مکان‌یابی دکل‌های مخابراتی برای پوشش‌دهی شبکه موبایل با در نظرگرفتن معیارهای توسعه پایدار و با به کارگیری GIS و تکنیک BWM: مطالعه موردی شهرستان ارومیه

روناک عباسی قاسملوئی

کارشناسی ارشد،گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ایران abbasironak0616@gmail.com

سعید فضایلی*

استادیار،گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ایران s.fazayeli@urmia.ac.ir

رضا بابازاده

دانشیار،گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ایران R.babazadeh@urmia.ac.ir

چکیده

مکان‌یابی بهینه جهت استقرار دکل‌های مخابراتی تلفن همراه با هدف پوشش‌دهی تمام تقاضا با کیفیت سیگنال بالا و هزینه کم، یک چالش مهم برای شرکت‌های مخابراتی است. از این رو اگر تصمیم مناسبی گرفته نشود، ممکن است منجر به آسیب‌های زیست محیطی، مشکلات اقتصادی و عدم رضایت کاربران شود. بنابراین اپراتورهای شبکه‌های مخابراتی باید برنامه‌ریزی برای مکان‌یابی بهینه دکل‌های مخابراتی تلفن همراه در جهت دستیابی به اهداف توسعه پایدار را در دستور کارخود قرار دهند. هدف از این پژوهش نشان دادن چگونگی استفاده از ابزارهای نرم‌افزار ArcGis10.8 و تعیین وزن معیارها با تکنیک بهترین- بدترین جهت مکان‌یابی بهینه دکل‌های مخابراتی تلفن همراه با استفاده از معیارهای توسعه پایدار است. نتایج کلی نشان داد که در محدوده وسیعی از غرب شهرستان امکان به کارگیری دکل‌ها وجود ندارد و بهترین نقاط به سمت مناطق شرقی نزدیک دریاچه ارومیه پیش می‌رود، که این امر می‌تواند به دلیل انتخاب معیارها باشد.

واژه‌های کلیدی : دکل‌های مخابراتی، پوشش شبکه تلفن همراه، توسعه پایدار، سیستم اطلاعات جغرافیایی، تصمیم‌گیری چندمعیاره

*نویسنده مسئول

Locating telecommunications masts for mobile network coverage considering sustainable development indices by using GIS and BWM technique: case study of Urmia County

R. Abbasi Ghasemloei, abbasironak0616@gmail.com
M.Sc. degree, Department of Industrial Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Urmia University, Iran

S.Fazayeli (corresponding author), s.fazayeli@urmia.ac.ir
Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Technical and Engineering Faculty, Urmia University, Iran
R.Babazadeh, R.babazadeh@urmia.ac.ir
Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Technical and Engineering Faculty, Urmia University, Iran

Abstract

Optimum location for the establishment of mobile phone towers with the aim of covering all demand with high signal quality and low cost is an important challenge for telecommunications companies. Therefore, if a proper decision is not taken, it may lead to environmental damage, economic problems and user dissatisfaction. Therefore, operators of telecommunication networks should plan for the optimal location of mobile telephone towers in order to achieve the goals of sustainable social, economic and environmental development. The purpose of this research is to show how to use ArcGis10.8 software tools and the best-worst technique for the optimal location of mobile phone towers using sustainable development criteria. These criteria are: distance from the fault, distance from historical and cultural places, distance from parks, distance from the river, distance from medical centers (hospitals and clinics), distance or proximity from rural areas, proximity to the main road, distance from residential areas, distance from schools and educational centers, height, land slope and slope direction. The innovations used in this research include the use of multi-criteria spatial modeling, including the best-worst technique and its integration with geographic information system techniques for locating mobile phone towers and investigating the optimal location for their deployment. along with the application of new criteria of sustainable development, which was done for the first time in Urmia city. The weights of the criteria were obtained by the best-worst technique and the data required for weighting were collected by interviewing experts who were experts of the telecommunications company. The data related to each quality was entered into the ArcGis10.8 software, and various processing and fuzzy overlay operations are performed to prepare the optimal final map. The general results obtained showed that it is not possible to use the masts in a wide area from the west of the county, and the best points go towards the eastern areas near Lake Urmia, which can be due to the selection of the criteria.

Keywords: telecommunication towers, mobile phone network coverage, sustainable development, geographic information system, multi-criteria decision making.

1. مقدمه

مسئله مکان‌یابی تسهیلات [1] یکی از تصمیمات اساسی و برجسته هر سازمان است که تاثیر زیادی بر تصمیمات تاکتیکی و عملیاتی آن در زمینه‌های صنعت، خدمات، سیاست، تجارت و اقتصاد دارد. این موضوع با هدف بهبود کیفیت خدمات، افزایش دامنه پوشش، کاهش زمان انتظار و هزینه‌ها، بهینه‌سازی حمل‌ونقل و همچنین جلوگیری از مواجهه با تسهیلات خطرناک مطرح می‌شود [1]. مکان‌یابی بهینه دکل‌های مخابراتی یکی از مسائل کلیدی در زمینه مکان‌یابی تسهیلات است که هدف آن ارائه خدمات و پوشش‌دهی به کاربران تلفن همراه در مناطق شهری و روستایی می‌باشد. این فرآیند به افزایش تعداد کاربران کمک کرده و متخصصان را به گسترش فعالیت‌های خود در برنامه‌ریزی شبکه‌های تلفن همراه و تعیین توزیع بهینه مکان برای برج‌ها ترغیب کرده است [2]. افزایش روزافزون نیاز به بخش ارتباطات از راه دور در این دوران، به نوعی توسعه در نوآوری و پیشرفت‌های تکنولوژیکی در صنعت منجر شده است. یکی از اصلی‌ترین ابزارهای ارتباطی در این زمینه، تلفن همراه به شمار می‌رود [3]. سیستم‌های تلفن همراه خدمات مخابراتی را از طریق ایستگاه‌های پایه فرستنده و گیرنده[2] ارائه می‌دهند که ارتباطات رادیویی را با ایستگاه‌های تلفن همراه مدیریت می‌کنند. فرآیند مکان‌یابی دکل‌های مخابراتی شامل برنامه‌ریزی سیستم و انتخاب مکان‌های بهینه برای نصب آنتن‌ها است و همچنین تنظیم پارامترهایی مانند توان انتشار، ارتفاع آنتن، شیب و جهت آن را در بر می‌گیرد. هدف این اقدامات تخصیص فرکانس مناسب برای پوشش‌دهی و تضمین ظرفیت کافی برای هر شبکه سلولی است [4]. اتحادیه بین المللی مخابرات[3] کیفیت خدمات را با توجه به میزان رضایت مندی کاربران از سرویس‌های خدماتی طبق استاندارد جهانی تعیین می‌کند. در مسئله برنامه‌ریزی شبکه‌های مخابراتی، کارشناسان مرتبط برنامه‌ریزی برای تعیین مجموعه مکان‌های بهینه جهت تعیین محل سایت‌های سرویس‌دهی، یک منطقه جغرافیایی را برای پوشش‌دهی کل در نظر می گیرند [5]. همچنین باید دستورالعمل‌هایی در ارتباط با استانداردهای برنامه‌ریزی شده دکل‌های مخابراتی اتخاذ شود. استانداردهای مربوط به حفظ سلامتی افراد در برابر امواج مغناطیسی، ارتفاع قابل قبول برای دکل‌ها در مناطق مختلفی از نقاط منطقه مورد مطالعه، موقعیت مناسب آنتن‌ها، نزدیکی دکل‌ها به خطوط برق، نزدیکی به مراکز آموزشی و بهداشتی و سایر امکانات در سراسر منطقه فراهم شود [6]. برقراری و نگهداری از شبکه‌های مخابراتی کارآسانی نیست. به ویژه در انتخاب مکان مناسب برای دکل‌های مخابراتی که باید پوشش‌دهی با کیفیت و هزینه کم را فراهم کند. تصمیمات نادرست می‌تواند به آسیب‌های زیست‌محیطی، مسائل بهداشتی، مشکلات اقتصادی و نارضایتی کاربران منجر شود. بنابراین، اپراتورهای شبکه‌های مخابراتی باید به برنامه‌ریزی برای مکان‌یابی بهینه دکل‌ها توجه کنند تا به اهداف توسعه پایدار اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی دست یابند [7]. برای تبدیل اقتصاد جهانی و ایجاد یک جامعه دیجیتال با هدف توسعه پایدار و رشد اقتصادی، لازم است به اهداف توسعه پایدار سازمان ملل دست یافت. این امر با افزایش دسترسی به فناوری اطلاعات و ارتباطات و فراهم کردن دسترسی جهانی و مقرون به صرفه اینترنت در کشورهای در حال توسعه امکان‌پذیر است [8].

