Original Article

Optimal Location Determination for 63.20 kV Substation Construction Using Network Analysis Process and Fuzzy Logic in GIS

Abolfazl Habibi Tabar[1]*, Sahar Alian[2], Davoud Soleimanian[3]

Affiliation

1. *Master of GIS, Electricity Distribution Company of Qom province, Qom, Iran*
2. *Assistant professor in the civil engineering department of Rahman Ramsar Institute of Higher Education, Ramsar, Iran*
3. *MSc in Power Engineering, Qom Province Electricity Distribution Company, Qom, Iran*

Citation: *Habibi Tabar, A., Alian, S., Soleimanian, D., Optimal Location Determination for 63.20 kV Substation Construction Using Network Analysis Process and Fuzzy Logic in GIS, Iran J Remote Sens GIS. 16(3):123-146.*

ABSTRACT

Introduction: The 63.20 kV substations serve as the energy injection points from the transmission network to the distribution network. Determining the substation's location is important from both technical and economic perspectives for regional electricity companies and electricity distribution companies. This research aims to identify the optimal location for constructing a 63.20 kV substation, distinguishing its methodology from similar studies by considering criteria specific to electricity distribution companies and the internal interactions and influences of these criteria.

Materials and Methods: This study employs the network analysis process (ANP) and fuzzy logic within Geographic Information System (GIS). Based on expert evaluations, 13 criteria were identified as primary factors for substation location. ArcGIS software was utilized to create criteria layers. To standardize the criteria layers, data were normalized between 0 and 1 using fuzzy membership functions. The ANP method was then used to determine the final weightings of the criteria, which were applied to their corresponding fuzzy maps. For the final analysis, the gamma operator with the gamma values of 0.7, 0.8, and 0.9 was employed. Optimal gamma value selection was implemented using the gamma correlation coefficient test in SPSS software, leading to the calculation of the correlation coefficient and standard deviation.

Results and Discussion: The standard deviation calculations indicated that a gamma value of 0.7 has higher accuracy compared to other values. In the final map, areas around the city of Kahak were identified as the optimal location for constructing the 63.20 kV substation in Qom province.

Keywords: 63/20 kV Substation, Network Analysis Process (ANP), Geographic Information System (GIS), Fuzzy Logic, Optimal Location.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

* Corresponding Author: a.habibitabar@gmail.com
DOI: https://doi.org/10.48308/gisj.2023.103606
Received: 2023.01.05
Accepted: 2023.06.12

Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۶، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۳ شاپا: ۵۹۶۶-۲۰۰۸، شاپا الکترونیکی: ۶۱۸۵-۲۵۸۸

مقاله پژوهشی

به‌کارگیری مدل فرایند تحلیل شبکه و منطق فازی به‌منظور تعیین محدودهٔ بهینهٔ احداث پست ۶۳/۲۰ کیلوولت در بستر GIS

ابوالفضل حبیبی‌تبار[۱]*، سحر علیان[۲]، داود سلیمانیان[۳]

سمت

۱. کارشناسی ارشد GIS، شرکت توزیع نیروی برق استان قم، قم، ایران
۲. دکتری مهندسی ایمنی راه و ترابری (سیستم اطلاعات مکانی)، استادیار گروه عمران مؤسسهٔ آموزش عالی رحمان رامسر، رامسر، ایران
۳. کارشناسی ارشد برق قدرت، شرکت توزیع نیروی برق استان قم، قم، ایران

استناد: حبیبی‌تبار، ا.، علیان، س.، سلیمانیان، د.، به‌کارگیری مدل فرایند تحلیل شبکه و منطق فازی به‌منظور تعیین محدودهٔ بهینهٔ احداث پست ۶۳/۲۰ کیلوولت در بستر GIS، نشریه سنجش از دور و GIS ایران. سال ۱۶، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۳: ۱۴۶-۱۲۳.

چکیده

سابقه و هدف: نقطهٔ تزریق انرژی از شبکهٔ انتقال به شبکهٔ توزیع، پست‌های ۶۳/۲۰ کیلوولت هستند. تعیین محل احداث پست، از نظر فنی و اقتصادی برای شرکت‌های برق منطقه‌ای و شرکت‌های توزیع برق اهمیت ویژه‌ای دارد. هدف این پژوهش، تعیین محدودهٔ بهینهٔ احداث پست ۶۳/۲۰ کیلوولت است و تفاوت روش تحقیق این پژوهش با دیگر مطالعات مشابه، استفاده از معیارهای مرتبط با شرکت توزیع برق و لحاظ کردن تأثیر و ارتباطات درونی معیارها با یکدیگر است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش از روش فرایند تحلیل شبکه‌ای و توابع فازی در بستر GIS استفاده شده است. با بررسی منابع و نظرسنجی از کارشناسان خبره، تعداد ۱۳ معیار به‌عنوان عوامل اصلی و تأثیرگذار در تعیین محل احداث پست تعیین و سپس با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS، نقشه‌های معیارها تهیه شد. به‌منظور همگن کردن لایه‌های اطلاعاتی، داده‌ها با استفاده از توابع عضویت فازی بین ۰ و ۱ قرار گرفتند. وزن نهایی معیارها با استفاده از روش ANP تعیین و در نقشهٔ فازی خود اعمال شدند. برای تحلیل نهایی موضوع پژوهش، از عملگر گاما با مقادیر گامای ۰/۷، ۰/۸ و ۰/۹ استفاده شد. به‌منظور انتخاب بهینه گامای فازی، داده‌ها در نرم‌افزار SPSS و با استفاده از آزمون ضریب همبستگی گاما، تجزیه‌وتحلیل شدند که در نتیجه، مقدار ضریب همبستگی و انحراف از معیار محاسبه شد.

نتایج و بحث: نتایج حاصل از محاسبهٔ انحراف معیار نشان داد که دقت گامای ۰/۷ از دو گامای دیگر بالاتر است. در نقشهٔ نهایی به‌دست‌آمده، محدودهٔ شهر کهک، محدوده بهینه برای احداث پست ۶۳/۲۰ کیلوولت در سطح استان قم است.

واژه‌های کلیدی: پست ۶۳/۲۰ کیلو ولت، فرایند تحلیل شبکه (ANP)، سیستم اطلاعات مکانی (GIS)، منطق فازی

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.habibitabar@gmail.com
شناسه دیجیتال مقالات: https://doi.org/10.48308/gisj.2023.103606
دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۵
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۲
Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

۱- مقدمه

امروزه انرژی الکتریکی یکی از اساسی‌ترین نیازهای بشر است، به همین دلیل صنعت برق به یکی از صنایع بزرگ در کل جهان تبدیل شده است. پست‌های ۶۳/۲۰ کیلوولت نقطهٔ انتهایی شبکهٔ فوق‌توزیع و آغاز شبکهٔ توزیع برق به شمار می‌روند. بنابراین تعیین مکان مناسب یا نامناسب این پست‌ها می‌تواند طراحی دیگر بخش‌های شبکهٔ توزیع را تحت تأثیر قرار دهد. به بیان دیگر درصورتی‌که در تعیین محل احداث پست‌های ۶۳/۲۰ دقت کافی صورت نگیرد، سیستم توزیع با مشکلات فنی و اقتصادی درخور توجهی مواجه خواهد شد (Khator, 1997). هزینه‌های یک سیستم توزیع، عامل مهمی در قیمت انرژی تحویلی به مصرف‌کنندگان به شمار می‌رود. در سطح بین‌المللی حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد کل هزینهٔ سرمایه‌گذاری یک سیستم قدرت، به سیستم توزیع اختصاص داده می شود (Gönen,1986). ازاین‌رو سعی می‌شود احداث پست ۶۳/۲۰ کیلوولت با تعامل شرکت‌های برق منطقه‌ای و شرکت‌های توزیع برق انجام شود. بنابراین استفاده از معیارهای شرکت‌های توزیع برق در تعیین محل احداث پست از جنبهٔ اقتصادی و فنی اهمیت ویژه‌ای دارد. متخصصان و پژوهشگران در زمینهٔ تعیین محل احداث پست‌های فوق‌توزیع مطالعاتی انجام داده‌اند که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

