2023, Vol.10, No.3, Pages 121 to 130
Journal of Water and Sustainable Development

سال دهم، شماره ۳، ۱۴۰۲، صفحات ۱۲۱ تا ۱۳۰
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type: Applied Article

نوع مقاله: پژوهش کاربردی

Preparation of an Optimized Model of Water Transmission Lines Route Using Meta-Heuristic Algorithm

A. Taheri[1], A. Khashei Siuki[2*], M. Pourreza Bilandi[3], S.R. Hashemi[3]

1, 2, 3 – MSc in Water Resources Engineering, Professor and Associate Professor, Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.

*(Corresponding Author Email: abbaskhashei@birjand.ac.ir)

Received: 21-05-2023 Revised: 19-07-2023
Accepted: 22-08-2023 Available Online: 21-12-2023

تهیه مدل بهینه‌یاب مسیر خطوط انتقال آب با استفاده از الگوریتم فرا اکتشافی

آرزو طاهری[۱]، عباس خاشعی سیوکی[۲*]، محسن پوررضا بیلندی[۳]، سید رضا هاشمی[۳]

۱، ۲ و ۳ به‌ترتیب دانش‌آموخته کارشناس‌ارشد مهندسی منابع آب، استاد و دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: abbaskhashei@birjand.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۳۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۳۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۹/۳۰

Abstract

Nowadays, due to the expansion of cities as well as the increase in the urban population, the lack of drinking water of good quality is always one of the most important issues for the country's water and sewage authorities, especially the people. Delivering water for consumption is one of the important activities of water transmission lines. In this context, optimizing the route of transmission lines is important. In this research, the plan to transfer water from the balance tank near Khoshab's agricultural and industrial lands and Roza Dam in Madhim City to the cities of Tabas Messina, Asadiyeh, and Gazik, has been obtained as the optimal route in terms of technical and engineering, economic and passive defense, and environment. In this regard, the required information maps, such as topography, land use, rivers and roads, infrastructure, faults, geology, and population centers, were prepared in the form of raster maps in the GIS environment to obtain a cost map. Then, based on the Analytical Hierarchy Process (AHP), these maps were weighted and integrated, and the cost map was obtained. Finally, from the cost map, five routes were determined as the best routes, and to optimize hydraulically, these routes were entered into the EPANET software. The hydraulic design of the routes was done in this software by linking it with the multi-objective particle swarm algorithm. Two technical and economic objective functions of Pareto curves for these routes were obtained in a MATLAB environment. By analyzing these curves, route 2 out of these 5 routes has a more appropriate drop and cost and has been obtained as the optimal route for this water transfer, and this route has a length of 112 km.

Keywords: Water Transmission Lines, Optimal Routing, GIS, EPANET, Multipurpose Particle Swarm Algorithm.

چکیده

امروزه به دلیل گسترش شهرها و همچنین افزایش جمعیت شهری، کمبود آب شرب با کیفیت مناسب همواره از مسائل مهم مسئولین آب و فاضلاب کشور و به‌خصوص مردم است. رساندن آب برای مصرف ازجمله فعالیت‌های مهم خطوط انتقال آب است که در این زمینه بهینه‌سازی مسیر خطوط انتقال اهمیت دارد. در این تحقیق برای طرح انتقال آب از مخزن تعادلی نزدیک اراضی کشت و صنعت خوشاب و سد رزه در شهرستان درمیان به شهرهای طبس مسینا، اسدیه و گزیک مسیری به‌عنوان مسیر بهینه از لحاظ فنی و مهندسی، اقتصادی و پدافند غیرعامل و محیط‌زیستی به‌دست آمده است. در این راستا، نقشه‌های اطلاعاتی مورد نیاز از جمله وضعیت توپوگرافی، کاربری اراضی، رودخانه و جاده، زیرساخت‌ها، گسل، زمین شناسی و مراکز جمعیتی را به شکل نقشه‌های رستری در محیط GIS برای به‌دست آوردن نقشه هزینه آماده شدند. سپس براساس فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) این نقشه‌ها وزن‌دهی و ادغام شدند و نقشه هزینه به‌دست آمد. در آخر از روی نقشه هزینه ۵ مسیر به‌عنوان بهترین مسیرها تعیین شدند و برای بهینه کردن از لحاظ هیدرولیکی این مسیرها وارد نرم‌افزار EPANET شدند و طراحی هیدرولیکی مسیرها در این نرم‌افزار انجام شد و با لینک کردن این نرم‌افزار با الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه با دو تابع هدف فنی و اقتصادی منحنی‌های پارتو برای این مسیرها در محیط متلب به‌دست آمدند. با تحلیل این منحنی‌ها مسیر ۲ از بین این ۵ مسیر افت و هزینه مناسب‌تری دارد و به‌عنوان مسیر بهینه برای این انتقال آب به دست آمده است و این مسیر ۱۱۲ کیلومتر طول دارد.

واژه‌های کلیدی: خطوط انتقال آب، مسیریابی بهینه، GIS، EPANET، الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه.

How to cite this article: Taheri, A., Khashei Siuki, A., Pourreza Bilandi, M., & Hashemi, S.R. (2023). Preparation of an Optimized Model of Water Transmission Lines Route Using Meta-Heuristic Algorithm. Journal of Water and Sustainable Development, 10(3): 121-130. doi: http://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v10i3.2305-1245

