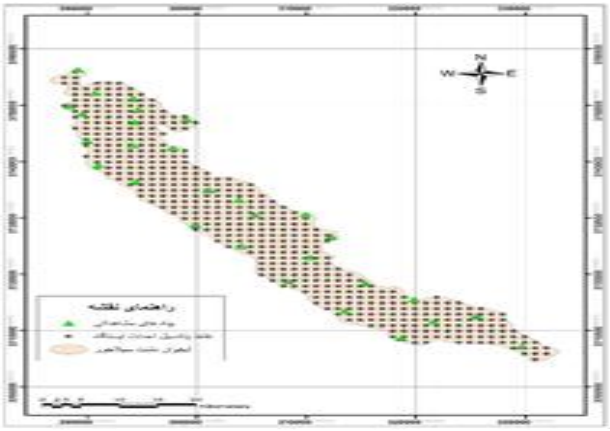
شکل(۴)، پهنه‌بندی آبخوان بر اساس مدل EBK برای میانگین ماهانه تراز آب زیرزمینی هفده سال را نشان می‌دهد. اطلاعات بدست آمده از این روش به عنوان داده-های مشاهداتی درنظر گرفته شد تا با داده‌های محاسباتی که در محیط نرم‌افزار Matlab با استفاده از روش وزن دهی عکس فاصله(IDW) تولید می‌گردد مقایسه شوند. شکل(۵) فرآیند طراحی شبکه بهینه را نشان می‌دهد. حل مساله بهینه‌سازی چند هدفه در طراحی شبکه پایش توسط نسخه دوم الگوریتم ژنتیک(NSGA-II) در برنامه Matlab کدنویسی شد.. پارامترهای الگوریتم ژنتیک شامل تعداد تکرار، جمعیت اولیه، احتمال تزویج و احتمال جهش می‌باشد که به ترتیب ۲۰۰، ۱۰۰۰، ۰/۷ و ۰/۲ فرض گردید.پس از پهنه‌بندی منطقه مورد مطالعه، بر اساس نشریه شماره ۶۶۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، دستور العمل رفتارسنجی کمی آب‌های زیرزمینی، نقاط پتانسیل احداث چاه برای طراحی شبکه پایش بهینه در دشت سیلاخور تعیین گردید. تعداد نقاط پتانسیل احداث ایستگاه در این منطقه ۴۹۲ نقطه بدست آمد که تراز آب در این نقاط مطابق پهنه‌بندی صورت گرفته با استفاده از روش EBK محاسبه و به عنوان پایگاه داده مشاهداتی تعیین گردید. سپس بر اساس روش IDW که در محیط Matlab کدنویسی شده است، تراز آب در نقاط پتانسیل محاسبه شد تا پایگاه داده محاسباتی را برای تعیین شبکه پایش بهینه تشکیل دهد.



شکل(۴): پهنه‌بندی دشت سیلاخور بر اساس روش EBK برای هفده سال داده آماری



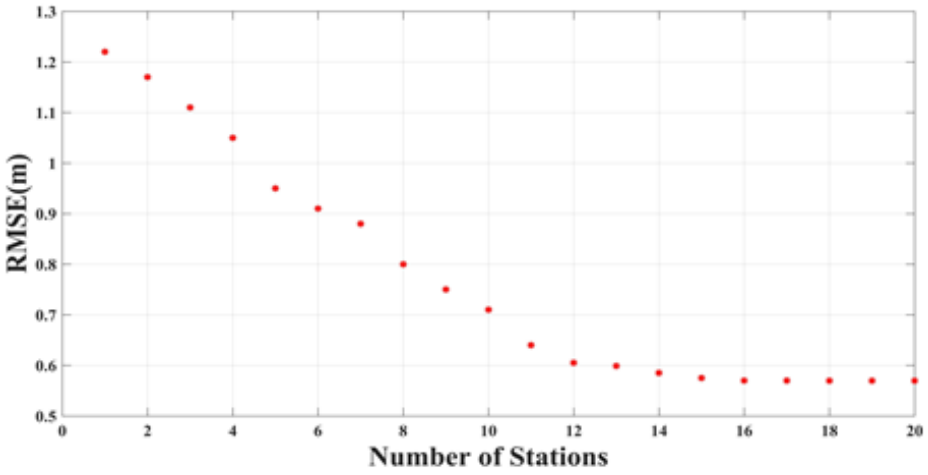
شکل(۵): روندنمای بهینه‌سازی در طراحی شبکه پایش آب‌های زیرزمینی