در این پژوهش، هدف اصلی تعیین بهترین مکان‌ها برای استقرار دکل‌های مخابراتی درسطح شهرستان ارومیه است، از این رو به بررسی پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه پرداخته می‌شود:

ایده این پژوهش بیشتر برمبنای چهار تحقیق پیش رو است:

مجتبی‌حبوبه در سال 1396، پژوهشی در زمینه مکان‌یابی دکل‌های مخابراتی برای تعیین مکان بهینه و پوشش نقاط کور با استفاده از به کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی و تکنیک تصمیم‌گیری چند معیاره ارائه داد. معیارهای موثر در این پژوهش، توسط تکنیک سلسله مراتبی فازی[4] وزن‌دهی شدند. در مراحل بعدی همه معیارها در محیط GIS تجزیه و تحلیل شدند و نقشه نهایی تهیه شد. نتایج نشان داد که کاربرد این تکنیک مناطقی از محدودهٔ مورد مطالعه را در سطح بالای عضویت فازی جهت اسقرار دکل قرار می‌دهد [9]. محمدی و همکاران در سال 1399، پژوهشی با هدف پایش سلامت شهروندان با رویکرد مکان‌یابی بهینه دکل‌های مخابراتی تلفن همراه و استفاده از وزن‌دهی معیارها توسط تکنیک تحلیل سلسله مراتبی و کاربرد منطق فازی در GIS پرداختند. نتایج نشان داد که برخی دکل‌ها در مناطق با مطلوبیت کم و خیلی

کم قرار دارند. همچنین، نقاط جدید پیشنهادی برای جابجایی دکل‌ها مشخص شد که باید در مناطق با مطلوبیت متوسط به بالا قرار گیرند تا تشعشعات مضر برای سلامت شهروندان کاهش یابد [10]. مالودیانتو و پرانتا [11] در سال 2019، به بررسی ترتیب مکان و تعداد ایستگاه‌های پایه، طی فرایند سلسله مراتبی بر اساس معیارهای تراکم جمعیت، طرح‌های فضایی و فاصله برای 5 سال آینده پرداختند. نتایج با بهره‌گیری از نقشه دیجیتال در GIS ارائه شد. در نهایت پیش‌بینی‌ها نشان‌دهنده ساخت 23 برج جدید در منطقه مورد بررسی است[11]. در پژوهشی که تایال و همکارن [12] در سال 2023 ارائه دادند رویکرد مدلسازی چند مرحله‌ای با استفاده از جعبه ابزار تحلیل فضایی و منطق فازی برای شناسایی مکان‌های مناسب ایستگاه‌های فرستنده و گیرنده پایه جدید توسعه یافته است. این مدل شامل 9 پارامتر تصمیم‌گیری است و از GIS به عنوان ابزاری برای ترکیب این معیارها در یک نقشه واحد استفاده می‌شود. در نهایت، 9 سایت جدید بهینه‌سازی شده برای ایستگاه‌ها پیشنهاد شده که پوشش شبکه‌ای برای 22 روستا فراهم می‌کند و نزدیکی به جاده‌ها و مکان‌های توریستی را کاهش می‌دهد [12]. اکبرپور و همکاران در سال 1397، پژوهشی با عنوان معرفی مدلی برای تقویت و پوشش‌دهی دکل‌های موبایل به منظور پابرجا بودن در زمان حوادث طبیعی ارائه دادند. برای حل مدل از نرم‌افزار LINGO9.0 بهره گرفته شد. نتیجه مدل پیشنهادی در این پژوهش، سیستم مخابراتی را در برابر بدترین حالت تخریب پشتیبانی کرده و تعداد کاربران بعد از وقوع سوانح و خرابی تسهیلات را بیشینه می‌کند [13]. در پژوهشی دیگر توحیدی نصب و همکاران در سال 1398، برای مکان‌یابی پوشش آنتن ها و دکل‌های مخابراتی به ارائه مدل های بهینه‌سازی از نوع چند جمله‌ای غیرقطعی[5] به صورت فازی همراه با مسائل چند هدفه پرداختند. با توجه به نتایج بدست آمده، پیشنهاد شد تا از الگوریتم‌های ژنتیک مرتب سازی نامغلوب[6] و رتبه‌بندی نامغلوب[7] و عمگرهای مناسب برای کارایی بالای آن در شاخص کیفیت استفاده شود [14]. حمیدرضا ملکی و الهه کریم دهکردی [15] در سال 2016، مدلی جهت به حداکثر رساندن پوشش خدمات قبل و بعد بلایای طبیعی در نظرگرفتند. در این پژوهش از نظریه‌های مجموعه فازی و برنامه‌ریزی فازی برای تبدیل مسئله برنامه ریزی چند هدفه به مسئله برنامه ریزی تک هدفه استفاده شد. سپس دو الگوریتم فراابتکاری بر روی نمونه‌ای از این مسئله با هم مقایسه شدند. نتیجه نشان داد که الگوریتم ژنتیک بهتر از الگوریتم گرسپ[8] عمل می‌کند [15]. در یک پژوهش انجام شده توسط گودرزیان و همکاران [16] در سال 2022، از مدل برنامه‌ریزی غیرخطی با استفاده از اعداد صحیح و مختلط برای بهینه‌سازی و تخصیص ایده‌آل دکل‌های مخابراتی پایه در شرایط بحرانی در مناطق مختلف بهره گرفته شد. جهت ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، از روش LP برای مسائل کوچک و الگوریتم شبیه‌سازی برای مسائل بزرگ استفاده شده است. تنظیم پارامترهای الگوریتم با استفاده از روش تاگوچی صورت گرفته و مدل در یک مطالعه موردی به اجرا درآمده است تا کارایی آن به نمایش گذاشته شود. در پایان، شبکه بهینه معرفی شده در مطالعه موردی توضیح داده شده است [16]. در سال 2020، محرم و سویانتو [17] از روش طراحی شبیه‌سازی بهینه‌سازی مکان ایستگاه های گیرنده فرستنده پایه با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب[9] با هدف بهینه‌سازی منطقه پوشش و ترافیک بهره گرفتند. این مطالعه به ارزش تناسب 97,73٪ دست یافت و تعداد ایستگاه‌ها را 50٪ کاهش داد. این نتیجه با مدل الگوریتم کرم شب‌تاب تکاملی[10] ترکیبی که میانگین تناسب 98,62٪ دارد، قابل مقایسه است. در آینده، می‌توان به بررسی موارد مهم‌تری از قرارگیری ایستگاه‌های پایه برای ارزیابی جامع‌تر عملکرد این الگوریتم پرداخت. [17]. صفوانی و همکاران [18] در سال 2021، تکنیک خوشه‌بندی فازی و جستجوی هارمونی را به عنوان روشی برای بهینه‌سازی مکان‌های بالقوه برج‌های جدید تلفن همراه برای 5 سال آینده ارائه دادند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که به 21 برج جدید اضافی نیاز است، که در مجموع به 95 برج در سال 2024 (74 برج موجود) می‌رسد. همچنین، روش‌های جستجوی هارمونی به بهینه‌سازی خدمات پوشش مناطق برج‌های جدید در منطقه موردمطالعه کمک می‌کنند، به طوری که این برج‌ها در شعاعی بین 600 تا 900 متر و با ارتفاعی بین 25 تا 50 متر قرار می‌گیرند [18]. در سال 2022، مدلی برای توسعه و ارتقاء شبکه مخابراتی در سریلانکا با هدف تراکم جمعیت برج‌های سیگنال با استفاده از برنامه