در پژوهشی، جواد روحی (۲۰۰۳) جایابی بهینهٔ پست‌های ۶۳/۲۰ کیلوولت در شرایط توسعه را در حوزهٔ شهرستان ساری بررسی کرده است. در این روش ابتدا تعدادی زمین که شرایط لازم برای احداث پست را دارند به‌عنوان کاندید انتخاب و سپس با در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی نظیر افت ولتاژ، تلفات و ... نقاط کاندید بررسی شدند. در این تحقیق اهمیت و محوریت با زمین‌های انتخابی است و بسیاری از معیارهای شرکت‌های توزیع در محاسبات دخیل نشده است (Rouhi & Yousfi, 2003). فاطمه اله اکبری و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی پس از نظرسنجی از ۱۱ کارشناس خبره، تعداد شش معیار برای مکان‌یابی پست ارائه کردند. معیارها عبارت‌اند از: فنی، اقتصادی، ضریب بهره‌برداری، نظارتی- اجرایی، زیست‌محیطی. در ابتدا با انجام مقایسه های زوجی بین عوامل و با استفاده از روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)[1] گروهی اوزان معیارها و زیرمعیارها تعیین شد، سپس با ارزیابی تمام گزینه‌های کاندید هر بار با توجه به یک معیار و تشکیل ماتریس تصمیم روش رویکرد جدید چندشاخصه Topsis Fuzzy استفاده و در نهایت یک منطقه به‌عنوان جواب نهایی انتخاب و معرفی شد. عدم محاسبهٔ ارتباط و تأثیر معیارها بر یکدیگر از نقاط ضعف این پژوهش محسوب می‌شود (Allah Akbari & Jandaghi, 2016). محسن سلیمی و همکاران (۲۰۱۷) در مقاله‌ای به منظور احداث پست، پس از تعیین عوامل محدودیت و عوامل مؤثر در مسئلهٔ مکان‌یابی، به وسیلهٔ ساختار سلسله‌مراتبی مرحله‌ای (Fuzzy_AHP) وزن دهی و مرتب شدند و سپس با استفاده از نظر کارشناسان تعیین و در مکان‌یابی به کار گرفته شد. نقطه‌ضعف این تحقیق محاسبه نشدن فاصله تا پست‌های موجود و معیارهای مرتبط با شبکه توزیع برق است (Salimi et al, 2016)..

هولت و همکاران (۲۰۱۴) مسئلهٔ تعیین محل و ظرفیت پست‌ها را با استفاده از برنامه‌ریزی خطی همراه با الگوریتم حمل‌ونقل بررسی کردند. به‌منظور حل این مسئله در ابتدا ناحیهٔ سرویس‌دهی به قسمت‌های کوچکی تقسیم می‌شود. هریک از بخش‌ها همراه بار مصرفی متناظر به‌عنوان یک گره مصرف تعریف می‌شود. سپس کمترین فاصلهٔ ممکن از هر پست موجود تا هر گره مصرف محاسبه می‌شود. پس از یافتن بارها در هر بخش و کمترین فاصلهٔ بار تا هر پست ممکن، مرزهای سرویس هر پست به‌گونه‌ای به دست می‌آید تا بدون اضافه بار شدن آنها هریک از بخش‌ها به‌صورت اقتصادی سرویس‌دهی شود. اشکال این روش

1. Analytical Hierarchy Process

این است که اگر پست‌ها بار کمی را تغذیه کنند، پاسخ‌ها از نظر اقتصادی مطلوب و بهینه نیست (Holt & Crawford, 2014). امجدی پور (۲۰۱۳) در پایان‌نامهٔ خود به بازنگری فلسفهٔ طراحی و توسعهٔ پست‌های فوق‌توزیع، مدل‌سازی جدیدی برای در نظر گرفتن خروج پست‌های انتخاب‌شده از مدار و ارائهٔ روش حل مناسب برای دستیابی به پاسخ عملی و کاربردی پرداخته است. در این تحقیق ظرفیت استاندارد پست‌ها، محدودیت‌های اندازهٔ ولتاژ نقاط بار، رعایت ساختار شعاعی شبکه و محدودیت قابلیت اطمینان به‌عنوان شاخص‌های مهم در نظر گرفته شده و برای بهینه‌سازی از روش ژنتیک استفاده شده است. از نقاط ضعف این تحقیق نادیده گرفتن موقعیت شبکهٔ ۲۰ کیلوولت و معیارهای فنی شبکه برق قدرت است (Amjadipour, 2013).

غلام کبیر و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای عوامل و زیرمعیارهای اجتماعی، فنّاوری، اقتصادی، محیطی و مکان را به‌منظور مکان‌یابی احداث پست فوق‌توزیع تعیین کرده‌اند تا تصمیم بهینهٔ انتخاب مکان پست برق را واقعی‌تر و مؤثرتر کند. ادغام روش دلفی اصلاح‌شده با فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) مدل استفاده شده است. یک مثال عددی برای نشان دادن کاربرد و عملکرد روش پیشنهادی ارائه شده است که با تجزیه‌وتحلیل حساسیت برای بحث و توضیح نتایج همراه است. نقطه‌ضعف این تحقیق در عدم محاسبهٔ وضعیت شبکهٔ توزیع و استفاده نکردن از معیارهای مرتبط با شبکهٔ توزیع برق است (Golam Kabir & Ahsan Akhtar, 2013). غفاریان (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای با عنوان ایجاد سیستم پشتیبان برای تعیین محل بهینهٔ پست فشارقوی، معیارهای مشخصات الکتریکی، مشخصات زمین، هزینه‌ها، حریم، شرایط زیست‌محیطی و ذی‌نفعان و ۳۸ زیرمعیار برای معیارهای مذکور تعیین کرده است. در این مطالعه برای تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب بهینهٔ محل پست از روش AHP استفاده شده است. استفاده از معیارهای متنوع در این تحقیق اگرچه به معنی در نظر گرفتن عوامل مختلف است، اما این موضوع باعث پیچیدگی بیشتر و احتمال اشتباه و یا عدم اطلاعات درست در برخی از معیارهاست. استفاده از روش AHP و لحاظ نکردن رابطه و تأثیر معیارها بر یکدیگر از موارد ضعف این پژوهش است (Ghafarian & Rahimian, 2014).

وال و همکارانش (۲۰۱۶) مدل توسعه‌یافته‌ای از روش حمل‌ونقل مرکب را برای انتخاب مکان بهینهٔ پست‌ها به کار گرفتند. برای مدل ایشان داده‌های مورد نیاز عبارت‌اند از محل تقاضا و میزان آن. برای توصیف یک تکه از فیدر و توصیف پست و همچنین هزینهٔ انتقال توان روی یک تکه از خط که با تابع خطی مدل شده، به کار گرفته شده است. دادهٔ مورد نیاز برای هر پست موجود، ظرفیت و مکان آن و برای هر پست کاندید، ظرفیت و مکان و هزینهٔ هر پست ثابت است. این روش قادر است در برنامه‌ریزی تعداد، ظرفیت و ناحیهٔ سرویس‌دهی پست‌ها به همراه آرایش فیدرها را مشخص کند. در این تحقیق، تمرکز بر شرایط شبکهٔ فوق‌توزیع بوده و معیارهای شبکهٔ توزیع در محاسبات به کار گرفته نشده است (Wall & Thampson, 2016).