مقدمه

وجود منابع آب محدود کمبود بارش و توزیع بیشتر این منابع در بخش‌های شمالی و غربی کشور سبب بروز مشکلات کم آبی در بخش‌های مرکزی و شرقی کشور شده است. در سالیان اخیر این مشکل به‌خصوص با افزایش جمعیت و کاهش منابع آب در دسترس در کشور تشدید پیدا کرده است (لکزایی، ۱۳۹۴). در نتیجه برای مواجه با این بحران کم آبی در سالیان اخیر طرح‌هایی جهت انتقال آب بین حوضه‌ای پیشنهاد شده است. طرح انتقال آب بین حوضه‌ای همواره با واکنش‌های اجتماعی و اقتصادی فراوانی همراه بوده است (بخشی زاده، ۱۳۹۱). انتقال آب به‌صورت صحیح چه از نظر تکنیکی و چه از نظر اقتصادی اهمیت فراوان دارد. در سیستم‌های انتقال، آب از منابع مطمئن و دارای کیفیت مناسب مانند رودخانه‌ها، مخازن سدها، قنات‌ها و غیره به محل مصرف حمل شده و با استفاده از شبکه‌های توزیع بین مصرف کنندگان تقسیم می‌شود. باتوجه‌به هزینه‌های بسیار بالا در احداث این خطوط انتقال و تأسیسات وابسته به آن حفاظت از این تأسیسات اهمیت بسیار بالایی دارد (عطاری و همکاران، ۱۳۹۹). بنابراین، ضروری است قبل از اجرای عملیات لوله‌گذاری خطوط انتقال آب در تعیین مسیر بهینه که تمام ملاحظات فنی، اقتصادی و محیط‌زیستی در آن لحاظ شده باشد دقت ویژه‌ای لحاظ کرد. در نتیجه نخستین گام جهت حفاظت از این تأسیسات مسیریابی بهینه خطوط انتقال آب است (نگاهداری و همکاران، ۱۳۹۱). تعیین مسیر بهینه خط لوله با در نظر گرفتن ملاحظات مهندسی پدافندغیرعامل و محیط‌زیستی باعث کاهش آسیب‌پذیری و تداوم فعالیت‌ها در شرایط بحران خواهدشد. مکان‌یابی (مسیریابی) انتخاب بهترین و مطلوب‌ترین نقطه و محل استقرار است به‌طوری‌که پنهان و مخفی نمودن نیروی انسانی، وسایل و تجهیزات و فعالیت‌ها را به بهترین وجه امکان‌پذیر سازد (نباتی، ۱۳۸۹). مسیریابی بهینه خط لوله بر پایه روش‌های سنتی نسبتاً پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد. به‌علاوه این روش‌ها دقیق نبوده و نمی‌توان در آن‌ها دخالت همه عوامل مؤثر را به راحتی و به طورتوأم اعمال نمود. بنابراین، در اغلب مسیرهای طراحی شده تمام ملاحظات فنی مهندسی، اقتصادی و ... لحاظ نشده و به‌کارگیری تکنیک‌های نوین برای رسیدن به این هدف ضروری به نظر می‌رسد (ابراهیمی پور، ۱۳۸۴). طراحی خطوط انتقال آب مستلزم انجام مطالعات وسیعی می‌باشند. سازه‌های مهندسی خطی از قبیل جاده، خطوط انتقال گاز، نفت، آب، نیرو، راه‌آهن و... فضای بیشتری را نسبت به سایر زیرساخت‌ها پوشش می‌دهند. عملیات انتخاب مسیربهینه، بستگی به جمع‌آوری، پردازش و تحلیل داده‌های مکانی از قبیل توپوگرافی، زمین‌شناسی، جنس خاک، کاربری زمین و ... دارد. این موقعیت موجب استفاده از GIS[1] برای مدیریت اطلاعات شده است. همچنین، می‌توان عوامل مختلف فنی و مهندسی، اقتصادی و محیط‌زیستی مؤثر در طراحی مسیر را مدل‌سازی کرد و با استفاده از الگوریتم‌های مختلف مسیر بهینه را تعیین کرد. الگوریتم تجمع ذرات چندهدفه (MOPSO)[2] به مسائل بهینه‌سازی بیشتر اعمال می‌شود که برگرفته از روش نگهداری تجمع حل نمودار پارتو است و بر مبنای حداقل و حداکثرسازی تابع چگالی عمل می‌کند. این الگوریتم هم‌گرایی خوبی برای جواب مسأله فراهم نموده و گوناگونی جواب‌ها را به خوبی تخمین می‌زند (zhang و همکاران، ۲۰۱۰).

تاکنون تحقیقات محدودی در رابطه با بهینه‌سازی خطوط انتقال آب انجام شده است. از این مطالعات می‌توان اشاره کرد به:

نقیبی (۱۳۸۲) در تحقیقی در دانشگاه تهران تحت عنوان مسیریابی بهینه خطوط لوله نفت و گاز به کمک سیستم‌های اطلاعات مکانی (GIS) در زمینه بررسی امکان استفاده از قابلیت‌های سیستم‌های اطلاعات مکانی شبکه‌ای در پیدا کردن بهترین مسیر انجام داد به این نتیجه رسید امکان استفاده از سیستم‌های اطلاعات مکانی شبکه‌ای و مدل‌سازی کارتو گرافیکی در مطالعات فاز صفر خط لوله و تعیین مسیرهای اولیه وجود دارد. مقایسه بخشی از مسیر خط لوله انتقال گاز اهواز-مارون با مسیر بهینه تعیین شده توسط GIS نشان داد مسیر تعیین شده نسبت به مسیر احداث شده با در نظر گرفتن ملاحظات فنی و مهندسی و محیط‌زیستی حدود ۲۹ درصد هزینه کمتر دارد.

شوبیری و همکاران (۱۳۹۴) به مسیریابی بهینه خطوط انتقال آب با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی و ابزار پرداختند. مسیر پیشنهادی در تحقیق حاضر ارزش مهندسی بالاتر و طول خط لوله کوتاه‌تر نسبت به مسیر مورد استفاده برای خط لوله در منطقه مورد مطالعه دارد.

ابراهیمی‌پور (۱۳۸۴) پژوهشی با عنوان مسیریابی خطوط انتقال آب با استفاده از GIS انجام داد. در این تحقیق پانزده پارامتر تأثیرگذار شناسایی و برای تولید نقشه هزینه ارزش‌گذاری شد. سپس با استفاده از الگوریتم کمترین هزینه در محیط GIS، مسیر تعیین شد و به این نتیجه رسید که هزینه مسیر تعیین شده نسبت به مسیر احداث شده با در نظر گرفتن ملاحظات محیط‌زیستی، ۲۹ درصد کمتر است.

بهشتی‌فر و همکاران (۱۳۹۰) با رویکرد بهینه‌سازی چند هدفه و با استفاده از دو تابع هدف اقتصادی و کاهش تأثیرات منفی محیط‌زیستی به مسیریابی خط انتقال نیرو اقدام کردند. در این پژوهش، مسیرهای مختلف به‌دست آمده از لحاظ طول و میزان ارزش توابع هدف بایکدیگر مقایسه شده و به این نتیجه دست یافته‌اند که سیستم اطلاعات مکانی می‌تواند به گونه

مناسبی با الگوریتم NSGA-II[۳] تلفیق شده و برای بهینه‌سازی مسیر مورد استفاده قرار گیرد.

عطاری و همکاران (۱۳۹۹) به مکان‌یابی خطوط بزرگ انتقال آب با استفاده از نرم‌افزار Arc-GIS پرداختند و دریافتند که مکان‌یابی تأسیسات از دیدگاه پدافند غیر عامل اهمیت بالایی دارد. اما، این موضوع در مورد خطوط انتقال بزرگ آبرسانی بین حوضه‌ای به دلیل هزینه بسیار بالای احداث و وجود تنش‌های بالا در منطقه طرح اهمیت بیشتری دارد.

موسوی و همکاران (۱۳۹۳) خطوط انتقال نیرو را با استفاده از الگوریتم ژنتیک مسیریابی کردند. ازجمله روش‌های بهینه‌سازی می‌توان به این الگوریتم اشاره کرد که الهامی از علم ژنتیک و نظریه تکاملی داروین بوده و براساس بقای برترین‌ها یا انتخاب طبیعی استوار است. در این مقاله تابع چند هدفه‌ای برای مسیریابی بهینه خطوط انتقال نیرو با به‌کارگیری این نوع الگوریتم در نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی می‌شود. برای بررسی صحت این برنامه خط انتقال ۱۳۲ کیلو ولت در ۲ مدار پست قائن- گناباد به‌عنوان مسیر مورد آزمایش انتخاب شده است و باتوجه‌به محدودیت‌هایی که برای ساده‌سازی تابع هدف صورت گرفته، مسیر پیشنهادی برنامه با خطای نسبتاً کمی نسبت به مسیر موجود به‌دست می‌آید (موسوی و همکاران، ۱۳۹۳).

نوبخت و اخلاقی (۱۳۹۳) به مسیریابی بهینه خطوط انتقال و فوق توزیع با استفاده از روش PSO پرداختند. استفاده از روش ترکیبی بازدیدهای میدانی و مجازی، نقشه‌های هوایی موجود در Google Erath و الگوریتم‌های تکاملی، امکان بهینه‌سازی مسیریابی خطوط را فراهم می‌کند.