ریزی خطی راهبردی و مفاهیم نظریه گراف توسط هیروشی دلپریا و همکاران[3] ارائه شد. این مدل ها با هدف تقویت و توسعه شبکه ارتباطات محلی انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که جریان های ترافیک به ارائه بهترین انواع شبکه‌ها و بهینه‌سازی با استفاده از داده‌های موجود کمک کردند [3].

المغتاوی و همکاران [19] در سال 2024، یک روش کلاسیک به منظور بررسی چالش موقعیت‌یابی ایستگاه‌های پایه در یک شبکه سلولی ارائه دادند. هدف این پژوهش، ارائه خدمات به کاربران تلفن همراه در یک منطقه خاص با توجه به حرکات آن‌ها بود. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط طراحی کردند تا مکان‌های بهینه ایستگاه‌های پایه را در زمان‌های مختلف با حداقل هزینه کل شبکه تعیین کنند. نتایج نشان داد که این مدل توانسته مکان‌های بهینه را شناسایی کند و در عین حال محدودیت‌های ظرفیت و کیفیت خدمات را با حداقل هزینه مد نظر قرار دهد.[19].

2. روش انجام پژوهش

در این مطالعه، برای بررسی ویژگی‌های جغرافیایی از نرم‌افزار ArcGis10.8استفاده شد. ابتدا معیارهای توسعه پایدار از طریق مصاحبه با کارشناسان شرکت ارتباطات زیرساخت ارومیه و مقالات علمی جمع‌آوری شد و نقشه‌ای (لایه) [11] از این معیارها تهیه گردید. سپس با استفاده از پرسشنامه تکنیک بهترین - بدترین[12]کارشناسان به معیارها امتیاز دادند، این داده‌ها به صورت مدل خطی در نرم افزارLINGO14.0 پیاده‌سازی شد. وزن‌های به دست آمده به عنوان ورودی GIS در مرحله هم‌پوشانی با منطق فازی استفاده شد تا نقشه نهایی و مناسب‌ترین مکان برای احداث دکل مخابراتی تعیین گردد.

در حقیقت، یکی از مزایای استفاده ازGIS نسبت به سایر روش‌های مکان‌یابی، فراهم کردن پشتیبانی برای تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر داده‌های جغرافیایی است. همچنین، روش بهترین-بدترین امکان تعیین رتبه‌بندی مشخص بین آیتم‌ها را فراهم می‌آورد و به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا تمایز واقعی‌تری بین بهترین و بدترین گزینه‌ها قائل شوند. ترکیب دو تکنیک، ابزاری کارآمد برای تجزیه و تحلیل ایجاد می‌کند که امکان ساخت پایگاه داده‌ای جامع، به صورت نقشه‌برداری و الفبایی را فراهم می‌آورد. این پایگاه داده می‌تواند با روش‌های چندمعیاره، مسائل را ساده‌تر کرده و استفاده از معیارهای مختلف را ترویج دهد.

1,2 معیارهای پژوهش

با توجه به آنالیز انجام شده توسط کارشناسان شرکت ارتباطات زیرساخت شهرستان ارومیه در زمینه احداث دکل های تلفن همراه برای انتخاب معیارهای توسعه پایدار، 12 مورد از شاخص‌های موثر در رابطه با شرایط منطقه مورد مطالعه انتخاب شد که در جدول (1) به آنها اشاره شده است:

جدول1. معیارهای پژوهش

نوع معیار	نام معیار
زیست محیطی	فاصله از گسل
	فاصله از مکان های فرهنگی تاریخی
	فاصله از پارک‌ها
	فاصله از رودخانه
	مراکز درمانی (بیمارستان و درمانگاه)
اقتصادی	فاصله یا نزدیکی از مناطق روستایی
	نزدیکی به جاده اصلی
فنی	ارتفاع - شیب جهت شیب
اجتماعی	فاصله از مناطق مسکونی (محدوده شهری)
	فاصله از مدارس و مراکز آموزشی

2,2 محدوده مطالعاتی پژوهش

محدوده مورد مطالعه شهرستان ارومیه مرکز استان آذربایجان‌غربی است که از سمت شمال به شهرستان سلماس و از جنوب به شهرستان‌های نقده، اشنویه، از شرق به دریاچه ارومیه و از سمت غرب به مرز ایران و ترکیه محدود شده است. این شهرستان با مساحتی بالغ بر5221 کیلومتر مربع، حدود 14 درصد از مساحت استان را شامل می شود. طبق سرشماری نفوس و مسکن در سال 1395 با جمعیتی بالغ بر 1،040،000 نفر در استان آذربایجان‌غربی در شمال غرب ایران واقع شده است. شکل (1) موقعیت محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد [20].