عمده مطالعات انجام‌شده در زمینهٔ تعیین مکان احداث پست ۶۳/۲۰، با محوریت معیارهای شرکت‌های برق منطقه‌ای مانند هزینه‌های اقتصادی و معیارهای محیطی انجام شده است و بیشتر توجهات بر تعیین مکان بهینه برای جایابی پست‌ها از طریق برنامه‌ریزی پست و فیدر، یافتن بهترین طرح فیدرکشی و کاهش هزینه از طریق بهینه‌سازی سطح مقطع هادی متمرکز شده است (Ramirez, 1991; Miranda et al, 1994; Wang et al, 2000; Bahmanpour, 1379). با توجه به اینکه هدف از احداث پست ۶۳/۲۰، رفع کمبود انرژی در بخش توزیع برق است، بنابراین نادیده گرفتن معیارهای مربوط به شرکت‌های توزیع برق، نتایج مطلوبی را در واقعیت نخواهد داشت. در برخی مطالعات انجام‌شده نیز تعدادی از محدودیت‌های فنی شرکت‌های توزیع برق مانند افت ولتاژ، کاهش تلفات و ... استفاده

شده است، اما با توجه به اینکه شبکهٔ توزیع برق از تجهیزات مختلف تشکیل شده است و این تجهیزات و یا تأسیسات مرتبط با آن به‌صورت یک شبکه به یکدیگر متصل‌اند و هر کدام بر دیگری تأثیرگذارند برای دستیابی به نتایج واقعی باید از روشی استفاده کرد که هم معیارهای مؤثر در شرکت‌های توزیع برق استفاده شود و هم تأثیر هر معیار بر دیگری محاسبه و نقش آن در تصمیم‌گیری لحاظ شود.

در پژوهش‌های مورد اشاره، تمرکز بر معیارهای مرتبط با شبکهٔ فوق‌توزیع و هزینه‌های مرتبط با آن است و روش‌هایی که برای تصمیم‌گیری استفاده شده، اغلب از روش AHP است که این روش فاقد امکان محاسبهٔ روابط درونی بین معیارها و تأثیر معیارها بر یکدیگر است. بنابراین وزن تخصیص داده‌شده به معیارهایی که بر یکدیگر مؤثرند صحیح نیست (Soleimani Amiri et al, 2017). نظر به اینکه معیارهای مؤثر در انتخاب محل احداث پست ۶۳/۲۰ کیلوولت با یکدیگر مرتبط و بر هم تأثیرگذارند، به نظر می‌رسد بهتر است از روش ANP که ارتباط بین معیارها را به‌صورت شبکه‌ای تحلیل و وزن‌دهی میکند، استفاده کرد.

با توجه به توضیحات بالا، پژوهش حاضر بر این هدف تدوین شده است که ابتدا معیارهای مؤثر و کاربردی مرتبط با شرکت‌های توزیع برق شناسایی و سپس شرایط مطلوب هر معیار و قواعد استاندارد هر کدام برای مکان‌یابی در محیط GIS تعیین شود. علاوه‌بر تعیین معیارهای اصلی، تأثیر و روابط درونی هر معیار با دیگر معیارها با روش فرایند تحلیل شبکه (ANP)[1] برای تعیین وزن نهایی هر معیار مشخص شد که در هیچ مطالعهٔ مشابهی مشاهده نشده است. به‌منظور محاسبات معیارهای پخش بار و افت ولتاژ، اطلاعات شبکه از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)[2] به فرمت PFD تبدیل و محاسبات آن در نرم‌افزار DigSilent انجام شد و نتایج محاسبات به‌صورت یک محدوده بر روی نقشهٔ رقومی در بستر GIS ایجاد شد.

در بین معیارهای تعیین‌شده، برخی معیارها از نوع کیفی و برخی نیز از نوع کمّی هستند. برای تصمیم‌گیری دقیق در مکان‌یابی پست باید مقادیر پیکسل لایه‌های معیارها یکسان شود تا در شرایط عدم اطمینان، تصمیم‌گیری صحیح صورت پذیرد. برای تحقق این امر از منطق فازی و برای تهیهٔ نقشهٔ نهایی نیز از همپوشانی نقشه‌های فازی با حد آستانه‌های ۰/۷، ۰/۸ و ۰/۹ تابع GAMMA استفاده شد. تعیین حد آستانهٔ بهینهٔ گاما با استفاده از روش محاسبهٔ ضریب همبستگی گاما و محاسبهٔ انحراف معیار برای هر سه مقدار گاما در نرم‌افزار SPSS انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

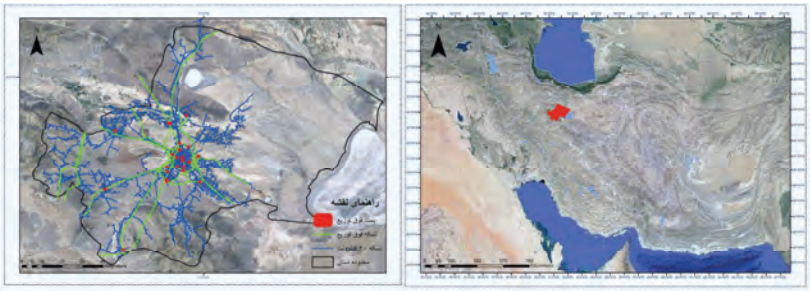
۲-۱- منطقهٔ مورد مطالعه

استان قم با وسعت ۱۱ هزار و ۲۴۰ کیلومتر مربع، بین مدار ۳۴ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۱۵ دقیقهٔ عرض شمالی نسبت به خط استوا و ۵۰ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۰ دقیقهٔ طول شرقی نسبت به نصف‌النهار گرینویچ، در بخش مرکزی ایران قرار دارد. مساحت استان قم ۶/۸ درصد از کل مساحت کشور است. این استان که تقریباً در مرکز ایران قرار دارد، از شمال به استان تهران، از شرق به استان سمنان، از جنوب به استان اصفهان و از غرب و جنوب غربی به استان مرکزی محدود است. استان قم در غرب دریاچهٔ نمک قرار گرفته است.

۲-۲- تعیین معیارها و زیرمعیارها

در این پژوهش به‌منظور تعیین معیارهای مؤثر و کاربردی در انتخاب محل احداث پست و همچنین رعایت استانداردهای شرکت توانیر، ضمن بررسی مطالعات انجام‌شده، پرسش‌نامه‌ای برای امتیازدهی و اولویت‌بندی معیارهای کاربردی طراحی شد و از ۱۰ نفر

1. Analytical Network Process
2. Geographic Information System



شکل ۱. وضعیت شبکهٔ برق و موقعیت جغرافیایی منطقهٔ مورد مطالعه

کارشناسان خبرهٔ شرکت برق منطقه‌ای تهران و شرکت توزیع نیروی برق استان قم نظرسنجی صورت گرفت. در پایان نظرسنجی نظرهای خارج از محدوده حذف شدند و از باقی‌ماندهٔ آنها معدل‌گیری شد. نحوهٔ امتیازدهی به هر کاندید را کارشناسان خبره، طبق پرسش‌نامهٔ ANP انجام داده‌اند. در نتیجه معیارهای کاربردی در قالب سه معیار کلی به نام‌های مشخصات الکتریکی، مشخصات زمین و حریم، تقسیم‌بندی شدند و ۱۳ زیرمعیار که عبارت‌اند از: ثقل بار، پخش بار بهینه، فاصله تا شبکهٔ فوق‌توزیع، افت ولتاژ، فاصله تا پست‌های ۶۳/۲۰ کیلوولت موجود، امکان توسعهٔ میان‌مدت، فاصله تا شبکهٔ ۲۰ کیلوولت، دسترسی به جادهٔ اصلی، سطح آب‌های زیرزمینی، تیپ اراضی، شیب زمین، فاصله از گسل و سیلاب، به‌عنوان شاخص‌های اصلی و مؤثر تعیین شد.