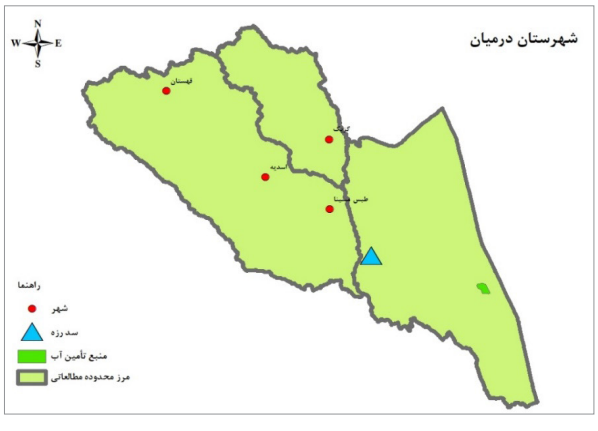
Luettinger و Clark (۲۰۰۵) برای تعیین مسیر خطوط لوله آب به شهرهای سالت لیک و سندی از GIS استفاده کردند. مسیر انتقال به طول ۹ کیلومتر و قطر ۶۰ اینچ بود که برای وزن‌دهی به فاکتورهای موثر در انتخاب مسیر از طول معادل استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده از تحقیقات نشان داد، تاکنون تحقیقات محدودی در مورد بهینه‌سازی خطوط انتقال آب انجام شده است. در بیشتر تحقیقات، تابع هدف، رسیدن به شرایط مناسب هیدرولیکی می‌باشد و در تحقیقات محدودی، تابع هدف کمترین هزینه اقتصادی می‌باشد و در این زمینه پژوهشی با در نظر گرفتن مسائل پدافند غیر عامل انجام نشده است.

در این مطالعه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم فرابتکاری ازدحام ذرات چندهدفه در محیط برنامه‌نویسی توسعه داده شد که تمامی این عوامل در نظر گرفته شده است. مدل توسعه داده شده با در نظر گرفتن مسائل محیط‌زیستی، پدافندغیرعامل، فنی و مهندسی و اقتصادی با توابع هدف کمینه کردن هزینه‌های خط انتقال مجموع افت در خط انتقال برای تعیین مسیر بهینه خط انتقال ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه طرح انتقال آب از مخزن تعادلی نزدیک اراضی کشت و صنعت خوشاب و سد رزه در شهرستان درمیان به شهرهای طبس مسینا، اسدیه و گزیک می‌باشد. شهرستان درمیان در استان خراسان جنوبی می‌باشد. شهرستان درمیان ۵۸۶۱ کیلومتر مربع مساحت دارد و در موقعیت ۳۲ درجه و ۵۴ دقیقه و ۴۹ ثانیه عرض شمالی و ۶۰ درجه و ۱ دقیقه و ۴۵ ثانیه طول شرقی قرار دارد. محدوده مطالعاتی با مساحت تقریبی ۲۷۹۱ کیلومتر مربع در منتهی الیه جنوب شرقی حوضه آبریز نمکزار خواف-دق پترگان قرار دارد. شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

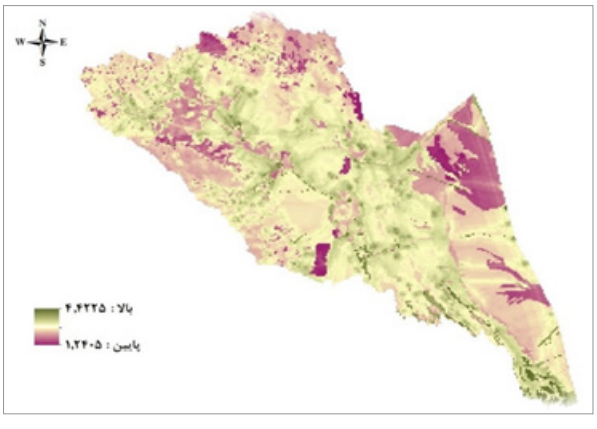
۲- روش تحقیق

طراحی خطوط انتقال آب مستلزم انجام مطالعات وسیعی می‌باشند. سازه‌های مهندسی خطی از قبیل جاده، خطوط انتقال گاز، نفت، آب، نیرو، راه آهن و... فضای بیشتری را نسبت به سایر زیرساخت‌ها پوشش می‌دهند. عملیات انتخاب مسیر بهینه، بستگی به جمع‌آوری، پردازش و تحلیل داده‌های مکانی از قبیل توپوگرافی، زمین‌شناسی، جنس خاک، کاربری زمین و ... دارد. این موقعیت موجب استفاده از GIS برای مدیریت اطلاعات شده است. در طول سالیان اخیر جهت کاهش میزان خطا استفاده از روش‌های مبتنی بر Arc GIS مورد توجه محققین قرار گرفته است. مزیت این روش‌ها ارائه نقشه‌ها پهنه‌بندی و کاهش اثر نظرات کارشناسان در نتایج خروجی می‌باشد (ابراهیمی پور، ۱۳۸۴). همچنین، می‌توان عوامل مختلف فنی و مهندسی، اقتصادی و محیط‌زیستی مؤثر در طراحی مسیر را مدل‌سازی کرد و با استفاده از الگوریتم‌های مختلف مسیر بهینه را تعیین نمود. تاکنون الگوریتم‌های مختلفی برای مسیریابی بهینه

باتوجه‌به پارامترهای مؤثر و خصوصیات مختلف آنها ارائه شده است. الگوریتم تجمع ذرات چند هدفه به مسائل بهینه‌سازی بیشتر اعمال می‌شود که برگرفته از روش نگهداری تجمع حل نمودار پارتو[۴] است و بر مبنای حداقل و حداکثرسازی تابع چگالی عمل می‌کند. این الگوریتم هم‌گرایی خوبی برای جواب مسأله فراهم می‌کند و گوناگونی جواب‌ها را به خوبی تخمین می‌زند (zhang و همکاران، ۲۰۱۰). اساس کار الگوریتم تجمع ذرات بر این اصل استوار است که در هر لحظه هر ذره مکان خود را در فضای جستجو باتوجه‌به بهترین مکانی که تاکنون در آن قرار گرفته است و بهترین مکانی که در کل همسایگی اش وجود دارد تنظیم می‌کند.امروزه مسائل زیادی در زمینه‌های مختلف علوم ریاضیات و مهندسی به‌صورت مسائل چند هدفه مطرح می‌شوند. در این مسائل چندین تابع هدف و قیدهای احتمالاتی وجود دارند که مستقل از یکدیگر هستند و باید بهینه شوند. استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مرسوم و تک هدفه برای حل مسائل چندهدفه با تقریب‌های بسیاری همراه است که منجر به بروز خطا در جواب‌های بهینه نهایی خواهد شد. بنابراین، بهتر است بهینه‌سازی این دسته از مسائل با یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نظیر ازدحام ذرات صورت گیرد (فتحی ساسانسرا و فلاح چولابی، ۱۳۹۵). به این ترتیب در این تحقیق ابتدا تمام عوامل تأثیرگذار بر مسیریابی شناسی شده که شامل عوامل فنی، اقتصادی، محیط‌زیستی و پدافند غیرعامل می‌باشد. سپس وزن هر کدام از لایه‌های مؤثر بر دو عامل محیط‌زیستی و پدافند غیرعامل با AHP[۵] محاسبه می‌شود و باتوجه‌به وزن به‌دست آمده نقشه رستری هر کدام از این دو عامل به‌دست می‌آید و با تلفیق این دو نقشه، نقشه هزینه به‌دست می‌آیدو از روی نقشه هزینه بهترین مسیرها برای خط انتقال تعیین می‌شوند. و طراحی هیدرولیکی مسیرها در نرم‌افزار EPANET انجام می‌شود. در آخر با استفاده از الگوریتم ازدحام چند هدفه با دو هدف فنی و اقتصادی مسیر بهینه از بین این مسیرها برای خط انتقال آب شهرستان درمیان تعیین می‌شود.

