

## یادداشت فنی

### بهینه‌سازی شبکه پایش آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم کلنی مورچگان

محمد نخعی<sup>۱</sup>، وهاب امیری<sup>۲\*</sup> و احسان احدی دولتسرا<sup>۳</sup>

#### چکیده

در این مطالعه برای بهینه‌سازی و کمینه‌کردن نقاط نمونه‌برداری در سفره آب زیرزمینی دشت هشتگرد از الگوریتم بهینه‌سازی کلنی مورچگان استفاده شده است. روش کلنی مورچگان بر مبنای کوتاه‌ترین فاصله بین لانه و منابع غذا ابداع شده است. در دشت هشتگرد با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلنی مورچگان حدود ۳۰٪ از تعداد نقاط اضافی نمونه‌برداری مشخص و حذف شد. در این دشت تعداد نقاط نمونه‌برداری آب برای مطالعات آلودگی ۲۵ عدد می‌باشد که در نهایت بر اساس نتایج این پژوهش تعداد ۷ نقطه نمونه‌برداری مازاد بوده که هزینه اضافی ایجاد می‌کند. نتایج به دست آمده از نقشه‌های ترسیم شده مقدار نیترا با تعداد ۲۵ نمونه و نقشه‌های ترسیم شده بعد از حذف ۷ نقطه دارای تغییرات بسیار ناچیز بوده و مقدار بیشینه RMSE برای حذف ۷ چاه ۰/۳۱۹۸ به دست آمده است که نشان‌دهنده حداقل خطا در سیستم است.

**واژه‌های کلیدی:** بازبینی آب زیرزمینی، بهینه‌یابی، خطای انحراف از معیار، کلنی مورچگان.

**ارجاع:** نخعی م. امیری و. و احدی دولتسرا ا. ۱۳۹۴. بهینه‌سازی شبکه پایش آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم کلنی مورچگان. مجله پژوهش آب ایران. ۱۹: ۱۷۱-۱۷۴.

۱- دانشیار هیدروژئولوژی، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی.

۲- دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی.

۳- کارشناس ارشد هیدروژئولوژی، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی.

\* نویسنده مسئول: [Yahab.Amiri@yahoo.com](mailto:Yahab.Amiri@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۷/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۲۷

## مقدمه

امروزه پایش بلندمدت<sup>۱</sup> سایت‌های آلوده شده یا در حال آلوده شدن آب زیرزمینی به طور گسترده موضوع مهمی در مسائل زیست‌محیطی است. در پایش بلندمدت به ارزیابی سلامت انسان و خطرهای محیطی حاصل از آلاینده‌های باقیمانده در آب‌های زیرزمینی که حاصل فعالیت‌های بشری است، توجه بسیار می‌شود. به طور کلی، ممکن است در پایش بلندمدت، هزینه بسیار بالای تعدد مکان‌های نمونه‌برداری و آنالیزهای آزمایشگاهی در سایت‌های صحرایی مسئله جدی و یک مشکل محسوب شود. بنابراین، در یک شبکه LTM بهینه شده می‌توان به صورت قابل توجهی هزینه‌ها را کاهش دهد. در پژوهشی که یو و همکاران (۲۰۱۱) با بهره‌گیری از تئوری مورچگان در محیط Arc GIS به انجام رساندند، مدل‌سازی و اجرای قانون‌های طبقه‌بندی شده توسط کلنی مورچگان در ارزیابی کاربری بهینه اراضی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج این مطالعه از دارا بودن مزایای زیاد این روش حکایت داشت. در مطالعه‌ای که توسط یوشیکاوا و اوتانی (۲۰۱۰) انجام شد آن‌ها از الگوریتم کلنی مورچگان<sup>۲</sup> برای مسیریابی استفاده کردند. در این مطالعه، الگوریتم بهینه‌سازی کلنی مورچگان با جستجوی تابو ترکیب شد و نتایج نشان داد که این روش می‌تواند نتایج بهتری نسبت به الگوریتم‌های معمول مسیریابی مانند الگوریتم Dijkstra ارائه دهد.