۲-۲-۱- ثقل بار

در محاسبات الکتریکی، مرکز ثقل یا مرکز جرم مکانی است که منبع با حداقل تلفات و افت ولتاژ، مصرف‌کننده‌ها را تغذیه می‌کند. برای محاسبهٔ ثقل بار از روش بلوک‌بندی و روش فیدری استفاده می‌شود (Golestani, 2007)، با توجه به دقت بیشتر روش فیدری مطابق با نظر کارشناسان، در این پژوهش از روش فیدری طبق رابطهٔ (۱) استفاده شده است.

$$M = \frac{\sum_{i=1}^{N}(rf_i \times If_j) < \theta_{fi}}{\sum_{i=1}^{N} If_j} \quad \text{رابطهٔ (۱)}$$

در رابطهٔ (۱) rf_i طول فیدر iام، θ_{fi} زاویه‌ای که فیدر i ام با افق می‌سازد، If_j جریان فیدر iام و N تعداد فیدرها است. نتایج محاسبات نشان می‌دهد ۹ محدوده به‌عنوان ثقل بار در شبکهٔ توزیع برق قم وجود دارد که پس از تعیین مراکز ثقل بار فیدرها با استفاده از رابطهٔ (۱)، نقشهٔ فاصله تا مرکز ثقل بار با استفاده از روش فاصلهٔ اقلیدسی طبق شکل ۲ ایجاد شد. در طبقه‌بندی نقشهٔ رقومی، طبق نظر کارشناسان، فاصله تا ۱۰۰۰ متر ارجحیت خیلی زیاد و ۱۵۰۰ متر ارجحیت زیاد در نظر گرفته شده است. در تهیهٔ نقشهٔ فازی از تابع Small استفاده شده است. انتخاب این معیار مطابق با استاندارد وزارت نیرو است (Deputy of Technical Affairs of the Ministry of Energy, 2016).

۲-۲-۲- پخش بار بهینه

در این زیرمعیار محل پست (کاندید) به‌طوری بررسی می‌شود که شرایط مطلوب‌تری را در نتایج پخش‌بار برای شبکه ایجاد کند. برای این منظور نقشهٔ شبکهٔ توزیع برق در نرم‌افزار DigSilent مدل‌سازی و بررسی شد. وجود توابع تعریف‌شده و یکپارچه‌سازی داده‌ها در این نرم‌افزار، امکان شبیه‌سازی و تحلیل عملکرد سیستم‌های کنترل و قدرت را فراهم می‌کند. در طبقه‌بندی نقشهٔ رقومی، طبق نظر کارشناسان، فاصله تا ۱۰۰۰ متر ارجحیت خیلی زیاد و ۱۵۰۰ متر ارجحیت زیاد در نظر گرفته شده است. برای تهیهٔ نقشهٔ فازی از تابع Small استفاده شد.

۲-۲-۳- دسترسی به شبکهٔ فوق‌توزیع

محل احداث پست، تأثیر مستقیمی بر طول خطوط ورودی و خروجی به پست دارد. هرچه طول خطوط

منتهی به پست‌های ۶۳/۲۰ بیشتر باشد، هزینهٔ اجرا و تلفات بیشتر است (Ghafarian, 2014). در طبقه‌بندی نقشهٔ رقومی، طبق نظر کارشناسان، فاصله تا ۱۰۰۰ متر ارجحیت خیلی زیاد و ۱۵۰۰ متر ارجحیت زیاد در نظر گرفته شده است. برای تهیهٔ نقشهٔ فازی از تابع Small استفاده شد. انتخاب این معیار مطابق با استاندارد وزارت نیرو است (دستورالعمل انتخاب محل پست ۶۳/۲۰، ۱۳۸۶).

۲-۲-۴- افت ولتاژ

طبق استاندارد IEEE 1159-1995، افت ولتاژ به‌صورت کاهش در مقدار مؤثر ولتاژ از ۱۰٪ تا ۹۰٪ مقدار نامی، در طول مدت ۰/۵ سیکل تا ۱ دقیقه تعریف می‌شود (Boonchiam, 2006). با استفاده از اطلاعات ترانس‌ها و بار هر فیدر در GIS، اطلاعات مذکور به نرم‌افزار DigSilent منتقل شد و با انجام تحلیل‌های مربوطه، شبکه‌هایی که دارای افت ولتاژ بودند مشخص شد. خروجی از نرم‌افزار DigSilent به این صورت است که بخش‌هایی از شبکه که دارای ضعف ولتاژ هستند مشخص می‌شود و سپس خطوط شبکه به نرم‌افزار Arc GIS وارد و نقشهٔ رقومی آن با استفاده از روش فاصلهٔ اقلیدسی ایجاد می‌شود. در طبقه‌بندی نقشهٔ رقومی، طبق نظر کارشناسان، فاصله تا ۱۰۰۰ متر ارجحیت خیلی زیاد و ۱۵۰۰ متر ارجحیت زیاد در نظر گرفته شده است. برای تهیهٔ نقشهٔ فازی از تابع Small استفاده شده است.

۲-۲-۵- فاصله از پست‌های ۶۳/۲۰

در صورتی جایابی پست، بهینه است که فاصلهٔ قابل تعریفی تا پست‌های ۶۳/۲۰ کیلوولت موجود داشته باشد. درصورتی‌که فاصله بسیار نزدیک باشد نیاز به احداث پست جدید نیست و پست‌های فعلی باید توسعه داده شوند. در طبقه‌بندی نقشهٔ رقومی، طبق نظر کارشناسان، فاصله نسبت به پست‌های ۶۳/۲۰ کیلوولت موجود تا ۱۰۰۰۰ متر ارجحیت خیلی ضعیف، از ۱۰۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ متر ارجحیت زیاد و ۱۵۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ متر ارجحیت خیلی زیاد در نظر گرفته شده است. در تهیهٔ نقشهٔ فازی از تابع Large استفاده شده است.

۲-۲-۶- توسعهٔ میان‌مدت

عامل زمان، عاملی تأثیرگذار در روند طراحی و توسعهٔ سیستم‌های توزیع است و معمولاً با گذشت زمان، کاهش و یا افزایش بار در منطقهٔ مورد نظر امری اجتناب‌ناپذیر است. ازاین‌رو، توسعهٔ بافت شهری و افزایش درخواست انرژی، معیار بسیار مهمی در مکان‌یابی و محل احداث پست محسوب می‌شود (Amjadipour, 2013). محدودهٔ توسعه در سطح استان براساس درخواست و مصرف انرژی و توسعه‌های آتی استان شناسایی و نقشهٔ پهنه‌بندی آن ایجاد شد. برای رتبه‌بندی نقشهٔ رقومی، فاصله تا ۱۰۰۰ متر ارجحیت خیلی زیاد و ۲۰۰۰ متر ارجحیت زیاد در نظر گرفته شده است. در تهیهٔ نقشهٔ فازی از تابع Small استفاده شده است.

۲-۲-۷- فاصله تا شبکهٔ ۲۰ کیلوولت

مکان احداث پست هرچه به شبکهٔ ۲۰ کیلوولت دسترسی بهتری داشته باشد فیدرهای خروجی پست طول کوتاه‌تری خواهند داشت و در نتیجه پخش بار بهینه و افت ولتاژ کمتری در شبکه ایجاد می‌شود (Ghafarian, 2014). در طبقه‌بندی نقشهٔ رقومی، طبق نظر کارشناسان، فاصله تا ۱۰۰۰ متر ارجحیت خیلی زیاد و ۲۰۰۰ متر ارجحیت زیاد در نظر گرفته شده است. برای تهیهٔ نقشهٔ فازی از تابع Small استفاده شد. انتخاب این معیار مطابق با استاندارد شرکت برق منطقه‌ای تهران است (Office of Organization and Improvement of Methods of Tehran Regional Electricity Company, 2016).