$$
\begin{aligned}
&\min \xi \\
&s.t \\
&\left|\frac{w_B}{w_j} - a_{Bj}\right| \le \xi \\
&\left|\frac{w_j}{w_w} - a_{jw}\right| \le \xi \\
&for\ all\ \ j \\
&s.t. \\
&\sum_j w_j = 1 \\
&w_j \ge 0 \quad for\ all\ \ j
\end{aligned}
\tag{2}
$$

نرخ ناسازگاری[13]

در روش بهترین-بدترین، فرمولی برای محاسبه نرخ ناسازگاری و ارزیابی اعتبار مقایسات ارائه شده است. در این روش، ابتدا میزان سازگاری معیارها با استفاده از فرمول (3) محاسبه می‌شود:

$$
\text{نرخ سازگاری} = \frac{\xi^*}{\text{شاخص سازگاری}} \tag{3}
$$

با استفاده از شاخص سازگاری جدول (2) و رابطه آن مقدار نرخ ناسازگاری را می‌توان محاسبه کرد.

جدول 2. محاسبه میزان شاخص سازگاری

a_{BW}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
شاخص سازگار	0,00	0,44	1,00	1,63	2,30	3,00	3,73	4,47	5,23

نرخ سازگاری در بازه (۰،۱) قرار دارد و نزدیک‌تر بودن به صفر نشان‌دهنده ناسازگاری بالاتر است. هر چه مقایسات به یک نزدیک‌تر باشد، از ثبات و سازگاری بیشتر برخوردارند. روابط مذکور یک مدل غیرخطی بود که جعفر رضایی درسال 2016 آن را به یک مدل خطی به همراه با محاسبه اوزان شاخص ها تبدیل کرد. یکی از مزیت های این مدل خطی، محاسبه نرخ ناسازگاری بدون استفاده از شاخص سازگاری است. در واقع مقدار ξ^l همان تابع هدف است. همچنین وزن‌های مدل از دقت بیشتری برخوردار است. در نتیجه مدل خطی این تکنیک به صورت رابطه (4) معرفی می‌شود [22] :

$$
\begin{aligned}
&\min \xi^L \\
&s.t. \\
&\left|w_b - a_{bj} w_j\right| \le \xi^L \\
&\left|w_j - a_{jw} w_w\right| \le \xi^L \\
&for\ all\ \ j \\
&\sum_j w_j = 1 \\
&w_j \ge 0\ for\ all\ \ j
\end{aligned}
\tag{4}
$$

5,2 کاربرد منطق فازی درGIS

این روش به عنوان یک شیوه تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت شناخته می‌شود. استانداردسازی نقشه‌های عملیاتی با بهره‌گیری از منطق فازی در بازه (۰،۱) در محیط GIS صورت می‌گیرد. در این فرآیند، تابع عضویت تعریف شده، به گونه‌ای است که مقادیر بالای عضویت نشان‌دهنده تناسب بیشتر و مقادیر پایین‌تر، نشان‌دهنده تناسب کمتری برای دستیابی به نتایج مطلوب هستند [23]. در ادامه برخی توابع فازی به کارگرفته شده برای معیارها معرفی می‌شوند:

6,2 معرفی توابع عضویت فازی مورد استفاده معیارها

تابع عضویت فازی گوسی[14]: این تابع مقادیر پیکسل‌ها را به صورت نرمال توزیع می‌کند، به طوری که بهترین ارزش برای توزیع نرمال برابر با 1 است که در مرکز نمودار قرار دارد و به تدریج به سمت مثبت و منفی کاهش می‌یابد.

تابع عضویت فازی کمینه[15]: این تابع برای پیکسل‌هایی با ارزش کمتر مناسب است. هرچه فاصله از مقدار عددی تابع بهینه کمتر باشد درجه مطلوبیت بیشتر می‌شود و هرچه از آن بزرگ‌تر شود، مطلوبیت کمتر می‌شود.

تابع عضویت فازی خطی[16]: در این تابع، یک تابع خطی برای تعیین درجه عضویت بین مقادیر کمینه و بیشینه استفاده می‌شود. مقادیر زیر حد کمینه هیچ درجه عضویتی ندارند، در حالی که مقادیر بالای حد بیشینه درجه عضویت کامل (مقدار یک) دریافت می‌کنند [24]. همچنین پنج عملگر سودمند برای ترکیب داده‌های مکانی و مقادیر عضویت

آن ها جهت تهیه نقشه نهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد به ترتیب به آن ها اشاره شده است [25]:

عملگر تلفیق فازی[17]: این عملگر برای انجام عمل تلفیق از رابطه (5) استفاده می کند:

$$\mu combine = Min(\mu a, \mu b, \mu c, ..) \quad (5)$$

در این رابطه مقادیر μa,μb,μc... به ترتیب مقادیر عضویت اشتراک برای نقشه‌های a,b,c,.. در یک موقعیت به خصوص بر روی هر یک از نقشه‌ها را نشان می‌دهند.

عملگر اجتماع فازی [18]: عملگر اجتماع فازی به صورت رابطه (6) بیان می‌شود:

$$\mu combine = Max(\mu a, \mu b, \mu c, ..) \quad (6)$$

در این عملگر، مقادیر حداکثر عضویت نقشه‌ها در هر موقعیت مقادیر عضویت خروجی را کنترل می‌کنند.

عملگر ضرب جبری فازی [19]: عملگر ضرب فازی نتیجه عمل تلفیق دو عملگر بالا به صورت حاصل‌ضرب جبری رابطه (7) بیان می‌شود:

$$\mu combine = \prod_i^n \mu i \quad (7)$$

عملگر جمع جبری فازی [20]: عملگر جمع جبری به صورت رابطه (8) بیان می‌شود:

$$\mu combone = 1 - (\Pi(1 - \mu i)) \quad (8)$$

در این عملگر، نسبت به عملگر ضرب جبری فازی، اثر افزایشی وجود دارد که منجر به بالاترین مقدار عضویت در نتیجه می‌شود.

عملگر گاما فازی [21]: عملگر گاما حاصل‌ضرب دو عملگر ضرب جبری و جمع جبری به صورت رابطه (9) بیان می شود:

$$\mu combine = (\prod_{i=1}^n \mu 1-\gamma) \times (1 - \prod_{i=1}^n (1-\mu i)\gamma) \quad (9)$$

در این رابطه γ پارامتری است که مقدار عددی در محدوده صفر و یک را نشان می‌دهد. در صورتی که مقادیر این پارامتر به درستی انتخاب شود، مقادیری را در خروجی منعکس می کند که باعث تصمیم‌گیری صحیح کارشناسان می‌شود.