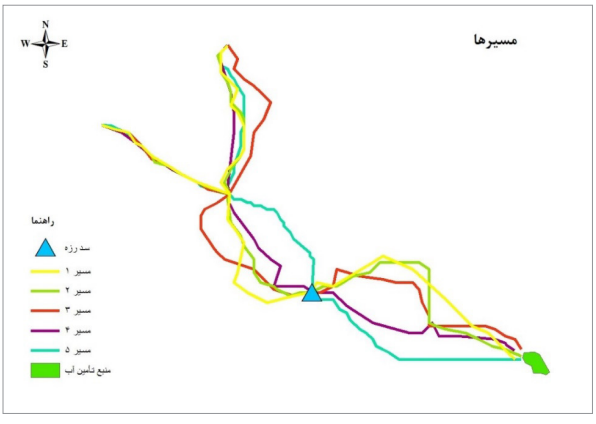
۳- مسیریابی خط انتقال با دو عامل محیط‌زیست و پدافند غیرعامل در محیط GIS

نقشه‌های مورد نیاز عامل پدافند غیرعامل شامل شهرها، روستاها، خطوط راه و جاده، توپوگرافی، کاربر اراضی، رودخانه‌ها، گسل، زمین‌شناسی، زیرساخت‌ها و کوه و دشت می‌باشد. عامل محیط‌زیستی هم شامل یک نقشه محیط‌زیستی می‌باشد. نقشه‌های عامل پدافند غیرعامل باتوجه‌به اهمیتی که نسبت به این عامل دارند ارزش‌گذاری شده و به نقشه‌های رستری تبدیل شده و پس از وزن‌دهی این نقشه‌ها با روش AHP هر کدام از این نقشه‌های رستری باتوجه‌به وزن آن‌ها در محیط GIS با هم ادغام شدند و خروجی آن نقشه تأثیرات پدافند غیرعامل بر مسیریابی می‌باشد. نقشه محیط‌زیستی نیز باتوجه‌به اهمیت آن از دید محیط‌زیستی ارزش‌گذاری شد و به نقشه رستری تبدیل شد. در نهایت با ادغام نقشه تأثیرات پدافند غیرعامل و نقشه محیط‌زیستی نقشه تأثیرات محیط‌زیستی و پدافند غیرعامل یا نقشه هزینه به‌دست می‌آید که در این نقشه هر پیکسل ارزشی عددی برای مسیریابی از لحاظ پدافند غیرعامل و محیط‌زیستی دارد و هرچه ارزش پیکسل بیشتر باشد مکان مناسب‌تری برای مسیریابی می‌باشد. شکل (۲) نقشه هزینه تأثیرات پدافند غیرعامل و محیط‌زیستی می‌باشد.



شکل ۲- نقشه هزینه عامل پدافندغیرعامل و محیط‌زیستی

بعد از تعیین نقشه ادغام شده عامل محیط‌زیستی و پدافند غیرعامل یا در واقع همان نقشه هزینه شروع به مسیریابی خط انتقال می‌شود. در نقشه هزینه که به‌صورت شبکه‌ای می‌باشد هر سلول ارزشی دارد. هر چه ارزش سلول بیشتر باشد اهمیت آن سلول بیشتر و برای مسیریابی از لحاظ پدافند غیرعامل و محیط‌زیستی بهتر هستند. بنابراین، از نقطه شروع به سمت هر کدام از سلول‌های اطراف که ارزش بیشتری دارد حرکت کرده و از آن سلول نیز به سمت سلولی در اطراف آن که بیش‌ترین ارزش را دارد و تا انتهای مسیر همین روند ادامه دارد و اولین مسیر خط انتقال مشخص می‌شود. برای تعیین مسیر ۲ دوباره از نقطه ابتدا حرکت شروع می‌شود و پیکسلی در اطراف این نقطه که بیشترین ارزش مکانی را دارد، به جزء نقطه‌ای که در مسیر یک انتخاب شده است، برگزیده می‌شود و از آنجا پیکسلی در اطراف که بیشترین ارزش را دارد انتخاب می‌شود، به‌این‌ترتیب تا نقطه انتهایی این روند ادامه دارد و مسیر ۲ مشخص می‌شود. در اطراف نقطه شروع چون ۵ نقطه بیشترین ارزش مکانی را دارد، پس ۵ مسیر می‌تواند انتخاب شود. بقیه مسیرها هم به‌این‌ترتیب به‌دست می‌آیند. و به این صورت ۵ مسیر به‌عنوان مناسب‌ترین مسیرها تعیین می‌شوند. این مسیرها در شکل (۲) آمده است.

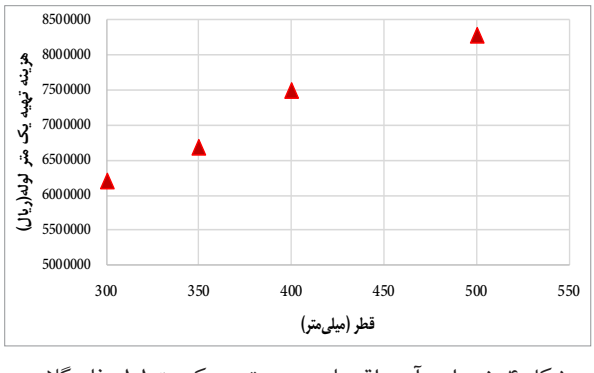


شکل ۳- تصویر تمام مسیرها

۴- تعیین مسیر بهینه با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه

-عوامل اقتصادی:

تابع هدف اقتصادی: باتوجه‌به اینکه یکی از مهمترین عوامل در مسیریابی مسیر با هزینه کمتر می‌باشد، رابطه (۶) ایجاد شده است. این تابع هزینه تهیه هر متر لوله فایبرگلاس برای قطرهای مختلف بر اساس نرخ سال ۱۳۹۹ می‌باشد. برای تهیه هر یک متر لوله فایبرگلاس و قطر مشخص یک مقدار هزینه مشخص باید پرداخته شود که این مقادیر برای قطرهای مختلف متفاوت می‌باشد. این مقادیر در نرم‌افزار Excel برازش داده شده است و نمودار آن در شکل (۴) آمده است. رابطه مربوط به قطر و هزینه لوله‌ها نیز در این نرم‌افزار به‌دست آمده است و این رابطه به‌عنوان تابع هدف اقتصادی در خط انتقال در نظر گرفته شده است.



شکل ۴- نمودار برآورد اقتصاد هزینه تهیه یک متر لوله فایبرگلاس

این تابع در رابطه (۶) آمده است. این تابع هزینه لوله‌ها می‌باشد. مطلوب ما کمینه کردن هزینه می‌باشد. در این تابع Diameter، قطر لوله می‌باشد. Function (F_1=Pipes cost) :minimize

Diameter*269779+3000 (۶)

- عوامل فنی و مهندسی:

رعایت این عوامل باعث افزایش قابلیت اعتماد به خط و امکان پذیر بودن اجرای آن می‌شود. در طراحی این عوامل مشخصات فنی خط مانند قطر لوله خط انتقال، طول خط، فشار و افت در لوله می‌باشد. برای مدل‌سازی این عامل از روی نقشه هزینه (که از تلفیق نقشه‌ها به‌دست می‌آید)، چند مسیر به‌عنوان بهترین و ایمن‌ترین مسیرها انتخاب می‌شوند و این مسیرها وارد نرم‌افزار طراحی شبکه EPANET می‌شوند و کار طراحی مسیرهای آبرسانی در این برنامه انجام داده می‌شود. در جداول (۱) و (۲) اطلاعات هیدرولیکی و هندسی وارد شده در این نرم‌افزار آمده است.