۲-۲-۸- دسترسی به جادهٔ اصلی

مکان احداث پست هرچه به جادهٔ اصلی نزدیک‌تر باشد سرویس‌دهی و بهره‌برداری از پست با سهولت بیشتری انجام خواهد شد. حریم جادهٔ اصلی عبارت است از

زمین‌های واقع بین حد نهایی بدنهٔ راه تا فاصلهٔ ۲۲/۵ متر از محور راه در هر طرف به قسمی که مجموع عرضی بدنهٔ راه و حریم طرفین آن ۴۵ متر شود (Country Planning and Budget Organization, 2021). در طبقه‌بندی نقشهٔ رقومی، فاصلهٔ ۲۳ متر که حریم جاده محسوب می‌شود ارجحیت خیلی ضعیف، از ۲۳ تا ۵۰۰ متر ارجحیت خیلی زیاد و از ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ متر ارجحیت زیاد در نظر گرفته شده است. در تهیهٔ نقشهٔ فازی از تابع Small استفاده شد. انتخاب این معیار مطابق با استاندارد وزارت نیرو است (دستورالعمل انتخاب محل پست ۶۳/۲۰، ۱۳۸۶).

۲-۲-۹- آب‌های زیرزمینی

سطح آب‌های زیرزمینی که باید با توجه به مطالعات هیدرولوژی و همچنین سوابق آماری موجود تعیین شود، در طراحی و تدوین نوع و حجم فونداسیون‌ها مؤثر است. بالا بودن سطح آب‌های زیرزمینی، طراحی عملیات ساختمانی را به‌سوی استفاده از سیستم‌هایی که هزینهٔ بالایی دربردارد هدایت خواهد کرد (دستورالعمل انتخاب محل پست ۶۳/۲۰، ۱۳۸۶) و همچنین باعث پر شدن محل حفاری فونداسیون پست می‌شود و یا بر فونداسیون ساخته‌شده اثرات مخربی وارد می‌کند (Ghafarian, 2014). برای احداث ساختمان پست، حدود ۲.۵ متر حفاری انجام می‌شود (Ministry of Roads and Urban Development, 2013). به‌منظور حصول اطمینان از خطرات آب‌های زیرزمینی و براساس نظر کارشناسان مربوطه، مناطق دارای عمق کمتر از ۵ متر بر روی نقشهٔ رقومی استان مشخص شدند و ۲۰۰ متر حریم برای محدوده‌ها در نظر گرفته شد. در تهیهٔ نقشهٔ فازی از تابع Large استفاده شده است.

۲-۲-۱۰- تیپ اراضی

در انتخاب محل احداث پست، موضوع توپوگرافی محدودهٔ مورد مطالعه باید بررسی و زمین انتخاب‌شده نیز باید از نظر مکانیک خاک بررسی شود (دستورالعمل انتخاب محل پست ۶۳/۲۰، ۱۳۸۶). با توجه به لزوم ورود و خروج تعداد بالای خطوط به پست، کاربری زمین بایر و کشاورزی در اطراف پست برای وجود امکان اجرای خطوط مناسب است و همچنین با توجه به تراکم جمعیت و بیشترین مصرف، مناطق مسکونی و صنعتی در نزدیکی محل پست ارجحیت بیشتری دارند (Ghafarian, 2014). در تهیهٔ نقشهٔ رقومی، محدوده‌ها براساس نوع کاربری تقسیم‌بندی شدند. محدوده‌هایی که شامل مناطق کوهستانی، تپه و دشت‌های سیلابی بودند کمترین ارزش به آنها اختصاص داده شد. در تهیهٔ نقشهٔ فازی از تابع Small استفاده شده است.

۲-۲-۱۱- شیب

مسطح بودن زمینی که برای احداث پست در نظر گرفته می‌شود اهمیت خاصی دارد، زیرا حجم عملیات خاکبرداری یا خاکریزی هزینه بالایی را در پی خواهد داشت و ازطرفی، یک زمین نامناسب و شیب‌دار می‌تواند باعث احداث پست به‌صورت پله‌ای یا شیب‌دار شده و از نظر اجرای کانال‌های کابل، جاده‌های دسترسی، هم‌ارتفاع بودن سازه‌ها، دسترسی به تجهیزات، نیروی وارد بر ترمینال‌های تجهیزات و اتصالات، مشکلاتی را ایجاد کند (دستورالعمل انتخاب محل پست ۶۳/۲۰، ۱۳۸۶). از نظر قوانین راه و شهرسازی، شیب محدودهٔ هموار (دشت) حداکثر ۳ درصد، محدودهٔ تپهٔ ماهوری دارای ۳ تا ۷ درصد و محدودهٔ مناطق کوهستانی بیش از ۷ درصد تعریف می‌شود (President's Office of Planning and Strategic Supervision, 2013). در این پروژه طبق نظر کارشناسان، مناسب‌ترین شیب برای احداث ساختمان پست، شیب ۱ تا ۵ درصد و حداکثر تا شیب ۱۵درصد در نظر گرفته شده است. در تهیهٔ نقشهٔ فازی از تابع Gaussian استفاده شده است.

۲-۲-۱۲- گسل

احداث ساختمان‌های با درجهٔ اهمیت بسیار بالا بر روی پهنه‌ها و حریم گسل‌ها ممنوع است. ساختمان‌های

نیروگاه‌ها و تأسیسات برق‌رسانی به‌عنوان ساختمان‌های درجهٔ اهمیت بالا تعریف شده‌اند (Standard 2800, 2014). برای انتخاب محل زمین پست، عامل زمین‌لرزه و نحوهٔ تأثیر آن باید منظور شود، زیرا هرچه احتمال وقوع زلزله با درجات بالاتر بیشتر باشد لازم است که طراحی فونداسیون‌ها و تأسیسات طوری باشد که مقاومت لازم را در مقابل اثرات زمین‌لرزه داشته باشند که بالطبع هزینهٔ بیشتری را بر سرمایه‌گذاری اولیه تحمیل می‌کند. لذا به‌منظور تقلیل این هزینه‌های اضافی مناسب است که محل پست تا حد امکان از خطوط گسلی و مناطق آبرفتی به دور بوده و تا حد امکان در محل مناسب‌تری انتخاب شود (دستورالعمل انتخاب محل پست ۶۳/۲۰، ۱۳۸۶). در بررسی این معیار، فاصله تا ۵۰۰ متر از گسل‌ها به‌عنوان ارجحیت خیلی ضعیف در نظر گرفته شد. در تهیهٔ نقشهٔ فازی از تابع Large استفاده شده است.

۲-۲-۱۳- سیلاب

برای بررسی مسیرهای سیلاب‌های منطقه‌ای می‌توان از اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی و تعیین مقدار بارش حداکثر، تحقیقات محلی از افراد مطلع بومی در مورد میزان و مسیر سیلاب‌های قبلی، بازدید از محل و بررسی وضعیت آبراهه‌ها بهره گرفت (دستورالعمل انتخاب محل پست ۶۳/۲۰، ۱۳۸۶). حریم انهار طبیعی، رودخانه‌ها مسیل‌ها (اعم از اینکه آب دائم یا فصلی داشته باشند) ۲۰ متر است (Research Center of the Islamic Council, 2000). با توجه به اینکه مکان مورد نظر برای احداث پست نباید در مناطق سیلاب باشد، از محدودهٔ سیلاب تا ۲۰ متر به‌عنوان حریم در نظر گرفته شد. در تهیهٔ نقشهٔ فازی از تابع Large استفاده شده است.