3. تجزیه تحلیل یافته های پژوهش

1,3 تعیین وزن معیارها با استفاده از پرسشنامه و تشکیل مدل خطی

ابزارگردآوری داده‌ها در تکنیک بهترین ـ بدترین، تهیه پرسشنامه استاندارد است. برای این کار 15 پرسشنامه با داده های عددی مختلف مقایسه زوجی شدند. در نهایت پرسشنامه جدول (3) به عنوان پرسشنامه بهترین و بدترین معیار از نظر خبرگان تایید شد. خبرگان و کارشناسان که نظر تخصصی در مورد پرسشنامه داده اند 10 نفر با تخصص کارشناسی مخابرات ،کارشناسی ارشد برق گرایش مخابرات (میدان)، کارشناسی ارشد گرایش مخابرات (سیستم)، کارشناسی کامپیوتر (نرم‌افزار)، کارشناسی ارشد فناوری اطلاعات، کارشناسی معماری، کارشناسی ارشد شهرسازی ،کارشناسی عمران زمین و مسکن، کارشناسی جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری و کارشناسی اقتصاد و توسعه بوده‌اند که در سمت کارشناس بخش نصب و راه اندازی دکل‌های مخابراتی تلفن همراه در شرکت ارتباطات زیرساخت ارومیه حضور دارند.

جدول3. پرسشنامه تکنیک بهترین_ بدترین

نام معیار	کد	بهترین معیار ارتفاع	بدترین عنصر جهت شیب
فاصله از منطقه مسکونی	W_{01}	2	7
جاده های اصلی	W_{02}	2	7
مناطق روستایی	W_{03}	2	7
مکانهای فرهنگی تاریخی	W_{04}	3	5
پارک ها	W_{05}	3	5
مدارس و مراکز آموزش عالی	W_{06}	2	5
رودخانه	W_{07}	3	6
شیب	W_{08}	5	2
جهت شیب	W_{09}	8	1
ارتفاع	W_{10}	1	8
مراکز درمانی	W_{11}	2	6
گسل	W_{12}	6	3

معیار ارتفاع به عنوان بهترین و معیار شیب به عنوان بدترین معیار در هر بعد، توسط طیف 9 انتخاب شدند.

2,3 مدل خطی تکنیک BWM

$$Min \xi_l$$

$$s.t.$$

$$|w_{10} - 2w_1| \le \xi_l$$
$$|w_{10} - 2w_2| \le \xi_l$$
$$|w_{10} - 2w_3| \le \xi_l$$
$$|w_{10} - 3w_4| \le \xi_l$$
$$|w_{10} - 3w_5| \le \xi_l$$
$$|w_{10} - 2w_6| \le \xi_l$$
$$|w_{10} - 3w_7| \le \xi_l$$
$$|w_{10} - 5w_8| \le \xi_l$$
$$|w_{10} - 8w_9| \le \xi_l$$
$$|w_{10} - 2w_{11}| \le \xi_l$$
$$|w_{10} - 6w_{12}| \le \xi_l$$

$$|w_1 - 7w_9| \le \xi_l$$
$$|w_2 - 7w_9| \le \xi_l$$
$$|w_3 - 7w_9| \le \xi_l$$
$$|w_4 - 5w_9| \le \xi_l$$
$$|w_5 - 5w_9| \le \xi_l$$
$$|w_6 - 5w_9| \le \xi_l$$
$$|w_7 - 6w_9| \le \xi_l$$
$$|w_8 - 2w_9| \le \xi_l$$
$$|w_{10} - 8w_9| \le \xi_l$$
$$|w_{11} - 6w_9| \le \xi_l$$
$$|w_{12} - 3w_9| \le \xi_l$$

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 + w_7 + w_8 + w_9 + w_{10} + w_{11} + w_{12} = 1$$

$$w_1, .., w_{12} \ge 0$$

$$j = 1, 2, ..., 12$$

جواب بهینه و وزن معیارها بر اساس مدل خطی در رابطه پیاده‌سازی شده و در LINGO14.0 (10) در نرم‌افزار جدول(4) ارائه می شود.

جدول4. نتایج پیاده‌ساری مدل خطی و محاسبه وزن معیارها

کد	وزن معیار
W_{01}	0,105
W_{02}	0,105
W_{03}	0,105
W_{04}	0,070
W_{05}	0,070
W_{06}	0,105
W_{07}	0,070
W_{08}	0,040
W_{09}	0,017
W_{10}	0,175
W_{11}	0,105
W_{12}	0,034

نرخ ناسازگاری در روش خطی برابر با مقدار تابع هدف است و خروجی نرم‌افزار نشان می‌دهد که این نرخ حدود 0,035 و کمتر از 0,1 است، که نشان‌دهنده سازگاری بالا در مقایسات زوجی معیارها می‌باشد.

نرخ ناسازگاری = ξ^l = 0,035 < 0,1

3,3 تحلیل نقشه معیارها درنرم افزار GIS

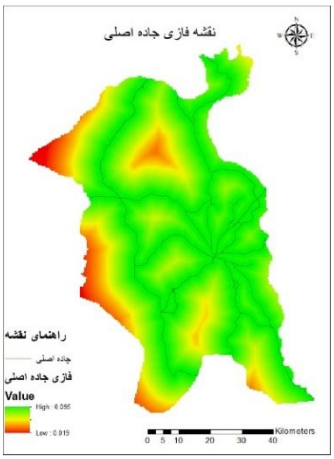
در مرحله فراخوانی نقشه معیارها در این نرم‌افزار، استانداردسازی نقشه‌ها شامل پردازش‌هایی نظیر تنظیم سیستم مختصاتی نقشه‌ها بر اساس سیستم تصویر جهانی مرکاتور جانبی[22]و اعمال فاصله اقلیدسی بر روی نقشه‌ها بود. این فرآیند منجر به تبدیل نقشه‌ها از حالت وکتوری به حالت رستری بر اساس لایه رقومی ارتفاع [23] انجام شد. همچنین، مرحله فازی‌سازی لایه‌های رستری از طریق تعریف توابع فازی

برای معیارها با فواصل قراردادی انجام گردید. جدول (5) به معرفی نوع تابع عضویت فازی معیارها می پردازد:

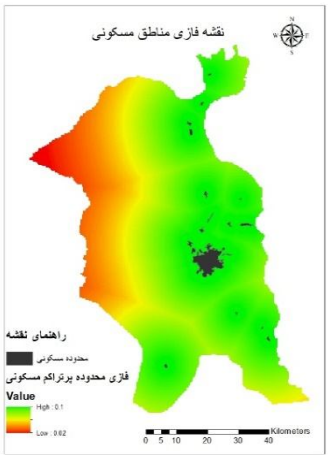
جدول5. معرفی توابع عضویت فازی معیارها

نام معیار	نوع تابع عضویت	نوع فواصل تعیین شده
مناطق مسکونی	Small	خطی کاهنده
جاده‌های اصلی	Small	خطی کاهنده
مناطق روستایی	Small	خطی کاهنده
ارتفاع	Small	خطی کاهنده
شیب	Small	خطی کاهنده
جهت شیب	Gaussian	بدون تغییر
مراکز درمانی	Linear	خطی افزایشی
مراکز آموزشی و مدارس	Linear	خطی افزایشی
مکان‌های فرهنگی وتاریخی	Linear	خطی افزایشی
پارک‌ها	Linear	خطی افزایشی
گسل	Linear	خطی افزایشی
رودخانه	Linear	خطی افزایشی