جدول ۱- داده گره‌ها در خط انتقال

شماره گره	مصرف(لیتر بر ثانیه)	ارتفاع (متر)
مخزن	۲۱۱۶۸	۷۰۰
۱(سد)	۲۷۳۶/۶	۱۲۰۰
۲(شهر۱)	۱۲۵۲/۰۸	۱۳۰۰
۳(شهر۲)	۸۱۸/۶۴	۱۴۰۰
۴(شهر۳)	۱۰۱۱/۷	۱۵۰۰

تابع هدف فنی و مهندسی: از لحاظ فنی و هیدرولیکی مسیرهای تعیین شده باید بهینه شوند و هدف این تابع کمینه کردن میزان افت می‌باشد و افت زمانی کمینه می‌شود که بهترین قطر لوله را داشته باشد. بنابراین ابتدا تابع هدف معرفی می‌شود. این تابع (رابطه ۷) برای بهینه کردن قطر می‌باشد.

Function (F_2) : minimize

$\Sigma_{i=1}^{n}$Headloss$_i$ (۷)

در این رابطه Headloss میزان افت در لوله‌ها است.

قیودمسأله: قید مسأله بهینه‌سازی در رابطه (۸) آمده است. محدوده قطر لوله‌های موجود در بازار می‌باشد.

$d_i \in d$ $\quad i=1, \dots, N$ (۸)

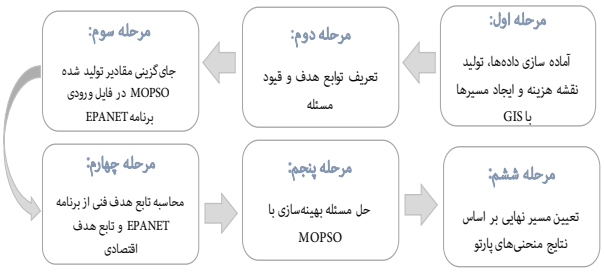
d_i قطر لوله iام و d لیست قطر لوله‌های موجود در بازار می‌باشد.

جدول ۲- اطلاعات هیدرولیکی و هندسی خط انتقال

شماره لوله	طول لوله مسیر(۱) (متر)	طول لوله مسیر(۲) (متر)	طول لوله مسیر(۳) (متر)	طول لوله مسیر(۴) (متر)	طول لوله مسیر(۵) (متر)	ضریب اصطحکاک
۱	۳۸۵۳۲/۸	۴۲۲۷۱/۵	۴۰۱۷۵/۱	۳۴۷۱۵/۵	۳۵۹۳۸/۵	۱۱۰
۲	۲۶۷۴۵/۳	۲۲۷۳۰/۳	۲۷۷۹۳/۶	۲۲۶۲۵/۲	۲۲۶۶۴/۵	۱۱۰
۳	۲۴۳۲۸/۶	۲۳۴۳۲/۷	۲۳۳۱۹/۷	۲۳۱۰۴/۷	۲۳۷۷۰/۲	۱۱۰
۴	۲۶۴۰۸/۶	۲۳۷۵۰/۸	۲۷۴۲۷/۵	۲۲۲۹۲/۵	۲۳۳۱۶/۴	۱۱۰

- تعیین خط انتقال بهینه:

در ابتدا توابع هدف بررسی می‌شود. ورودی تابع هدف اقتصادی قطرها است و میزان هزینه برای تهیه این قطر لوله به‌دست می‌آید و هدف کمینه شدن این هزینه می‌باشد. در تابع هدف فنی و مهندسی، پارامترها (قطر) دریافت می‌شود و این قطرها در فایل ورودی برنامه EPANET قرار می‌گیرد تا افت در لوله‌ها محاسبه شود. چون هدف کم کردن مقادیر افت می‌باشد، مقدار این تابع برابر با مجموع قدرمطلق آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. مقدار مینیمم این تابع به شرطی اتفاق می‌افتد که تمام مقادیر افت، کمینه شوند. و یک کد دیگر برای جایگزینی مقادیر قطر در فایل ورودی برنامه EPANET با کد توابع هدف لینک شده است.در ادامه از کد توابع هدف در الگوریتم چندهدفه ازدحام ذرات استفاده می‌شود.ابتدا برای الگوریتم MOPSOتوابع هدف، تعداد پارامترها وبازه تغییرات متغیرها (قطرها) تعیین می‌شوند. در ادامه حداکثر تعداد تلاش الگوریتم MOPSO و تعداد نقاطی که در هر تکرار تولید می‌کند، اندازه آرشیو و ضرایب تنظیم الگوریتم و در نهایت سرعت تغییرات حول نقطه بهینه‌ای که تاکنون پیدا شده است مشخص می‌شوند. سپس، به‌منظور مقداردهی اولیه به الگوریتم MOPSO داده‌هایی را به‌صورت اتفاقی تولید می‌کندو بهترین آن‌ها (کمترین مقدار توابع هدف) به‌عنوان پاسخ مقداردهی اولیه انتخاب می‌شوند. در ادامه به تعداد حداکثر تکرار مجاز، هر بار نقاط جدید را براساس الگوریتم MOPSO تولید می‌شوند و جواب‌های تولید شده چنانچه بهترین جواب بوده باشند، آن‌ها را ذخیره می‌کند. و در نهایت مقادیر بهینه پارتو رسم می‌شود. بهترین قطرها، قطرهای است که کمترین میزان افت و کمترین میزان هزینه را داشته باشد. بهینه پارتو مجموعه جواب‌های بهینه را ارائه می‌دهد که این جواب‌ها در مجموعه جواب‌های نامغلوب می‌باشند. در هر نسل آرشیو یا همان بایگانی با استفاده از جواب‌های غیر غالب موجود در جمعیت به‌روز می‌شود. اگر اندازه آرشیو از اندازه بیشینه آن تجاوز کند، جواب‌های موجود در آرشیو به‌صورت نزولی و مطابق با کارایی آن‌ها مرتب می‌شوند. جواب‌ها با درجه کارایی پایین از انتهای آرشیو حذف می‌شود. هنگامی‌که تعداد تکرارهای الگوریتم به مقدار بیشینه آن برسد خاتمه می‌یابد و در این صورت جواب‌های غیر غالب نهایی در آرشیو بیرونی موجود می‌باشد. در شکل (۵) مراحل انجام کار آمده است.