شکل(۶): موقعیت چاه‌های مشاهداتی و نقاط پتانسیل در دشت سیلاخور

شکل(۶)، موقعیت چاه‌های مشاهداتی و ایستگاه‌های پتانسیل را در کنار هم نشان می‌دهد. در ادامه فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از رابطه(۷)، مقدار RMSE برای نقاط پتانسیل تعیین شده و پس از آن بر اساس توابع هدف وارد الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II می‌گردد. بر اساس نتایج محاسبات صورت گرفته، شبکه بهینه بدست آمده شامل دوازده حلقه چاه مشاهداتی می‌باشد. از آنجا که پاسخ بدست آمده ازالگوریتم بهینه‌ساز شامل ترکیبی از تعداد ایستگاه‌ها و موقعیت آنها است، الگوریتم بهینه‌ساز پاسخ را در قالب جبهه پرتو که بیانگر تعداد ایستگاه‌های بهینه در مقابل RMSE می‌باشد، ترسیم می‌نماید.

شکل(۷)، جبهه پرتو بدست آمده برای شبکه پایش با دوازده ایستگاه را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل(۷) مشخص است شبکه با دوازده ایستگاه دارای مقدار RMSE برابر ۰/۶۰۵ متر است که مقدار خطای کمی را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۸)، توزیع مکانی این دوازده ایستگاه پایش را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل (۸) مشخص است، برنامه یک شبکه پایش با دوازده ایستگاه را مشخص نموده است که در مقایسه با شبکه موجود ۶۰ درصد تعداد ایستگاه‌ها کاهش یافته است. نکته مهم دیگر اینکه شبکه پایش جدید با تغییر



شکل(۷): جبهه پرتو طراحی بهینه شبکه پایش جهت تعیین تعداد بهینه ایستگاه‌ها

مقدار RMSE متناظر با تعداد بیست ونه ایستگاه برابر ۰/۵۴۰ متر است. در نگاه نخست این چنین برمی‌آید که افزایش تعداد ایستگاه‌های پایش سبب افزایش دقت شبکه و کاهش مقدار RMSE می‌گردد. اما تابع هدف دیگر یعنی کمینه کردن هزینه‌های شبکه پایش از توصیه شبکه با تعداد ایستگاه بیشتر جلوگیری می‌نماید چرا که افزایش تعداد ایستگاه‌ها سبب افزایش هزینه احداث و قرائت شبکه می‌گردد. در مقایسه شبکه با دوازده ایستگاه، افزایش هفده ایستگاه تنها

توانسته ۱۲٪ مقدار خطای شبکه را کاهش دهد. شکل(۹) پهنه‌بندی منطقه مورد مطالعه را بر اساس ایستگاه‌های موجود در شکل(۸) را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل(۹) مشخص است توزیع مکانی نشان داده شده توانسته برآورد مطلوبی را از سطح آب محل ایستگاه‌های پایش مطابق با شکل(۹)، توانسته است توزیع مکانی را بهبود ببخشد و سبب افزایش دقت پهنه-بندی در مناطق فاقد آمار گردد. همانگونه که در این شکل مشخص است شبکه بهینه بدست آمده در محدوده شمال غرب آبخوان سه ایستگاه پایش را توصیه می‌نماید. بررسی دقیق‌تر این منطقه یک تالاب را نشان می‌دهد که تاثیر بسزایی بر تراز آب زیرزمینی در آبخوان دشت سیلاخور دارد به همین علت توصیه سه ایستگاه پایش برای این منطقه قابل توجیه است.

زیرزمینی در دشت سیلاخور داشته باشد که سبب دقت در مدلسازی در نقاط فاقد آمار و همچنین برنامه‌ریزی‌های مدیریتی در بحث مدیریت منابع آب زیرزمینی می‌گردد. باز طراحی شبکه پایش آب زیرزمینی در دشت سیلاخور توانسته است توزیع مکانی چاه‌های مشاهده ای را بهبود ببخشد. همچنین افزایش تعداد ایستگاه‌های پایش سبب افزایش دقت پهنه بندی آبخوان در نقاط فاقد آمار تراز آب زیرزمینی گردیده است. از طرف دیگر شبکه جدید می-تواند زمینه مناسبی را برای مدیریت منابع آب زیرزمینی، مدلسازی مکانی-زمانی آبخوان و به دنبال آن بررسی و پیش‌بینی جریان آب زیرزمینی و ریسک ناشی از فرونشست دشت را فراهم آورد.