۲-۳- داده‌ها و لایه‌های مورد استفاده

داده‌های اولیهٔ مورد نیاز مربوط به معیارها برای این پژوهش از ادارات منابع طبیعی، شهرداری، سازمان برنامه و بودجه، راهداری، و استانداری قم جمع‌آوری شد. با توجه به تنوع فرمت‌های اطلاعات دریافت‌شده، برای یکسان‌سازی فرمت لایه‌ها، ابتدا نقشه‌های رقومی هر لایهٔ اطلاعاتی تولید و سپس به‌منظور امکان محاسبات و تلفیق لایه‌ها با یکدیگر، تمامی لایه‌ها به فرمت رستر تبدیل شد. در تبدیل لایه‌های اطلاعاتی به فرمت رستر باید اندازهٔ پیکسل‌ها با هم برابر باشند. براساس پژوهشی که سازمان نقشه‌برداری کشور انجام داده، اندازهٔ پیکسل ۵ تا ۱۰ متر در نقشه دارای دقت کافی و کمترین جابه‌جایی کمّی هستند (Ashourlou et al, 1978)، بنابراین در فرایند ایجاد لایه، پیکسل‌های همه لایه‌های اطلاعاتی با اندازه ۱۰ متر ایجاد گردید. برای مشخص کردن حوزه مورد مطالعه، نقشه محدوده حوزه مطالعه تهیه گردید و تمامی نقشه‌های مورد استفاده براساس محدودهٔ تعیین‌شده، برش داده شد. در تبدیل لایه‌ها به فرمت رستر، نقشهٔ معیارهای کمّی با روش فاصلهٔ اقلیدسی و نقشهٔ معیارهای کیفی با روش طبقه‌بندی ایجاد شد. نظر به اینکه مکان‌یابی پست ۶۳/۲۰ کیلوولت تحت تأثیر عوامل بسیاری قرار دارد و این عوامل قطعی و صددرصدی نیستند، بنابراین بهتر است در مطالعهٔ چنین پدیده‌هایی، به‌جای استفاده از مدل بولین از مدل فازی بهره گرفت. در این پژوهش نیز، منطق فازی برای طراحی و مدل‌سازی مکان‌یابی پست با استفاده از مقادیر و شرایط زبانی و دانش فرد خبره با هدف ساده‌سازی و کارآمدتر شدن طراحی استفاده شده است.

۲-۴- فرایند تحلیل شبکه (ANP)

مدل ANP روش گسترش‌یافته شبکهٔ AHP است که برای روابط درونی بین سطوح تصمیم‌گیری اهمیت قائل می‌شود. هدف آن ساختارمندانه کردن فرایند تصمیم‌گیری با توجه به سناریوی متأثر از عوامل چندگانهٔ مستقل از هم است (Momeni, 2013). این مدل، تحلیل شبکه را جایگزین تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) کرده است (Ebrahimzadeh et al, 2014).

مزیت اصلی روش مذکور این است که سنجش سنجه‌های مختلف براساس روابط آنها و نه سلسله‌مراتب انجام می‌شود و با توجه به پیچیدگی مسائل مختلف، ANP می‌تواند نتایج بهتری به‌دنبال داشته باشد (Faraji Sabokbar et al, 2017). به همین دلیل ANP در سال‌های اخیر به‌عنوان مدلی بدون نقص در حل مسائل تصمیم‌گیری مانند رتبه‌بندی استفاده شده است. این روش قادر است همبستگی‌ها و بازخوردهای موجود بین عناصر مؤثر در یک تصمیم‌گیری را الگوسازی کرده، تمامی تأثیرات درونی اجزای مؤثر در تصمیم‌گیری را منظور و وارد محاسبات کند. رکن اصلی در تعیین ضرایب اهمیت معیارها و مؤلفه‌ها در درون یک یا چند ماتریس دودویی (و در یک بازهٔ امتیازدهی ۱ تا ۹) است (Ebrahimzadeh et al, 2014).

مدل ANP دارای چهار مرحلهٔ اصلی است (Lami, 2014). مرحلهٔ اول، تجزیهٔ مسئلهٔ مورد بررسی به‌صورت یک سیستم منطقی یک شبکه و ساختن مدل: در این مرحله، پس از تعیین هدف تصمیم‌گیری و معیارهای مؤثر بر آن، باید یک مدل شبکه‌ای تشکیل شود. این مدل شامل هدف، معیار، زیرمعیار و ارتباطات درونی و بیرونی بین معیارهاست. مرحلهٔ دوم ایجاد ماتریس‌های مقایسهٔ زوجی و بردارهای اولویت: در این بخش طبق رابطهٔ (۲)، بردار اهمیت داخلی محاسبه می‌شود که بیانگر اهمیت نسبی عناصر یا خوشه‌هاست.

$$AW = \lambda_{Max} W \qquad \text{رابطهٔ (۲)}$$

در این رابطه، A ماتریس مقایسهٔ دودویی معیارها، W بردار ویژه (ضریب اهمیت) و λ_{Max} بزرگ‌ترین مقدار ویژه عددی است. مرحلهٔ سوم، تشکیل سوپرماتریس (ماتریس تصمیم): یک سوپرماتریس روابط موجود در ساختار شبکه‌ای و نیز وزن‌های نسبی محاسبه‌شده در مرحلهٔ دوم را ارائه می‌دهد. در واقع از اجتماع همهٔ بردارهای اولویت محاسبه‌شده برای تک‌تک ماتریس‌های مقایسهٔ زوجی در یک ماتریس، سوپرماتریس به دست می‌آید.

$$W_n = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ W_{21} & 0 & 0 \\ 0 & W_{32} & I \end{bmatrix} \qquad \text{رابطهٔ (۳)}$$

در این سوپرماتریس، W_{21} وزن معیارهای اصلی براساس هدف است که اثر هدف را در معیارها مشخص می‌کند، W_{32} وزن معیارها در خوشه مرتبط با خود است که تأثیر معیارها را در گزینه‌ها نشان می‌دهد و I نیز ماتریس واحد است. مرحلهٔ چهارم، محاسبهٔ بردار وزن نهایی: این مرحله آخرین مرحله در مدل ANP است که در آن با تشکیل سوپرماتریس حد بردار، وزن نهایی معیارها و زیرمعیارها به دست می‌آید.

تحلیل شبکه دارای انواع مختلف است: شبکهٔ ساده، شبکهٔ دولایه و شبکهٔ پیچیده. در این پژوهش یک مدل شبکه‌ای سه‌لایه متشکل از لایهٔ هدف، لایهٔ معیارها و لایهٔ زیرمعیارها با توجه به مسئلهٔ پژوهش، طراحی و سازماندهی شد.

۲-۵- مدل منطق فازی

نظریهٔ منطق فازی به‌عنوان روش دانش‌محوری که در آن وزن‌دهی به لایه‌های اکتشافی بر مبنای اهمیت هریک از لایه‌ها براساس قضاوت کارشناسان متخصص صورت می‌پذیرد، پیشنهاد شده است. مبنای این روش به‌صورت تبدیل داده‌های ورودی به خروجی‌های نرمال‌شده با محاسبهٔ اوزان برای عضوهای فازی براساس نظریهٔ مجموعهٔ فازی است. مقادیر عضو فازی برای هریک از پیکسل‌های لایه‌های اکتشافی به‌صورت مقادیر پیوسته در دامنهٔ صفر تا یک است. در نظریهٔ منطق فازی عضوهای فازی براساس فواصل معنادار از ویژگی‌های مختلف وزن‌دهی می‌شوند که برای هر پیکسل یا موقعیت فضایی، یک وزن به‌خصوص بین صفر تا یک اختصاص داده می‌شود (Zhang, 2017). اگر تمام پارامترهای مسئله به‌صورت مجموعه‌های فازی با مقادیر صحیح تعریف شوند، می‌توان برای تلفیق پارامترها از روش‌های عضویت‌دهی فازی استفاده کرد. نوع روش عضویت‌دهی نیز به نحوهٔ تأثیرپذیری عوامل مختلف از یکدیگر و یا اثر نهایی روش عضویت‌دهی فازی روی مجموعه پارامترها بستگی دارد. اثر برخی روش‌های عضویت‌دهی فازی، افزایشی و برخی کاهشی

است، یعنی درجهٔ عضویت نهایی هر پیکسل را بسیار کاهش یا افزایش می‌دهد (Saadi Mesgari et al, 2015). عملیات فازی‌سازی در GIS با هدف نرمال‌سازی داده‌ها در مسیری که بر هدف نهایی پروژه تأثیر می‌گذارد با استفاده از توابع (Linear، Gaussian، Small، Large و Near) صورت می‌گیرد (Malczewski, 1999). در این پژوهش برحسب نوع معیار و لایهٔ اطلاعاتی، از تابع مرتبط استفاده شده است.