شکل ۵- فلوچارت مراحل انجام کار

نتایج و بحث

- نتایج حاصل از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

نتایج حاصل از فرآیند سلسله مراتبی که در جدول (۳) آمده است، نشان می‌دهد که لایه شهر و روستا بیشترین وزن را دارد؛ زیرا از لحاظ پدافند غیرعامل هر چه خط انتقال به شهر یا روستاها نزدیکتر باشد امنیت خط بیشتر و باعث کنترل نگهداری و تعمیرات و رفع سریع خرابی می‌شود. در ادامه لایه راه و جاده ارزش بالایی دارد و صدق کننده این است که هر چه خط انتقال به جاده‌های دسترسی موجود نزدیکتر باشد، علاوه‌بر استفاده از جاده دسترسی موجود، باعث کاهش تغییرات محیط‌زیستی می‌شود و لایه رودخانه‌ها و گسل‌ها کمترین وزن را داردو این بیانگر دوری خط انتقال از این لایه‌ها می‌باشد و باعث کاهش تأثیرات منفی رودخانه و گسل‌ها و کاهش تأثیرات مخرب و خرابی شبکه می‌شود. در نهایت وزن‌های به‌دست آمده برای تمامی لایه‌ها اهمیت لایه‌ها از لحاظ پدافند غیرعامل در مسیریابی خط انتقال است و هر چه وزن لایه بیشتر باشد، اهمیت آن لایه بیشتر و گذر از آن مناطق بهتر و امن‌تر است. هر چه وزن لایه کمتر باشد اهمیت آن لایه کمتر و گذر از آن مناطق آثار مخرب و تأثیرات منفی برای خط انتقال دارد.

وزن هر کدام از این لایه ها در مسیریابی بسیار مؤثر است. بنابراین، مشکلات و خرابی‌هایی که در خط به وجود می‌آید تا حدود زیادی به عوامل مکانی و مسیریابی انجام شده بستگی

دارد و داشتن اطلاعات مکانی مربوط به خط در رفع سریع خرابی‌ها مؤثر است. در صورت دقیق نبودن یا اشتباه محاسبه شدن وزن لایه‌ها باعث بالارفتن هزینه ها و ایجاد مشکلات و خرابی‌های زیادی در خط انتقال می‌گردد. وزن لایه‌ها در نهایت برای ارزیابی تأثیرات زیست محیطی و اجتماعی مسیر می‌باشد و همچنین در عامل پدافند غیرعامل بسیار مهم و ارزشمند می‌باشد. هدف از این کار کمینه کردن تأثیرات زیست محیطی و کنترل نگهداری و تعمیرات و رفع سریع خرابی است.

جدول ۳- ون لایه‌ها در مسیریابی

عنوان لایه	وزن لایه
شهر	۰/۱۶۶
روستا	۰/۱۶۶
کاربری اراضی(جنگل،کشاورزی...)	۰/۱۲۹
DEM	۰/۰۸۳
شیب	۰/۰۸۳
خطوط راه و جاده	۰/۱۲۹
رودخانه	۰/۰۱۸
گسل	۰/۰۱۸
خطوط انتقال نیرو	۰/۰۹۲
زمین شناسی	۰/۰۵۳
کوه و دشت	۰/۰۵۹

- نقشه هزینه:

نقشه هزینه شکل (۲) در واقع یک تصویر با ابعاد منطقه مورد مطالعه می‌باشد. این تصویر حاصل کار تجزیه و تحلیل‌های مختلف بر روی لایه‌های اطلاعاتی شامل توپوگرافی، زمین شناسی، کاربری اراضی و... می‌باشد. تجزیه و تحلیل‌های انجام شده شامل تبدیل مدل وکتوری به رستری، وزن‌دهی هر یک از لایه‌های اطلاعاتی و کلاس‌های مربوط به آن و در نهایت همپوشی و روی‌هم گذاشتن لایه‌های اطلاعاتی می‌باشد. نتیجه این تجزیه تحلیل‌ها تولید یک نقشه رستری یا شبکه‌ای است. در این نقشه هر سلول ارزش عددی دارد و مکان‌های مناسب برای مسیریابی مکان‌های ارزش بالاتر دارد. در این تحقیق مسیرها از مکان‌هایی که اهمیت بالاتری دارند گذر شده است و مسیر مشخص شده است و براین‌اساس ۵ مسیر نهایی (شکل ۳) برای انتقال آب به‌دست آمده است.

- مسیرهای تعیین شده:

همانطور که در شکل (۳) مشخص است این مسیرها از نقشه هزینه به‌دست آمده و هر کدام از سلول‌هایی گذشته است که ارزش عددی بالایی دارد و از لحاظ پدافند غیرعامل امن‌ترین مکان برای عبور خط انتقال و کمترین تأثیرات محیط‌زیستی در منطقه می‌باشد و هر کدام از این مسیرها طول‌های متفاوت دارند.

جدول ۴- طول مسیرها

مسیر	طول مسیر(کیلومتر)
مسیر۱	۱۱۶
مسیر۲	۱۱۲/۲
مسیر۳	۱۱۸/۷
مسیر۴	۱۰۲/۷
مسیر۵	۱۰۵/۷

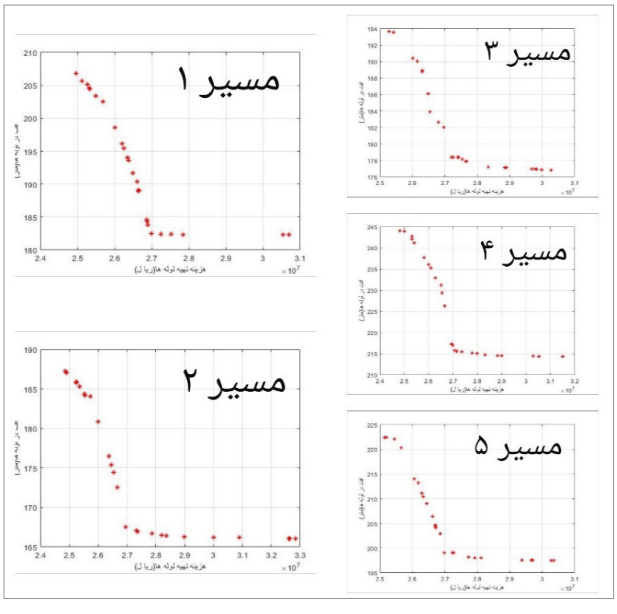
باتوجه‌به مسافت‌های به‌دست آمده برای هر مسیر می‌توان گفت مسیر ۳ بیشترین طول خط انتقال را دارد و مسیر ۴ چون کمترین مسافت را دارد از لحاظ اقتصادی می‌توان این مسیر را به‌عنوان بهترین مسیر برای خط انتقال تعیین کرد. اما به‌دلیل اینکه تنها عامل اقتصادی برای تعیین مسیر مد نظر نیست و عوامل فنی و پدافند غیرعامل نیز برای تعیین مسیر مد نظر است پس هنوز این مسیر نمی‌تواند به‌عنوان بهترین مسیر در نظر گرفته شود.

- خط انتقال بهینه:

ابتدا الگوریتم با مقادیر مختلف تکرارها و اندازه جمعیت اجرا شد و نتایج واسنجی الگوریتم با مقادیر مختلف برای تعداد تکرارها (۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰) و با اندازه جمعیت (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۰، ۲۰) نشان می‌دهد با ۵۰ بار تکرار و جستجو در محیط مسأله و اندازه جمعیت ۲۰ جواب‌های مناسب و قابل قبولی به‌دست می‌آید و با در نظر گرفتن تعداد تکرار و اندازه جمعیت بیشتر جواب‌های یکسانی به‌دست می‌آید. بنابراین در نظر گرفتن نسبت مناسب بین تعداد جمعیت اولیه و تعداد تکرار، افزون بر تولید جواب‌های بهینه با مقادیر توابع هدف کمتر، در کاهش زمان اجرای الگوریتم نیز بسیار تأثیر گذار است.