در این مطالعات شبکه پایش آب زیرزمینی با استفاده از این الگوریتم ارزیابی شده و تعداد چاه‌های نمونه‌برداری در سطح دشت بهینه شده است. بهینه‌سازی کلنی مورچگان یک روش بهینه‌سازی برای دسته‌ای از داده‌ها بر مبنای قابلیت حل مسئله کلنی مورچگان است. این روش براساس قابلیت کلنی مورچگان برای شناسایی کوتاه‌ترین مسیر مابین لانه و منابع غذایی ابداع شده است. الگوریتم توسعه‌یافته ACO-LTM اکنون برای سایت‌های صحرایی با شبکه LTM که دارای تعداد زیادی چاه هستند استفاده می‌شود. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که به طور کلی پس از انجام بهینه‌سازی تا حداکثر ۳۰ درصد کاهش در تعداد مکان‌های نمونه‌برداری را می‌توان مشاهده کرد (بونابو و همکاران، ۲۰۰۰ و دوریگو و استودزل، ۲۰۰۴).

## مواد و روش‌ها

## الف- بهینه‌سازی LTM

هدف از بهینه‌سازی مسائل LTM به حداقل رساندن خطای کلی کلی داده‌ها است (معادله (۱)) که با خطای انحراف معیار از خطای تخمینی در چاه‌های انفرادی و اختصاصی جدا شده است. تعداد مشخص چاه‌های پایش در معادله (۲) ارائه شده است (لی و هیلتون، ۲۰۰۷).

$$\min Z = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left( \frac{C_{est,i} - C_i}{\min(C_{est,i}, C_i)} \right)^2} \quad (1)$$

$$m = S_{goal} \quad (2)$$

که در معادله‌های بالا،  $m$  تعداد چاه‌های پایش حذف شده (موقعیت‌های نمونه‌برداری)،  $C_i$  غلظت اندازه‌گیری شده از چاه حذف شده  $(i)$ ،  $C_{est,i}$  غلظت تخمین زده شده از چاه حذف شده  $(i)$  براساس چاه‌های باقیمانده و  $S_{goal}$  تعداد مطلوب چاه‌ها که از قبل مشخص می‌شود.

در این مطالعه از این رابطه‌های بهینه‌سازی LTM (معادلات (۱) و (۲)) برای آبخوان دشت هشتگرد در غرب استان تهران استفاده شد. شبکه LTM موجود در دشت هشتگرد شامل ۲۵ چاه است.

عامل آلوده‌کننده و اندازه‌گیری شده در دشت هشتگرد آلاینده نیترات است که از طریق فاضلاب تولیدی شهرک‌های صنعتی و مسکونی و استفاده بی رویه از کودهای شیمیایی نیتراته در زمین‌های کشاورزی به آب‌های زیرزمینی وارد می‌شود.

در هر صورت، ACO-LTM توانایی کاهش ۳۰-۱۰٪ در تعداد موقعیت‌های نمونه‌برداری را دارد که این امر باعث صرفه‌جویی فراوان در هزینه‌های نمونه‌برداری و تحلیل‌های آزمایشگاهی می‌شود و این زمانی ممکن است که نتایج حاصل از مدل تهیه شده با ACO-LTM که با حذف چاه‌های اضافی شکل گرفته است مشابه حالتی باشد که هنوز هیچ موردی از چاه‌های نمونه‌برداری حذف نشده است.

## نتایج و بحث

**اجرای مدل بهینه‌سازی ACO-LTM دشت هشتگرد**  
براساس روش کار ارائه شده در بخش قبل، در این مطالعه، هر کلنی دارای ۲۵ مورچه است و جستجوی ACO در

1- Long Term Monitoring (LTM)

2- Ant Colony Optimization (ACO)

مقدار RMSE بهینه برای راه‌حل‌های مختلف توسط ACO-LTM برای موارد متفاوت  $S_{goal}$  مشخص شده است که نشان می‌دهد RMSE به صورت غیرخطی با کاهش تعداد چاه‌های باقیمانده افزایش می‌یابد. تمام نتایج موجود بهترین جواب‌های حاصل از ۵۰ اجرای متفاوت (۵۰ دوره گردش) با استفاده از اعداد تصادفی مختلف برای هر مورد حل شده است.

نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم توسعه یافته ACO-LTM در حل مسائل بهینه‌سازی LTM مؤثر و کارآمد بود. این الگوریتم به کمتر از ۱۲۵۰ تابع ارزیابی احتیاج دارد که به شکل قابل توجهی کمتر از ۱۱۱۲۷۷۸۳ تابع ارزیابی در روش‌های عددی برای حل مسئله ۱۸ چاه باقیمانده در این منطقه مطالعاتی است. در این مطالعه برای صحت‌سنجی نتایج از رسم خطوط هم مقدار نیترا در دو چیدمان از چاه‌ها (شبکه ۲۵ چاهی اصلی و شبکه ۱۸ چاهی بهینه شده با روش ACO) استفاده شد. خطوط هم مقدار رسم شده برای غلظت نیترا در ۱۸ چاه باقیمانده با استفاده از مقادیر غلظت نیترا در چاه‌های باقیمانده و مقادیر درون‌یابی شده برای ۷ چاه حذف شده به دست آمده‌اند.

نتایج نشان می‌دهد که خطوط هم مقدار رسم شده برای دو حالت ذکر شده دارای تشابه بالا و قابل قبولی بجز در برخی منطقه‌ها هستند (شکل ۱).

### نتیجه‌گیری

این پژوهش، الگوریتم توسعه‌یافته کلنی مورچگان را بر مبنای الگوی ACO و برای حل مسئله TSP معرفی می‌کند. در این روش هر مورچه با حرکت پیرامون شبکه پایش بلنمدت، به عنوان عامل مشخص‌کننده جهت تعیین موقعیت‌های نمونه‌برداری اضافی عمل می‌کند.

در این پژوهش الگوریتم توسعه یافته ACO-LTM برای آبخوان دشت هشتگرد و با شبکه ۲۵ چاهی استفاده شد. نتیجه نهایی بهینه‌یابی سبب کاهش ۱ تا ۷ چاه از شبکه با حداقل خطا و نمایش حداقل اختلاف بین خطوط هم مقدار غلظت شبکه اصلی و شبکه بهینه شده است، که بر این اساس، سیستم قابلیت کاهش ۴ تا ۲۸ درصدی در موقعیت‌های نمونه‌برداری را دارد. همچنین مقدار حداقل و حداکثر RMSE به ترتیب برابر ۰/۰۶۰۶ برای حذف یک چاه و ۰/۳۱۹۸ برای حذف ۷ چاه از شبکه

شبکه موجود شامل ۵۰ دوره گردش است. مجموعه پارامترهای ACO به واسطه مطالعات انجام شده در این زمینه مشخص شده‌اند (جدول ۱).

جدول ۱- مقادیر پارامترهای استفاده شده در ACO-LTM برای منطقه مورد مطالعه (دشت هشتگرد)

پارامتر	مقدار
تعداد همسایه‌ها در درون‌یابی IDW, n	۸
پارامتر نمایی در IDW, p	۲
پارامتر $\alpha$	۱
پارامتر $\beta$	-۱
مقدار فرمون اولیه	۰/۰۱
حداکثر فرمون Q	۱۰۰
پارامتر برگزیده e	۵
سرعت تبخیر فرمون p	۰/۵

کد الگوریتم مورد نظر در برنامه MATLAB 7.6 نوشته و اجرا شده است (Math works R 2008)، در نهایت مسئله بهینه‌سازی LTM با حالت‌های مختلف و تعداد چاه‌های حذف شده متفاوت ( $S_{goal}$ ) با استفاده از ACO-LTM در محیط برنامه MATLAB 7.6 اجرا شده و شبکه LTM بهینه شده با تعداد متفاوتی از چاه‌های حذف شده مشخص شده است.