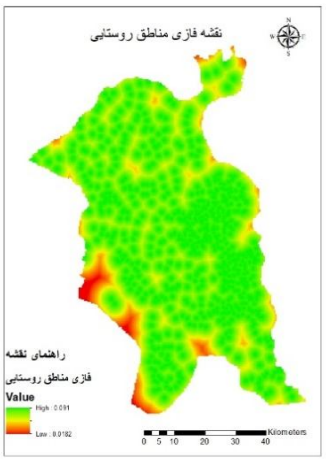
4,3 نقشه خروجی فازی معیارها در GIS



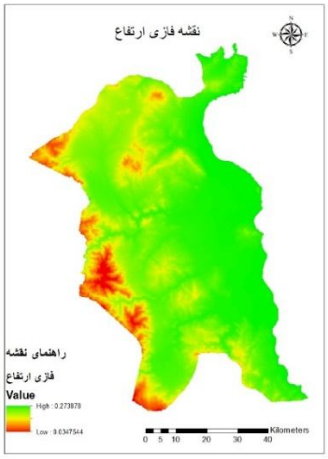
شکل 2. نقشه فازی مناطق روستایی



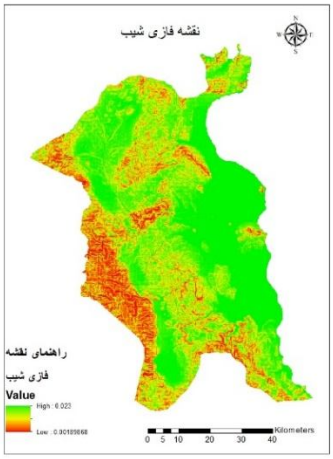
شکل 3. نقشه فازی جاده اصلی



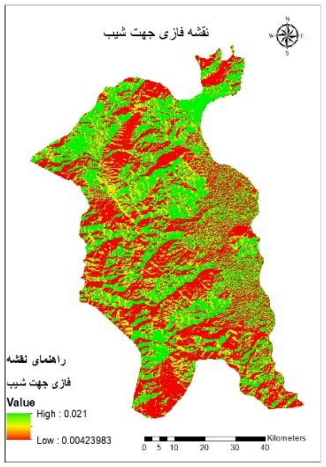
شکل 4. نقشه فازی مناطق مسکونی



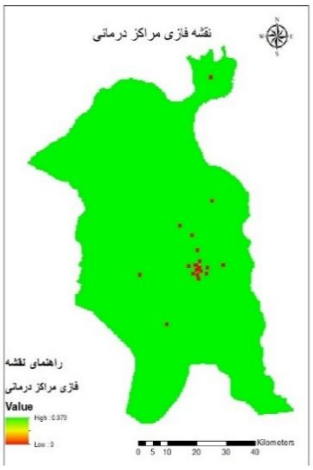
شکل 5. نقشه فازی جهت شیب



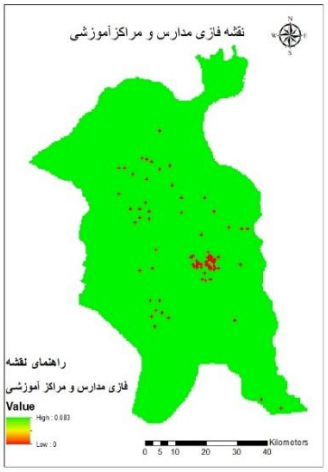
شکل 6. نقشه فازی شیب



شکل 7. نقشه فازی ارتفاع



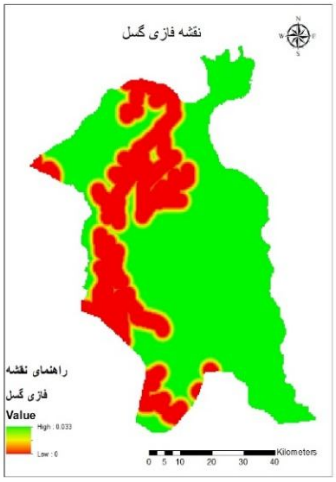
شکل 8. نقشه فازی مراکز فرهنگی و تاریخی



شکل 9. نقشه فازی مدارس و مراکز آموزشی

شکل 10. نقشه فازی مراکز درمانی

شکل 11. نقشه فازی رودخانه



شکل 12. نقشه فازی گسل

شکل 13. نقشه فازی پارک

بعد از مرحله فازی‌سازی معیارها ، هر یک از این نقشه‌ها، در وزن‌های خود که از طریق تکنیک بهترین - بدترین محاسبه شده بود، ضرب شد.

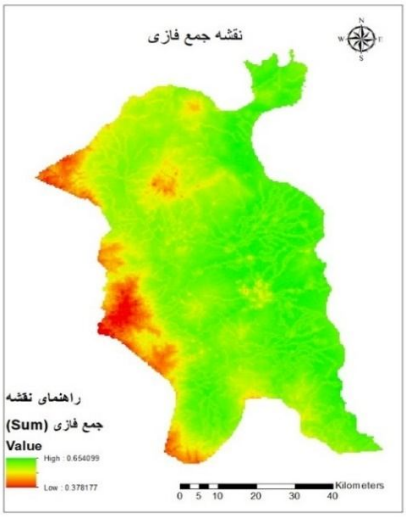
5,3 عملیات هم‌پوشانی لایه‌های وزن‌دهی‌شده

در آخرین مرحله از تهیه نقشه نهایی، عملیات هم‌پوشانی لایه‌های وزن‌دهی شده انجام می‌شود. در این مرحله، عملگر اجتماع فازی پیکسل‌هایی با ارزش صفر را در نقشه نهایی به عنوان یک در نظر می‌گیرد، در حالی که عملگر اشتراک فازی فقط پیکسل‌هایی با ارزش یک را لحاظ می‌کند. عملگر جمع فازی به دلیل افزایش مقدار عضویت نهایی پیکسل‌ها، تعداد بیشتری را در کلاس "خیلی خوب" قرار می‌دهد و حساسیت کمتری در مکان‌یابی دارد. در مقابل، عملگر ضرب فازی با کاهش عضویت نهایی پیکسل‌ها، تعداد کمتری را در کلاس "خیلی خوب" قرار می‌دهد و ممکن است برخی مناطق مناسب را نادیده بگیرد. شکل شماره(14) و شکل شماره(15) نقشه فازی دو عملگر جمع و ضرب فازی را نمایش می دهد.