پس از بهینه‌سازی مسأله با الگوریتم چندهدفه ازدحام ذرات، نمودار پارتو یا مجموعه حل‌های نامغلوب در این مسأله بهینه‌سازی دو هدفه معرفی می‌شود. در شکل (۵) نمودارهای پارتو نهایی برای هر مسیر با ۵۰ بار تکرار و جستجو در فضای هدف، جمعیت اولیه ۲۰ (تعداد جواب‌های تولید شده در هر بار تکرار)، اندازه آرشیو (تعداد جواب‌های نامغلوب) ۲۵، w (وزن اینرسی) برابر با ۰/۵، wdamp برابر با ۰/۹۹، C_1 برابر با ۱ و C_2 برابر با ۲ با اهداف مورد نظر به‌دست آمده است.محور افقی نمودارهای پارتو تابع هدف اقتصادی می‌باشد. این محور هزینه تهیه هر متر لوله را به‌ازای قطرها مختلف به‌دست آمده نشان می‌دهد. محور عمودی تابع هدف فنی می‌باشد که نشان‌دهنده افت در لوله‌ها است. با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای قطرها

(متغیرها)، تعداد تکرارها و اندازه جمعیت الگوریتم چندین بار اجرا شد. نتایج نشان داد هزینه لوله با افزایش قطر لوله‌ها افزایش می‌یابد و دلیل افزایش هم بالا بودن قیمت لوله‌ها در قطرهای بالاتر است. همچنین مشاهده شد میزان افت در لوله با افزایش قطر کاهش می‌یابد.



شکل ۶- نمودارهای پارتو مسیرها

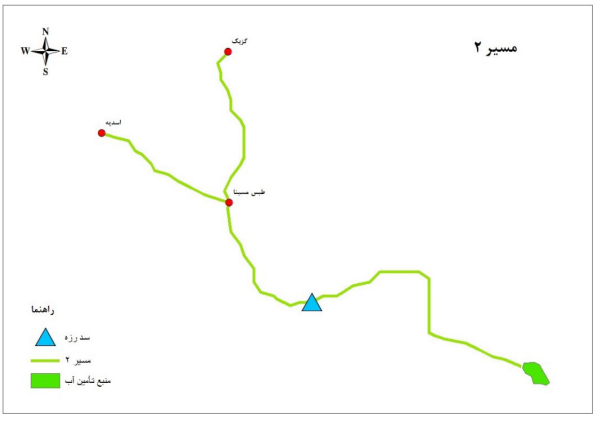
به‌منظور مقایسه مسیرهای پیشنهادی سه نقطه از جبهه پارتو در تمام مسیرها انتخاب شدند. در تمامی این مسیرها تعداد تکرارها، اندازه جمعیت و تعداد متغیرها یکسان در نظر گرفته شده است. در جدول (۴) این سه نقطه برای تابع هدف اقتصادی ارائه شده است. نقطه بهینه برای تابع هدف اقتصادی در این جدول را می‌توان نقطه ابتدایی در نظر گرفت، زیرا این نقطه در تمامی مسیرها کمترین میزان هزینه را دارد. این نقاط هزینه تهیه هر متر لوله را برای هر مسیر نشان می‌دهد با ضرب هزینه تهیه یک متر لوله هر مسیر در طول آن مسیر هزینه نهایی برای هر مسیر به‌دست می‌آید و مشخص شد مسیر ۲ و مسیر ۴ کمترین و مسیر ۵ بیشترین مقدار هزینه را دارد. بهینه‌ترین مسیر برای این تابع هدف مسیر ۲ و ۴ است زیرا کمترین هزینه اقتصادی را دارد. جدول (۵) سه نقطه را برای تابع هدف فنی نشان می‌دهد. نقطه بهینه برای این تابع هدف نقطه انتهایی می‌باشد، هدف در این تابع کمینه کردن میزان افت می‌باشد و این نقطه کمترین مقدار در جبهه پارتو را دارد و مناسب‌ترین مسیر برای تابع هدف فنی مسیر ۲ است؛ زیرا کمترین میزان افت را دارد. مسیر ۴ بیشترین مقدار این تابع را دارد. نمودارهای فشار نیز نشان داده است که بیشینه فشار در مسیر ۲ نسبت به سایر مسیرها پایین‌تر می‌باشد. از این‌رو، مسیر ۲ را به‌عنوان گزینه برتر فنی می‌توان انتخاب کرد. نقطه بهینه تعادلی با در نظر گرفتن هر دو تابع در جداول (۴) و (۵) آمده است. با مقایسه این نقاط می‌توان بهینه‌ترین مسیر را به‌دست آورد. بعد از ضرب این هزینه‌ها در طول خط انتقال هر مسیر مشخص شد. مسیر ۴ از مسیر ۲، ۴۷ میلیارد ریال، از مسیر ۵، ۵۶ میلیارد ریال از مسیر ۱، ۹۳ میلیارد ریال و از مسیر ۳، ۱۱۰ میلیارد ریال هزینه کمتری دارد. افت به‌دست آمده در این الگوریتم برای هر مسیر، کل افت موجود در خط انتقال می‌باشد که مسیر ۲ کمترین مقدار افت دارد و مسیر ۴ بیشترین مقدار را دارد. بنابراین، مسیر ۴ اگرچه کمترین میزان هزینه اما بیشتر مقدار افت را دارد پس نمی‌تواند به‌عنوان مسیر بهینه در نظر گرفته شود. اما مسیر ۲ هزینه بیشتری از مسیر ۴ دارد. اما این مسیر از بقیه مسیرها هزینه کمتری دارد و کمترین میزان افت و بیشینه فشار کمتر را دارد و می‌توان این مسیر را به‌عنوان مسیر بهینه در نظر گرفت. پس مسیر ۲ را می‌توان مسیر بهینه انتخاب کرد. همچنین مسیر ۳ بیشترین هزینه و افت برای انتقال آب دارد. در شکل (۶) مسیر بهینه مدل مورد نظر آمده است.

جدول ۴- مقادیر تابع هدف اقتصادی مسیرها (متر)

	مسیر ۱	مسیر۲	مسیر۳	مسیر ۴	مسیر ۵
نقطه بهینه ابتدا	۲۴۸۲۰۰۰۰	۲۴۸۷۰۰۰۰	۲۴۴۸۰۰۰۰	۲۴۸۳۰۰۰۰	۲۵۱۵۰۰۰۰
نقطه بهینه تعادلی	۲۶۹۵۰۰۰۰	۲۶۸۰۰۰۰۰	۲۶۹۶۰۰۰۰	۲۶۸۰۰۰۰۰	۲۷۰۰۰۰۰۰
نقطه بهینه انتها	۳۱۱۶۰۰۰۰	۳۲۸۴۰۰۰۰	۳۱۳۱۰۰۰۰	۳۱۵۲۰۰۰۰	۳۰۳۵۰۰۰۰

جدول ۵- مقادیر تابع هدف فنی و مهندسی مسیرها (متر)

	مسیر ۱	مسیر۲	مسیر۳	مسیر ۴	مسیر ۵
نقطه بهینه ابتدا	۲۰۶	۱۸۷,۳	۱۹۳,۳	۲۴۴	۲۲۲,۵
نقطه بهینه تعادلی	۱۸۲,۵	۱۶۷,۵	۱۶۹,۵	۲۱۷,۳	۱۹۹,۱
نقطه بهینه انتها	۱۸۲,۳	۱۶۶,۱	۱۷۶,۸	۲۱۴,۳	۱۹۷,۵