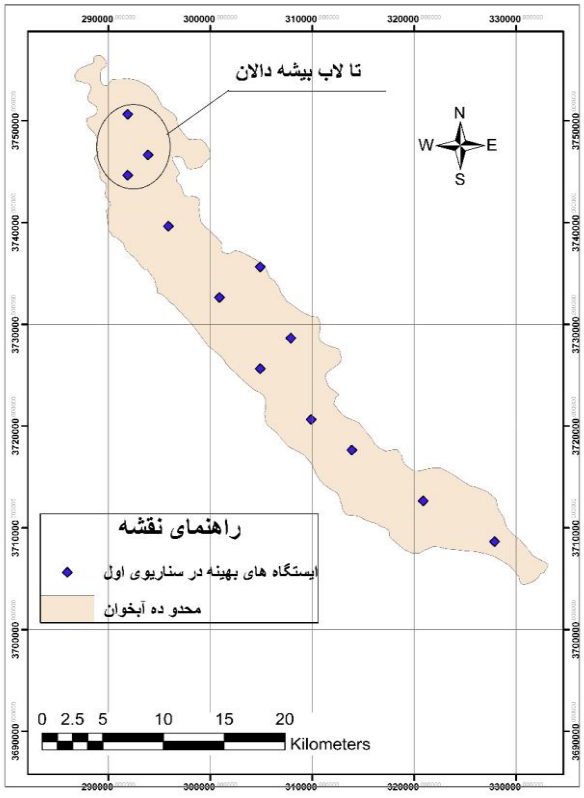
نتیجه گیری

در این پژوهش سعی شده است با ارائه یک روش بهینه‌ساز یک شبکه پایش سطح آب زیرزمینی طراحی

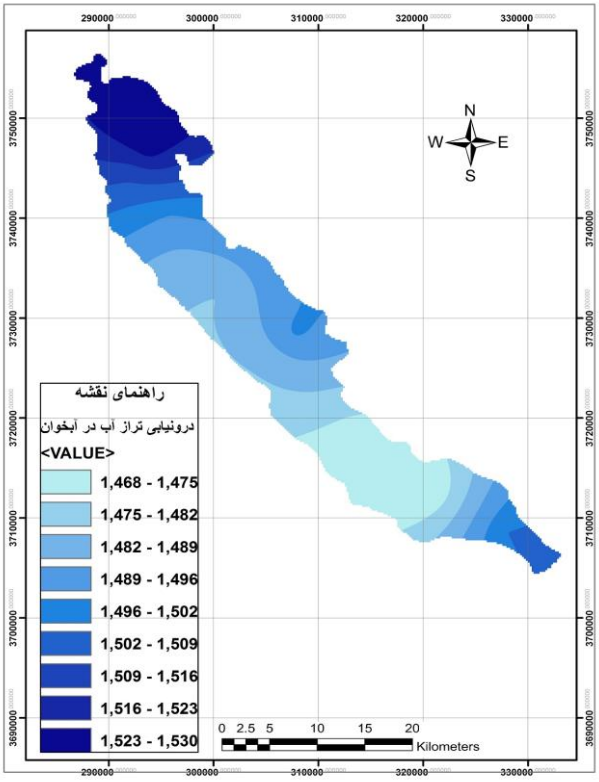
گردد. طراحی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی با در نظر گرفتن تمام نقاط پتانسیل در محدوده آبخوان طراحی می‌گردد. به این معنا که طراحی شبکه پایش از یک چاه تا هر چند چاه انجام می‌شود و فضای جستجوی الگوریتم

محاسباتی سطح آب زیرزمینی در شبیه‌ساز از روش IDW بهره‌گرفته شد. در این پژوهش مشاهده شد که می‌توان به کمک روشی مبنی بر بهینه‌سازی یک شبکه پایش سطح آب زیرزمینی طراحی گردد. در نهایت جواب مساله به صورت یک جبهه پرتو به دست آمد که می‌توان با تعیین دقت مورد نیاز از داده‌برداری در شبکه پایش سطح آب زیرزمینی، تعداد چاه‌های مشاهداتی و بهترین موقعیت چاه‌ها را در منطقه مشخص نمود. جبهه پرتو بهینه‌سازی تمام نقاط پتانسیل محدوده آبخوان است. برای بهینه‌سازی مساله از الگوریتم قدرتمند و پرکاربرد NSGA-II استفاده شد و برای محاسبه مقادیر

بدست آمده در پژوهش حاضر مقدار جذر میانگین مربعات خطا را برای شبکه پایش با دوازده ایستگاه پایش ۰/۶۰۵ متر نشان داد که سبب کاهش تعداد ایستگاه‌ها از بیست و نه ایستگاه به دوازده ایستگاه است. از طرفی شبکه جدید توانست با تغییر مکان‌های ایستگاه‌های پایش نسبت به شبکه موجود توزیع مکانی را نیز بهبود ببخشد که این مساله سبب افزایش دقت در پهنه‌بندی مکانی در آبخوان دشت سیلاخور گردیده است.