۲-۶- عملگرهای فازی

عملگرهای فازی همان عملگرهایی هستند که بر روی شاخص‌ها یا پارامترهای مورد نظر اعمال می‌شوند. در این تحقیق عملگرهای فازی بر روی پارامترهای ژئومورفولوژی اجرا می‌شوند. این پارامترها را در ابتدا به‌صورت توابع عضویتی فازی مشخص می‌کنیم. با داشتن این توابع می‌توان توسط شبکهٔ استنتاج فازی آن‌ها را با هم ترکیب کرد (Hosseini, 2013). شبکهٔ استنتاج فازی با استفاده از عملگرهایی مانند اشتراک[1] فازی، اجتماع[2] فازی، جمع[3] فازی، ضرب[4] فازی، گامای[5] فازی برای تلفیق مجموعه عامل‌ها استفاده می‌شوند (Shoja Iraqi et al, 2013). عملگر اشتراک فازی در یک موقعیت مشخص، حداقل درجهٔ عضویت واحدهای پیکسلی را استخراج و در نقشهٔ نهایی منظور می‌کند. در مواقعی که باید دو یا چند عامل با هم برای اثبات یک فرضیه وجود داشته باشند از این عملگر استفاده می‌شود. عملگر اجتماع فازی حداکثر درجهٔ عضویت واحدهای پیکسل در یک موقعیت مشخص در عامل‌های مختلف را استخراج می‌کند. در مواردی که شاخص‌های مکان‌یابی کمیاب است و وجود عامل‌های مثبت برای اظهار مطلوبیت کافی است از این عملگر استفاده می‌شود. با استفاده از عملگر جمع فازی مقادیر عضویت فازی در نقشهٔ خروجی بزرگ می‌شوند و به‌سمت ۱ میل می‌کنند. این عملگر در مواقعی کاربرد دارد که چند قسمت از شواهد و فاکتورها یکدیگر را تقویت می‌کنند. با استفاده از عملگر ضرب فازی مقادیر عضویت فازی در نقشهٔ خروجی کوچک می‌شوند و به‌سمت صفر میل می‌کنند. در این عملگر تمامی مقادیر عضویت نقشه‌های ورودی، در نقشهٔ خروجی تأثیر می‌گذارند. از این عمگر در مواردی استفاده می‌شود که فاکتورها یکدیگر را تضعیف می‌کنند. عملگر فازی گاما حالتی کلی از عملگرهای ضرب و جمع فازی است که از رابطهٔ (۴) به دست می‌آید:

$$\mu_{Combination} = (Fuzzy\ Algebraic\ Sum \times Fuzzy\ Algebraic\ Product)^{1-\gamma}$$

رابطهٔ (۴)

در رابطهٔ (۴) $\mu_{\text{Combination}}$ لایهٔ حاصل از گامای فازی و γ پارامتر تعیین‌شده در محدودهٔ صفر و یک است. وقتی γ برابر با ۱ باشد ترکیبی که اعمال می‌شود، همان جمع جبری فازی و زمانی که γ برابر صفر باشد ترکیب، برابر ضرب جبری فازی است (Maleki et al, 2016). انتخاب صحیح γ مقادیری در خروجی ایجاد می‌کند که با اثر افزایشی جمع جبری و اثر کاهشی ضرب جبری فازی سازگاری دارد. به‌عبارتی مقادیر پیکسل‌ها که نشان‌دهندهٔ محدودهٔ مناسب برای احداث پست ۶۳/۲۰ کیلوولت هستند، در لایهٔ حاصل از گامای فازی به انتخاب صحیح توان گاما بستگی دارند. مقادیری که γ می‌تواند اختیار کند از صفر تا یک است که معمولاً از ۰.۵ تا ۰.۹ برای آن در نظر گرفته می‌شود. مقادیر γ کوچک‌تر به عملگر ضرب فازی و γ بزرگ‌تر به عملگر جمع فازی نزدیک می‌شود.

۲-۷- ضریب همبستگی گاما

همبستگی به مفهوم ارتباط میان دو یا چند کمیت با یکدیگر است و ضریب همبستگی مقدار عددی این ارتباط را بیان می‌کند. هر چقدر قدر مطلق ضریب همبستگی به عدد یک نزدیک‌تر باشد (در جهت مثبت

1. AND
2. OR
3. SUM
4. PRODUCT
5. GAMMA

یـا در جهـت منفـی) ارتبـاط بـین کمیـت‌هـا بیشـتر و کامل‌تر است. وقتی اندازهٔ عددی ضریب همبسـتگی بـه مقادیر مثبت یک نزدیک است به‌معنـای وجـود ارتبـاط قوی و مستقیم است، به‌نحوی که افزایش یـک کمیـت، افزایش کمیت دیگر را در پی دارد و یا کاهش آن سبب کاهش کمیت دیگر می‌شود. به همین ترتیب اندازهٔ عـددی ضریب همبستگی نزدیک به مقادیر منفـی یـک بـه‌معنـای وجود یک ارتباط قوی و وارون است که اندازه‌هـای عـددی دو کمیـت در جهـت عکـس یکـدیگر رفتـار مـی‌کننـد. اندازه‌های عددی نزدیک به صـفر نیـز بـدان معناسـت کـه تغییرات یک کمیت، اطلاع کمی دربـارهٔ تغییـرات کمیـت دیگـر در اختیـار مـی‌گـذارد. ضـریب همبسـتگی گامـا در مواردی استفاده می‌شود که داده‌ها براساس جداول تـوافقی تعریف شده باشند (Gudarzi, 2018). در این پژوهش علت استفاده از ضریب همبستگی گاما اثبات صحت ارتباط و مقایسهٔ تأثیرات مقادیر حد آستانه‌های عملگـر گامـا بـا محـدوده‌هـای پـنج‌گانـه طبقـه‌بنـدی شـده اسـت. درصورتی‌که نتایج ضریب همبستگی گاما مثبـت باشـد به معنی وجود ارتباط معنادار بین مقدار حد آستانه‌های عملگر گاما و محدوده‌های پنج‌گانـه طبقـه‌بنـدی شـده است و بر اساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان بهینه‌تـرین مقدار گاما را مشخص کرد.

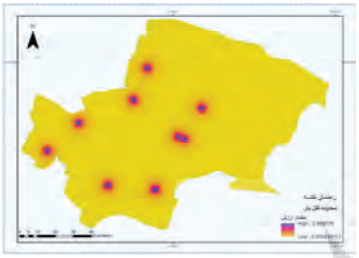
۳- نتایج

پس از تعیین عوامل و معیارهای مؤثر در تعیـین محـل احداث پست، نقشه‌های رقومی مرتبط به هـر زیرمعیـار تهیه شد. نقشه‌هـای اطلاعـاتی در دو مرحلـه پـردازش لایه‌ها و وزن‌دهی به لایه‌ها تهیه شده است.