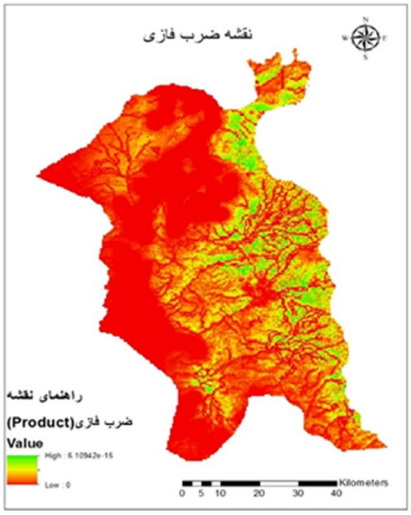
6,3 تحلیل نقشه نهایی عملگر گامای فازی

عملگر گاما به ترتیب برای اصلاح حساسیت بالا و پایین دو علمگر ضرب و جمع فازی و ایجاد سازگاری، بین گرایش‌های افزایشی و کاهشی آن ها در تعیین نقشه نهایی به کارگرفته می‌شود.گامای صفر معادل ضرب و گامای یک معادل جمع

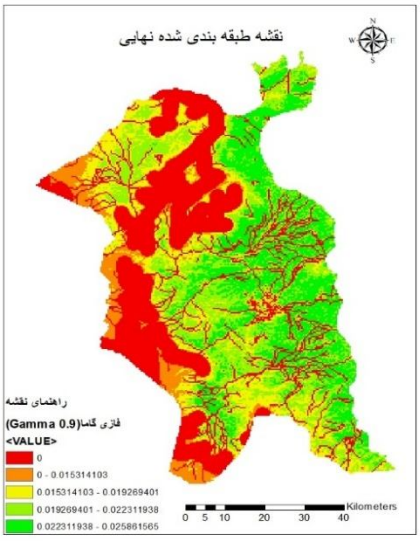
فازی است. از این رو نقشه نهایی گامای فازی 0,9 در شکل شماره (16) به عنوان نقشه بهینه دکل‌های مخابراتی تلفن همراه انتخاب شد. در نقشه شکل شماره (16)، مناطق مناسب برای احداث دکل‌های مخابراتی تلفن همراه به پنج دسته با ارزش‌های بین صفر و یک تقسیم شده‌اند. مناطق قرمز با ارزش صفر نامناسب‌ترین و مناطق سبز با ارزش بین 0,025- 0,022 مناسب‌ترین مناطق هستند که در کلاس فازی خیلی خوب (عدد یک) قرار می‌گیرند.



شکل14. نقشه جمع فازی (Sum)

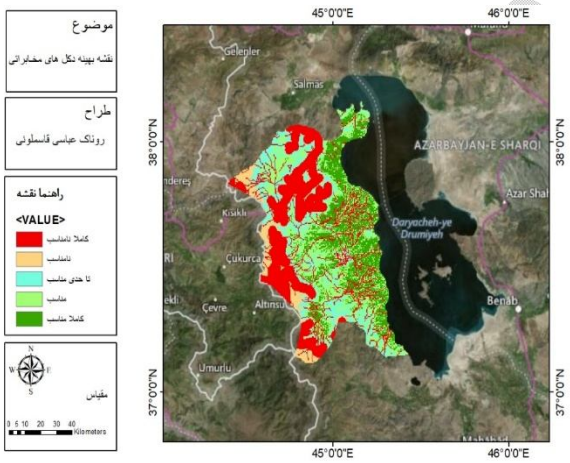


شکل15. نقشه ضرب فازی (Product)



شکل16. نقشه طبقه بندی نهایی(Gamma0.9)

در شکل شماره (17) نقشه بهینه نهایی دکل‌های مخابراتی تلفن همراه از طریق نرم‌افزار ArcGis وافزونه Google Earth تهیه شد.



شکل17. نقشه بهینه نهایی دکل‌های مخابراتی تلفن همراه

در ادامه، شکل شماره (18) محدوده تحت پوشش دکل‌های مخابراتی در پنج بخش مختلف شهرستان ارومیه با توجه به نقشه نهایی نشان می‌دهد.

شکل 18. محدوده تحت پوشش دکل‌های مخابراتی

4. نتایج

در این پژوهش، تلفیق ابزارهای نرم‌افزار GIS با تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره BWM باعث شناسایی مکان‌های بهینه شد. نتایج نشان می‌دهد که در بخش‌های غربی شهرستان ارومیه امکان نصب دکل‌ها محدود است و بهترین نقاط در مناطق شرقی نزدیک دریاچه ارومیه قرار دارند. نقشه نهایی در شکل شماره (18) مناطق بهینه را نشان می‌دهدکه بیشترین مناطق مناسب در شمال شرق، شرق و جنوب شهرستان و همچنین در بخش‌های انزل و نازلو واقع شده‌اند. این مناطق دارای ارتفاع و شیب کمتری هستند و در فاصله مناسبی از رودخانه‌ها و جاده‌ها قرار دارند. در مقابل، مناطق نامناسب عمدتاً در صومای و سیلوانه در محدوده گسل با ارتفاعات و شیب زیاد واقع شده‌اند. هرچند با وجود روستاها در این مناطق، شرکت‌های مخابراتی باید طبق برنامه‌ریزی های سازمان مدیریت بحران، سیستم‌های مخابراتی مقاوم و پایدار را در این نواحی ایجاد کنند. توصیه می‌شود که مدیران شرکت‌های فعال در حوزه ساخت و راه‌اندازی دکل‌های مخابراتی از روش‌های ارائه شده در این پژوهش برای شناسایی مناسب‌ترین مکان‌ها جهت احداث دکل و پوشش‌دهی نقاط کور بهره‌برداری کنند. با این حال، در عمل بهتر است که تمامی معیارهای توسعه پایدار (اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و سیاسی) که برای احداث زیرساخت‌های حیاتی مانند دکل‌های تلفن همراه ضروری است، به‌طور همزمان مدنظر قرار دهند. پیشنهاد می‌شود که مدیران، استانداردها و معیارهای واضح در تعیین مکان دکل‌های مخابراتی را به صورت کلاس‌های آموزشی برای کارکنان تدوین کنند. همچنین، مدیران شرکت‌های مخابراتی باید با مقامات محلی و سازمان‌های مرتبط در ارتباط باشند تا نیازها و محدودیت‌های محلی را که شامل تمامی عوامل زیست‌محیطی، کاربری اراضی، شهرسازی، تاریخ و فرهنگ، ایمنی و حمل و نقل می‌شود، بررسی و رعایت کنند.