شکل(۸): ایستگاه‌های منتخب در طراحی بهینه شبکه پایش



شکل ۹- پهنه‌بندی بر اساس دوازده ایستگاه منتخب

منابع

جعفرزاده، م.، خاشعی سیوکی، ع.، ۱۳۹۷، ارزیابی عملکرد مدل بهینه‌سازی شبکه پایش آب زیرزمینی بر پایه شبکه عصبی و جست و جوی گرگ خاکستری، نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، شماره ۳۱، ۱۳۹-۱۲۱.

صابری، ع.، سلطانی گردفرامرزی، س.، ۱۳۹۶، ارزیابی روش‌های زمین‌آمار در پهنه‌بندی شدت خشک‌سالی استان آذربایجان غربی، نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، شماره ۲۷، ۱۶۵-۱۵۱.

صفوی گردینی، م.، محمدرضاپور، ا.، بهرامی، ع.، محمدی صدیق، م.، سالاری جزی، م.، ۱۳۹۷، بررسی و ارزیابی تغییرات مکانی متغیرهای کیفی آب زیرزمینی جنوب دشت قروه و دهگلان با استفاده از روش‌های زمین آمار، نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، شماره ۳۳، ۱۸۲-۱۶۷.

فروغی، ف. رضایی، م. ۱۳۹۲، بهینه‌سازی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی در دشت تبریز با استفاده از روش زمین آمار، فصلنامه زمین‌شناسی محیط زیست (نشریه علمی-پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر). دوره ۷، شماره۲۲، ۱۰۳-۹۳.

قربانی، خ، سلاری‌جزی، م، فرنیا، ا. ۱۳۹۷، ارزیابی روش کریجینگ بیزین تجربی در پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی، پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، دوره۲۵، شماره۱، صفحه ۱۶۵-۱۸۲.

کماسی، م.، شرقی، س.، ۱۳۹۶، روندیابی عوامل موثر بر کاهش تراز آب زیرزمینی با بهره‌گیری از تبدیلات موجک متقابل و ارتباطی، نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، شماره ۲۸، ۱۵۱-۱۳۸.

گنجی خرم دل، ن. کیخانی، ف. ۱۳۹۵. طراحی بهینه چاه‌های مشاهده‌ای در یک شبکه پایش سطح آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم فوق ابتکاری ژنتیک، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز (نشریه علمی-پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری). دوره ۷، شماره ۱۴، ۱۶۶-۱۵۹.

میرزایی ندوشن، ف. بزرگ حداد، ا. خیاط خلقی، م. ۱۳۹۵، طراحی دو هدفه شبکه پایش سطح آب زیرزمینی با استفاده از NSGA-II در دشت اشتهارد، مجله تحقیقات آب و خاک ایران (نشریه پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران). دوره ۴۷، شماره۲، ۳۵۴-۳۴۵.

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(10), pp.2189-2198.

Bhat S, Motz LH, Pathak C and Kuebler, L, 2015. Geostatistics-based groundwater-level monitoring network design and its application to the Upper Floridan aquifer, USA. Environmental monitoring and assessment, 187(1): 4183.

Dhar A, and Patil RS, 2012. Multiobjective design of groundwater monitoring network under epistemic uncertainty. Water resources management, 26(7): 1809-1825.

Esquivel, J.M., Morales, G.P. and Esteller, M.V., 2015. Groundwater monitoring network design using GIS and multicriteria analysis. Water resources management, 29(9), pp.3175-3194.

Hosseini, M. and Kerachian, R., 2017. A Bayesian maximum entropy-based methodology for optimal spatiotemporal design of groundwater monitoring networks. Environmental monitoring and assessment, 189(9), p.433.

Huang, Z., Wang, H. and Zhang, R., 2012. An improved kriging interpolation technique based on SVM and its recovery experiment in oceanic missing data. American Journal of Computational Mathematics, 2(01), p.56.