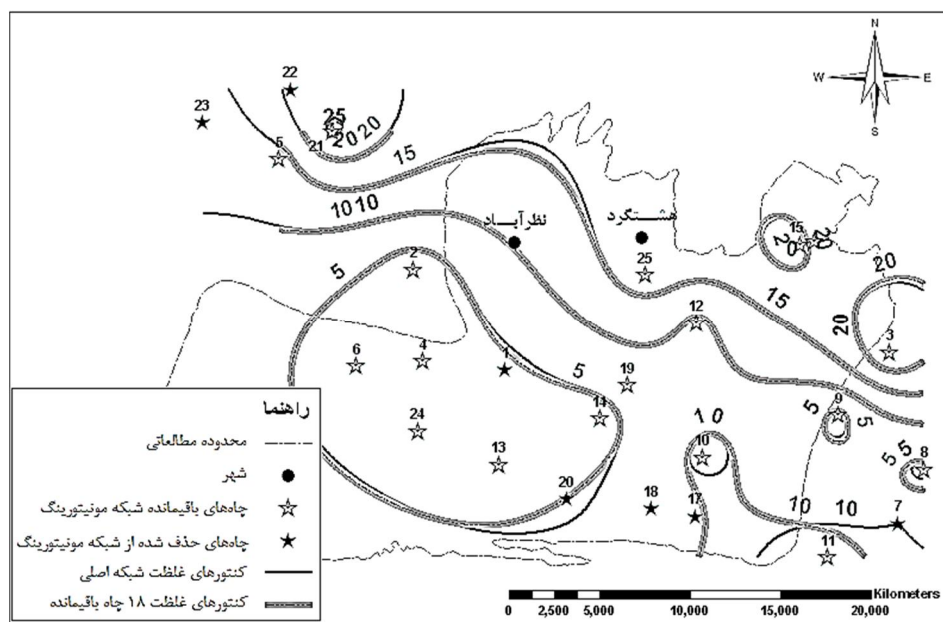
در این مطالعه، راه‌حل‌های بهینه برای منطقه مورد نظر توسط ACO-LTM مشخص شده است که در نهایت با حذف چاه‌های اضافی، تعداد چاه‌های باقیمانده با توجه به میزان خطاهای متفاوت به ۱۸ تا ۲۴ حلقه کاهش یافته است. در جدول ۲ تعداد چاه‌های باقیمانده و شماره چاه‌های حذف شده بر اساس مقدار RMSE مشخص شده است.

جدول ۲- نتایج حاصل از بهینه‌یابی ACO-LTM

تعداد چاه‌های باقیمانده	شماره حذف شده چاه‌های	RMSE حاصل از ACO-LTM
۲۴	۱۸	۰/۰۶۰۶
۲۳	۲۲، ۲۴	۰/۱۳۳۵
۲۲	۱۷، ۱۸، ۲۰	۰/۱۱۸۸
۲۱	۱۱، ۱۷، ۱۸، ۲۰	۰/۱۹۵۴
۲۰	۷، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۲	۰/۲۳۲۸
۱۹	۵، ۶، ۸، ۱۰، ۱۷، ۱۸	۰/۲۹۲۲
۱۸	۱، ۷، ۱۷، ۱۸، ۲۰، ۲۲، ۲۳	۰/۳۲

تحلیل‌های آزمایشگاهی بدون کاهش دقت در نتایج تحلیل‌های کمی و کیفی مبتنی بر نتایج حاصل از این شبکه می‌شود.

بهینه شده به دست آمد که نشان دهنده حداقل خطا در سیستم است. کاهش تعداد موقعیت‌های نمونه‌برداری باعث صرفه‌جویی زیاد در هزینه‌های نمونه‌برداری و



شکل ۱- مقایسه غلظت نیترات در دو حالت اولیه و بهینه شده با ACO-LTM

## منابع

1. Bonabeau E. Dorigo M. and Theraulaz G. 2000. Inspiration for optimization from social insect behavior. *Nature*. 406:39-42.
2. Dorigo M. and Stutzle T. 2004. *Ant Colony Optimization*. MIT Press, Cambridge, MA. 319 p.
3. Li Y. and Hilton A. B. C. 2007. Optimal groundwater monitoring design using an ant colony optimization paradigm. *Environmental Modeling & Software*. 22:110-116.
4. Math Works 2008. The Math Works Inc., Natick, MA.
5. Yu J. Chen Y. and Wu J. 2011. Modeling and implementation of classification rule discovery by ant colony Optimization for spatial land-use suitability assessment. *Journal of Computers, Environment and Urban Systems*. 35(4):308-319.
6. Yoshikawa M. and Otani K. 2010. Ant colony optimization routing algorithm with Tabu search. *Proceeding of the international multi conference of engineering and computer scientists*, vol III, IMECS 2010, March 17-19, 2010, Hong Kong.