پانوشت‌ها

1. Facility Location Problems
2. Base Tranceiver Station
3. International Telecommunication
4. Fuzzy hierarchical analysis process
5. Non Deterministice Polynomail(NP)
6. Genetic Algoritm Of Non-Dominant Sorting(NSGAII)
7. Non-Dominant Rankig Genetic Algoritm(NRGA)
8. Grasp Algoritm
9. Firefly Algorithm (FA)
10. Hybrid evolutionary firefly algorithm(HEFA)
11. Shape File
12. Best-Worst Method(BWM)
13. Incompatibility Rate(IR)
14. Fuzzy Gaussian
15. Fuzzy Small
16. Fuzzy Linear
17. Fuzzy And
18. Fuzzy OR
19. Fuzzy Product
20. Fuzzy Sum
21. Fuzzy Gamma
22. Universal Transverse Mercator(UTM)
23. Digital Elevation Model(DEM)

5. منابع (Refrences)

1. Farahani, R.Z., Fallah, S., Ruiz, R., Hosseini, S. and Asgari, N., 2019. OR models in urban service facility location: A critical review of applications and future developments. *European journal of operational research*, 276(1), pp.1-27.https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.036.
2. Hoomod, H.K., Al-Mejibli, I. And IssaJabboory, A., 2017, March. Optimizing SOM for cell towers distribution. In 2017*Annual Conference on New Trends in Information & Communications Technology Applications (NTICT)* (pp. 138-143). IEEE. https://doi.org/10.1109/NTICT.2017.796
3. Dilpriya, T.A.H., Lanel, G.H.J. and Vidanage, B.V.N.C., 2022. A Strategy to Strengthen and Enhance the Telecommunication Network in Sri Lanka by Using Concepts of Graph Theory and Linear Programming Models. *International Journal of Natural Sciences Research*, 10(1), pp.1-20. https:// doi.org/10.18488/63. v10i1.2913.
4. Dutta, M.A., 2012, March. Optimization problems and techniques. *In* 2012 2nd *National Conference on Computational Intelligence and Signal Processing (CISP)* (pp. 26-26). IEEE. https://doi: .org/10.1109/nccisp.2012.6189674.
5. Kranda, Y. and Şamli, R., 2021. A hybrid algorithm for changepoint aware long-term seasonality detection of mobile network base stations. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (27), pp.370-385., https:// doi: 10.31590/ejosat.931099.
6. Amponsah, E., Takyi, S.A., Asibey, M.O. and Amponsah, O., 2022. Assessing the level of compliance of telecommunication masts to locational planning standards towards harmonious and orderly city growth. *Cities & Health*, 6(4), pp.777-790. https://doi. org/ 10.1080/23748834.2021.1956837.
7. Premarathne, B.M.N., Bamunusinghe, B.K.A.C. and Malavipathirana C.G., 2021. An Analysis of Suitable Location for Establishing Telecommunication Tower at Sir John Kotelawala Defence University, Southern Campus. http:// doi.org/ir.kdu.ac.lk/handle/345/5165.
8. Amadasun, K.N., Short, M., Shankar Priya, R. and Crosbie, T., 2021.Transitioning to Society 5.0 in Africa: Tools to support ICT infrastructure sharing. *Data*, 6(7), p.69. https:// doi.org/ 10.3390/data6070069.
9. Hobobeh, M. 2016. Locating telecommunication masts for radio network coverage (Mazandaran seashores), Master's thesis in the field of geography and urban planning, Mazandaran University. (In Persian). https://elmnet.ir/doc/11251375-94084.
10. Mohammadi, Sh., Heydari, M.T., Tahmasabi Moghadam, H., 2020. Environmental health monitoring with optimal location of mobile phone towers, case study: (Region ۱ of Zanjan City Municipality):Quarterly Journal of Geography and Urban-Regional Studies, 10th year, number 35, pp. 142-127.(In Persian).https://doi.org/10.22111/gaij.2020.5567.
11. Mauludiyanto, A. and Pranata, Y.D., 2019. Planning of number and location of new Base Transceiver Station (BTS) tower in mobile telecommunication system in jombang using analytical hierarchy process method and geographic information system approach. *JAREE (Journal on Advanced Research in Electrical Engineering)*, *3*(2). https://doi.org/10.12962/j25796216.v3.i2.87.
12. Tayal, S., Vijay, S. and Garg, P.K., 2023.

Multistage Optimized Site Suitability Modeling for Base Transceiver Station Placement in Pithoragarh District of Uttarakhand Using Spatial Analyst and Fuzzy Logic Toolbox. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, *51*(4), pp.743-756 https://doi.org/10.1007/s12524-022- 01662-0.

13. Akbarpour, H., Bozorgi Amir, A., Alinejad, N., Akbarpour, M.,2019. strengthening and covering mobile masts in order to stand up during natural disasters. Industrial Management Studies, 17(53), pp. 159-184.(In Persian**)**. https:// doi.org /10.22054/jims. 2018.14541,1525.
14. Tawhidi Nasab, P., Sidboir, S., Tayibi Iraqi, M.E., 2015. Providing A direction model Location of telecommunication antennas considering capacity limitation and non-deterministic demand of subscribers. (In Persian). https://civilica.com/doc/566406.
15. Maleki, H.R. and Karimidehkordi, E., 2016. Mobile base stations location problem to fortification against natural disasters: A fuzzy approach. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 30(3), pp.1421- 1427. https:// doi.org/10.3233/ IFS-152055.
16. Goodarzian, F., Bahrami, F. and Shishebori, D., 2022. A new location-allocation-problem for mobile telecommunication rigs model under crises and natural disasters: a real case study. *Journal of ambient intelligence and humanized computing*, pp.1-19. https://doi.org/10.1007/s12652-021-03461-w
17. Muharram, M.F. and Suyanto, S., 2020, December. Firefly algorithm-based optimization of base transceiver station placement. In *2020 3rd International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI)* (pp. 467-470). IEEE. http://doi.org/10.1109/ISRITI51436.2020.9315462.
18. Safwani, E., Firdausi, A. and Hakim, G., 2021. Tower planning and arrangements mobile telecommunication district central Aceh with methode fuzzy clustering. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, *2*(1), pp.7-11. http://doi.org/10.18196/jrc.2144.
19. Almoghathawi, Y., Obaid, H.B. and Selim, S., 2024. Optimal location of base stations for cellular mobile network considering changes in users locations. *Journal of Engineering Research*. https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.04.020.
20. Iran Statistics Center.,2015**.** General Population and Housing Census. . www.sarshomari95.ir.
21. Sadjadi, S. and Karimi, M., 2018. Best-worst multi-criteria decision-making method: A robust approach. *Decision Science Letters*, 7(4), pp.323-340. http://dx.doi.org/10/5267/j.dsl.2018.3.003.
22. Rezaei, J., 2015. Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, pp.49-57 https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009
23. Valášková, K., Klieštik, T. and Mišánková, M., 2014, January. The role of fuzzy logic in decision making process. In 2014 2*nd international conference on management innovation and business innovation* (Vol. 44, No. 1, pp. 143-148). https:// doi.org/ 10/5729/lnms. vol4.143.
24. Darag, A., Yazdani, S., and Dargahi, M.M., 2017. Applied GIS training in physical development simulation Tehran: Satellite Publications pp.153-156(In Persian) https://www.ketabrah.ir.
25. Fallah-Ghalhary, G.A., Mousavi-Baygi, M. and Nokhandan, M.H., 2009. Annual rainfall forecasting by using mamdani fuzzy inference system. *Research Journal of Environmental Sciences*, 3(4), pp.400-413. https:// doi.org/ 10.3923/rjes.2009. 400/413