Khader, A.I. and McKee, M., 2014. Use of a relevance vector machine for groundwater quality monitoring network design under uncertainty. Environmental modelling & software, 57, pp.115-126.

Konak A, Coit DW, Smith AE, 2006. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. Reliab. Eng. Syst. Saf. 91, 992–1007.

Krivoruchko, K., 2012. Empirical bayesian kriging. ArcUser Fall, pp.6-10.

Leach JM, Coulibaly P, Guo Y, 2016. Entropy based groundwater monitoring network design considering spatial distribution of annual recharge. Advances in water resources. 96(1):108-19.

Loaiciga HA, Charbeneau RJ, Everett LG, Fogg GE, Hobbs BF, and Rouhani S, 1992. Review of ground-water quality monitoring network design. Journal of Hydraulic Engineering, 118(1), 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.

Pourshahabi, S., Talebbeydokhti, N., Rakhshandehroo, G. and Nikoo, M.R., 2018. Spatio-Temporal Multi-Criteria Optimization of Reservoir Water Quality Monitoring Network Using Value of Information and Transinformation Entropy. Water Resources Management, pp.1-16.

Multi-Objective Optimization Groundwater Network Using Genetic Algorithm (NSGA-II) and Empirical Bayesian Kriging (EBK) Method (Case Study: Silakhor plain)

Mehdi Komasi[1], Hesam Goudarzi[2]

Abstract

Groundwater resource management depended on data obtained from the aquifer. Groundwater monitoring network can provide groundwater levels, but sometimes this information so much and not useful. This study develops a new multi-objective simulation-optimization model involving two objectives: minimization of the total sampling cost for monitoring and maximization the spatially monitoring accuracy. Optimal design of groundwater network was considered in the Silakhor plain, regions of Lorestan, Iran. As the first step, a database includes of groundwater elevation in potential wells with use empirical Bayesian kriging (EBK) method in ArcGIS was produced. Inverse distance weighting (IDW) method used as simulation model and objective functions written in MATLAB software. Optimal groundwater monitoring network determines with preset conventions and finds by the non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II). At final, a network with twelve observation stations that shown root mean square error (RMSE) value 0.605 meter. The optimal monitoring network, in comparison with the existing observation network, has been able to reduce the number of monitoring stations by 60%, improve the spatial distribution of stations, and predict appropriate zoning for unpredictable points.

Keywords: Monitoring network, Multi-objective optimization, Genetic algorithm, Empirical Bayesian kriging, Silakhor plain.

[1]Associated Professor, Department of Civil Engineering, University of Ayatollah Ozma Borujerdi, Borujerdi, Iran. Komasi@abru.ac.ir
[2] M.Sc. Student of Civil Engineering – Water Engineering and Hydraulic Structures, University of Ayatollah Ozma Borujerdi, Borujerdi, Iran. Hesam.goudarzi@abru.ac.ir

Multi-Objective Optimization Groundwater Network Using Genetic Algorithm (NSGA-II) and Empirical Bayesian Kriging (EBK) Method (Case Study: Silakhor plain)

Mehdi Komasi[1], Hesam Goudarzi[2]

Abstract

Introduction

Groundwater resource management depended on data obtained from the aquifer. Monitoring is a process with a scientific and dynamic design that is based on observation, measurement, sampling, evaluation and recording of information. Groundwater monitoring network optimization is the decision-making process for having the best combination among existing stations. Studying, designing and implementing any long-term monitoring network without considering the optimization process will increase the monitoring costs. Groundwater monitoring network can provide groundwater levels, but sometimes this information so much and not useful.

Methodology

The main purpose of this study is to provide a method for optimal design of groundwater monitoring network in a reliable and efficient way from all points of the aquifer potential. This study develops a new multi-objective simulation-optimization model involving two objectives: minimization of the total sampling cost for monitoring and maximization the spatially monitoring accuracy. Optimal design of groundwater network was considered in the Silakhor plain, regions of Lorestan, Iran. As the first step, a database includes of groundwater elevation in potential wells with use empirical Bayesian kriging (EBK) method in ArcGIS was produced. Inverse distance weighting (IDW) method used as simulation model and objective functions written in MATLAB software. Optimal groundwater monitoring network determines with preset conventions and finds by the non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II). The NSGA-II algorithm is one of the most common elite multi-objective optimization algorithms, which is an improved version of the NSGA. The NSGA-II algorithm is derived from the GA algorithm, with the difference that the algorithm is in the category of multi-objective optimization algorithms and pursues several objectives simultaneously in the optimization problem. Also, its two main features are elitism and crowding distance. The trend of elitism in NSGA-II is that after the initial population is created, the population is organized on the basis of generational superiority on multiple fronts. The optimal model uses the Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation method to generate the groundwater level and then compares it with the values of the observational data. In order to evaluate and validate the interpolated data, the three criteria of root mean square error (RMSE), root mean square standard error (RMSSE) and correlation coefficient (CC) were used.