شکل ۷- مسیر بهینه خط انتقال

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمدهاز این تحقیق نشان می‌دهد به‌کارگیری تکنیک‌های GIS و الگوریتم چندهدفه ازدحام ذرات باعث بهبود تصمیم‌گیری می‌شود و این کار از طریق در نظر گرفتن تمامی عوامل و پارامترهای مختلف فنی و مهندسی، اقتصادی، محیط‌زیستی و پدافند غیرعامل مؤثر در طراحی مسیر بهینه انجام می‌شود. با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه امکان تعیین مسیر بهینه خطوط فراهم می‌شود.بی توجهی به امر مهم مسیریابی خطوط انتقال آب، می‌تواند علاوه‌بر افزایش هزینه‌ها، زمان بهره‌برداری از خطوط را به میزان زیادی افزایش دهد. تأخیر در بهره‌برداری از خطوط انتقال آب در نهایت قابل تبدیل به هزینه خواهد بود. نتایج به‌دست آمده از اجرای الگوریتم نشان می‌دهد توابع هدف در وسط منحنی پارتو بهینه‌ترین حالت را دارد و در واقع با کاهش تابع قیمت لوله‌ها و میزان افت درون لوله‌ها، قطر لوله بهینه شده است. از بین مسیرهای به‌دست آمده مسیر ۴ کمترین طول و کمترین میزان هزینه در کل خط انتقال را دارد. مسیر ۳ بیشترین طول و بیشترین میزان هزینه درخط انتقال را دارد. مسیر ۲ کمترین میزان تابع هدف فنی را دارد و مسیر ۴ بیشتر میزان تابع هدف فنی (افت در لوله‌ها) را دارد. بنابراین، مسیر۲ به‌عنوان مسیر بهینه تعیین می‌شود. هرچند که طول این مسیر بیشتر است اما کمترین مقادیر توابع هدف را دارد و به‌عنوان مسیر نهایی خط انتقال مشخص شد. با مقایسه مسیر احداث شده و مسیر به‌دست آمده مشخص شد که مسیر تعیین شده ۱۳ درصد کاهش هزینه را به دنبال دارد و طول کوتاه‌تری نیز دارد. همچنین الگوریتم MOPSO همگرایی بالاتری نسبت به سایر الگوریتم‌های فراابتکاری دارد و برای بهینه‌سازی خطوط انتقال و شبکه‌های توزیع آب استفاده می‌شود. یکی از محدودیت‌های این تحقیق قطر لوله‌های موجود در بازار بود که باعث شد فقط بتوان از لوله‌هایی با قطرهای خاص استفاده شود. برای طراحی مسیر می‌توان از لایه‌های مؤثر دیگری، ازجمله مالکیت اراضی و تأثیرات انسانی و محیطی منطقه مورد نظر را استفاده نمود. منظور از این تأثیرات به‌هم خوردن فرهنگ و روابط انسانی و شرایط زندگی پس از احداث خط لوله می‌باشد.

در این پژوهش برای تحلیل‌های هیدرولیکی از برنامه هیدرولیکی EPANET با الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه استفاده شده است. پیشنهاد می‌شود برای تحلیل‌های هیدرولیکی از نرم‌افزار waterGEMS هم استفاده شود.

برای تعیین مسیر می‌توان روش‌های دیگری مانند هوش مصنوعی و الگوریتم ژنتیک و سایر الگوریتم‌های فراابتکاری را بررسی نمود.

پی‌نوشت‌ها

1-Geographic Information System

2-Multi-Objectiveparticle Swarm Optimization

3-Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-Ii

4-Pareto Chart

5-Analytical Hierarchy Process

منابع

ابراهیمی پور، احمدرضا. (۱۳۸۴). مسیریابی خطوط انتقال آب با استفاده از GIS و الگوریتم ژنتیک. پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

بخشی‌زاده، محمود. (۱۳۹۱). مشکلات اقتصادی اجتماعی ناشی از انتقال آب بین حوزه‌ای (مطالعه موردی انتقال آب بهشت آباد به زاینده رود). اولین همایش ملی انتقال آب بین حوضه‌ای (چالش‌ها و فرصت‌ها). دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد، شهرکرد.

بهشتی‌فر، سارا، علیمحمدی سراب، عباس، و منصوریان، علی. (۱۳۹۰). مسیریابی خطوط انتقال نیرو با رویکرد بهینهسازی چند هدفه. نشریه علمی پژوهشی سنجش از دور و GIS ایران، ۱۲(۶)، ۱۹-۳۲.

شوبیری، غلامرضا، رجبی، احمد، و کی‌پور، مصطفی. (۱۳۹۴). مسیریابی بهینه خطوط انتقال آب با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی و ابزار GIS. دومین کنفرانس ملی مدیریت ساخت و پروژه. مرکز همایش‌های اداره راه استان تهران، تهران.

فتحی ساسانسرا، سمانه، و فلاح چولابی، اسماعیل. (۱۳۹۵). طراحی بهینه موتور BLDC با ساختار Slotless با استفاده از

یک روش بهینه‌سازی هوشمند مبتنی بر الگوریتم MOPSO. چهارمین کنفرانس ملی و دومین کنفرانس پژوهش‌های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک، مکاترونیک. دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.

عطاری، محمد، خاشعی سیوکی، عباس، اصغرزاده منظری، سعید، و مجرد، معصومه. (۱۳۹۹). مکان‌یابی خطوط بزرگ انتقال آب با استفاده از نرم‌افزار Arc-GIS. مجله آب و فاضلاب، ۳۱(۱)، ۱۱۱-۱۱۷. doi: 10.22093/WWJ.2018.100955.250

لکزایی، صدیقه. (۱۳۹۴). بررسی چالش‌ها و فرصت‌های امنیتی در مرزهای شرقی. اولین همایش ملی شهرهای مرزی و امنیت، چالش‌ها و رهیافت‌ها. دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان.

موسوی، حنانه، صفرعلی نجار، محمد، وکیلی، محمدجواد، و حسن‌پور، سمیه. (۱۳۹۳). مسیریابی خطوط انتقال نیرو با استفاده از الگوریتم ژنتیک. بیست و یکمین کنفرانس مهندسی برق ایران. دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

نباتی، عزت‌الله. (۱۳۸۹). پدافند غیرعامل. مرکز آموزشی پژوهشی شهید صیاد شیرازی. چاپ اول. تهران، ایران.

نگاهداری، جواد، رنگزن، کاظم، قبادی، محمدحسین، و آصف پور وکیلیان، افشین. (۱۳۹۱). مسیریابی بین استان‌های همدان و مرکزی بر اساس اصول زمین شناسی و زیست‌محیطی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور. نشریه علمی ترویجی مهندسی نقشه برداری و اطلاعات جغرافیایی، ۴(۱)، ۱۵-۲۶.

نقیبی، فریدون. (۱۳۸۲). مسیریابی بهینه خطوط لوله نفت و گاز به کمک سیستم اطلاعات مکانی. پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه نقشه برداری و ژئوماتیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران.

نوبخت، پدیده، و احدی اخلاقی، ایمان. (۱۳۹۳). مسیریابی بهینه خطوط انتقال و فوق توزیع با استفاده از روش PSO. بیست و نهمین کنفرانس بین المللی برق. مرکز همایش‌ها و سمینارهای علوم جهان اسلام، تهران.

Luettinger, J., & Clark, T. (2005). Geographic information system-based pipeline route selection process. Journal of water resources planning and management, 131(3), 193-200. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2005)131:3(193)

Zhang, L, X., Wang, Xu, S., &Zhou, M. 2010. Environmental/Economic Dispatch Based on Multi-objective PSO. International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Changsha, China.