Results and Discussion

In this study, monthly water level data in Silakhor plain obtained from twenty-nine observation wells in the period 1376-1397 were used to prepare the database. Twenty-nine observational well data were loaded into ArcGIS software environment and interpolated in the study area using experimental benzene kriging (EBK) method. This method has been used with four semi-variable models K-Bessel Detrended, K-Bessel, Exponential Detrended and Whittle Detrended. Solving the multi-objective optimization problem in monitoring network design was coded by the second version of the genetic algorithm (NSGA-II) in Matlab program. The genetic algorithm parameters include number of iterations, initial population, mating probability and mutation probability, which are 200, 1000, 0.7

[1] Associated Professor, Department of Civil Engineering, University of Ayatollah Ozma Borujerdi, Borujerdi, Iran. Komasi@abru.ac.ir

[2] M.Sc. Student of Civil Engineering – Water Engineering and Hydraulic Structures, University of Ayatollah Ozma Borujerdi, Borujerdi, Iran. Hesam.goudarzi@abru.ac.ir

and 0.2 were assumed respectively. At final, a network with twelve observation stations that shown root mean square error (RMSE) value 0.605 meter. The optimal monitoring network, in comparison with the existing observation network, has been able to reduce the number of monitoring stations by 60%, improve the spatial distribution of stations, and predict appropriate zoning for unpredictable points. Redesign of the groundwater monitoring network in Silakhor plain has been able to improve the spatial distribution of observation wells. Also, increasing the number of monitoring stations has increased the accuracy of aquifer zoning in areas without groundwater level statistics. On the other hand, the new network can provide a good ground for groundwater resources management, spatial-temporal modeling of the aquifer, followed by the study and forecast of groundwater flow and the risk of subsidence.

Keywords: Monitoring network, Multi-objective optimization, Genetic algorithm, Empirical Bayesian kriging, Silakhor plain.

The most important references

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*(10), pp.2189-2198.

Bhat S, Motz LH, Pathak C and Kuebler, L, 2015. Geostatistics-based groundwater-level monitoring network design and its application to the Upper Floridan aquifer, USA. Environmental monitoring and assessment, 187(1): 4183.

Dhar A, and Patil RS, 2012. Multiobjective design of groundwater monitoring network under epistemic uncertainty. Water resources management, 26(7): 1809-1825.

Esquivel, J.M., Morales, G.P. and Esteller, M.V., 2015. Groundwater monitoring network design using GIS and multicriteria analysis. *Water resources management*, *29*(9), pp.3175-3194.

Hosseini, M. and Kerachian, R., 2017. A Bayesian maximum entropy-based methodology for optimal spatiotemporal design of groundwater monitoring networks. *Environmental monitoring and assessment*, *189*(9), p.433.

Huang, Z., Wang, H. and Zhang, R., 2012. An improved kriging interpolation technique based on SVM and its recovery experiment in oceanic missing data. *American Journal of Computational Mathematics*, *2*(01), p.56.
Khader, A.I. and McKee, M., 2014. Use of a relevance vector machine for groundwater quality monitoring network design under uncertainty. *Environmental modelling & software*, *57*, pp.115-126.

Konak A, Coit DW, Smith AE, 2006. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. Reliab. Eng. Syst. Saf. 91, 992–1007.

Krivoruchko, K., 2012. Empirical bayesian kriging. *ArcUser Fall*, pp.6-10.

Leach JM, Coulibaly P, Guo Y, 2016. Entropy based groundwater monitoring network design considering spatial distribution of annual recharge. Advances in water resources. 96(1):108-19.

Loaiciga HA, Charbeneau RJ, Everett LG, Fogg GE, Hobbs BF, and Rouhani S, 1992. Review of ground-water quality monitoring network design. Journal of Hydraulic Engineering, 118(1), 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.

Pourshahabi, S., Talebbeydokhti, N., Rakhshandehroo, G. and Nikoo, M.R., 2018. Spatio-Temporal Multi-Criteria Optimization of Reservoir Water Quality Monitoring Network Using Value of Information and Transinformation Entropy. *Water Resources Management*, pp.1-16.