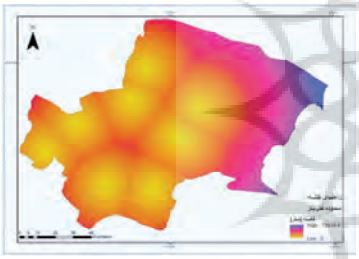
پردازش داده‌ها بـا اسـتفاده از پـردازش داده‌ای GIS مانند تبدیل ساختار برداری به ساختار رسـتری، ترکیـب چندلایـه بـه‌صـورت یـک لایـه، تهیـهٔ نقشـهٔ آنـالیز و طبقه‌بندی مجدد استفاده شده است. با توجه بـه تفـاوت نوع لایه‌های اطلاعاتی، نیاز اسـت لایـه‌هـایی کـه از نـوع پلیگون[1]، خطی[2] و یـا نقطـه‌ای[3] هسـتند بـه نقشـه‌هـای رستری تبدیل شوند که برای این منظـور از تـابع فاصـلهٔ اقلیدسـی[4] اسـتفاده شـده اسـت. در تبـدیل لایـه‌هـا بـه نقشه‌های رستری، نقشه‌ها هم‌مقیاس شـده و انـدازهٔ هـر پیکسـل ۱۰ متـر در نظـر گرفتـه شـده اسـت. در روش مکان‌یابی فازی این نکته حائز اهمیـت اسـت کـه تمـامی معیارهای مورد اسـتفاده در مکـان‌یـابی، بایـد بـه نقشـهٔ رستری تبدیل شوند و به‌دلیل اینکـه هریـک از نقشـه‌هـا دارای واحـد مختلفـی هسـتند، نیـاز اسـت بـا روش عضویت‌دهی فـازی هـم‌مقیـاس شـوند. بنـابراین تمـامی مقادیر پیکسل‌ها بین ۰ و ۱ تغییر می‌کنند. در ایـن روش مناطقی که دارای یاختـه‌هـا (پیکسـل‌هـای) بـا ارزش ۱ هستند کاملاً عضو مجموعه خواهند بود. اما منـاطقی کـه دارای یاخته‌های با ارزش ۰ هستند، از عضویت مجموعـه خارج می‌شوند. در شکل ۲ تعداد ۹ مکان بـه‌عنـوان ثقـل بار شبکهٔ توزیع برق تعیین و نقشهٔ فاصلهٔ اقلیدسی از این نقاط ایجاد شده است. بـرای محاسـبهٔ معیـار پخـش بـار بهینه، شبکهٔ توزیع برق در نرم‌افزار Digsilent تحلیل شد و سه مکان بهینه برای پخـش بـار مشـخص شـد. نقشـهٔ فاصلهٔ اقلیدسی از این مکان‌ها طبق شـکل ۴ ایجـاد شـد. نتایج بررسی نشان می‌دهد یک مکان در مرکز و دو مکان در محدودهٔ جنوبی استان قم بهترین نقاط از نظـر پخـش بار در سطح استان هستند. بـرای محاسـبهٔ معیـار شـبکهٔ فوق‌توزیع، پس از تهیهٔ نقشهٔ رقومی شبکهٔ فوق‌توزیـع در بستر GIS، نقشهٔ فاصلهٔ اقلیدسی از شبکه طبـق شـکل ۶ تهیه شـد. بـرای محاسـبهٔ معیـار افـت ولتـاژ، بـا تحلیـل وضـعیت موجـود شـبکهٔ توزیـع در نـرم‌افـزار Digsilent، شبکه‌هـایی مشـخص شـد کـه دارای افـت ولتـاژ بودنـد. رقومی‌سازی شبکه دارای ضعف ولتاژ در بستر GIS انجام شد و نقشهٔ فاصلهٔ اقلیدسی از این شبکه‌ها طبق شـکل ۸ ایجاد شد. تعیین شبکه دارای افـت ولتـاژ بـر روی نقشـه

1. Polygon
2. PolyLine
3. Point
4. Euclidean Distance

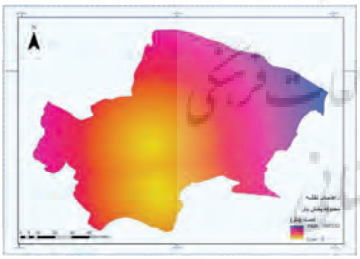
نشان می‌دهد در محدودهٔ شهری افت ولتاژ وجود نـدارد و شبکه‌هایی که تا مناطق حاشیه‌ای استان امتداد داشته‌اند بـه‌دلیـل طـول زیـاد شـبکه، دارای افـت ولتاژنـد. بـرای محاسبهٔ معیار پست فوق‌توزیع، موقعیت مکانی پست‌های موجود در بستر GIS تهیه شد. طبق شکل ۱۰، در سطح استان قم تعداد ۲۲ پست ۶۳/۲۰ کیلوولت وجود دارد که تعداد ۱۹ پست در محدودهٔ مرکزی استان و ۳ پست نیـز به‌سمت غرب استان هستند. نقشـهٔ فـازی از پسـت‌هـای موجود طبق شکل ۱۱ نشان می‌دهد با توجـه بـه وجـود شبکه، منطقهٔ جنوبی و غربی اسـتان، پتانسـیل مناسـبی برای احداث پست دارند. برای معیار توسـعهٔ میـان‌مـدت، نقشهٔ فاصله از محدوده‌های توسعهٔ شهری طبق نقشهٔ ۱۲ ایجاد شـد. نقشـهٔ فـازی شـکل ۱۳ مؤیـد آن اسـت کـه محـدوده‌هـایی در جنـوب و غـرب اسـتان مسـتعدترین محدوده‌ها از نظر توسعه هستند. معیـار فاصـله از شـبکهٔ ۲۰ کیلوولت با تهیهٔ نقشهٔ فاصلهٔ اقلیدسـی از شـبکهٔ ۲۰ کیلوولت در بستر GIS طبق شکل ۱۴ تهیـه شـد. بـرای محاسـبهٔ معیـار فاصـله از جـادهٔ اصـلی، نقشـهٔ رقـومی جاده‌های اصلی تهیه و نقشـهٔ فاصـلهٔ اقلیدسـی از آکـس جاده طبق شکل ۱۶ ایجاد شد. برای محاسبهٔ حریم‌هـای جاده و تعیین ارجحیت فاصله تا جادهٔ اصلی نقشـهٔ فـازی طبق شکل ۱۷ تهیه شد. معیار سطح آب‌های زیرزمینـی با تهیهٔ موقعیت مکانی محدوده‌هـای کمتـر از ۵ متـر بـر روی نقشه مشخص شد و برای محاسـبهٔ حـریم‌هـای آن نقشهٔ فاصلهٔ اقلیدسی طبق شـکل ۱۸ تهیـه و ارجحیـت نقاط فاصله تا محدوده‌های مشخص‌شده در نقشـهٔ فـازی طبق شکل ۱۹ ایجاد شد. معیار تیپ اراضـی کـه از نـوع کیفـی اسـت بـا روش طبقـه‌بنـدی طبـق شـکل ۲۰ و ارجحیت هر نقطه با استفاده از روش فازی مطابق شـکل ۲۱ ایجـاد شـد. بـرای محاسـبهٔ معیـار شـیب، نقشـهٔ طبقه‌بندی مقادیر شیب مطابق با اسـتانداردهای موجـود طبق شکل ۲۲ ایجاد شد و ارجحیـت‌هـای هـر نقطـه بـا روش فـازی مطـابق شـکل ۲۳ مشـخص شـدند. بـرای محاسبهٔ معیـار گسـل، منـاطق گسـل در سـطح اسـتان مشخص شدند و نقشهٔ فاصـله از گسـل طبـق شـکل ۲۴ ایجاد شد. به‌منظور رعایت حریم گسل‌ها نقشهٔ ارجحیـت نقاط نسبت به محدودهٔ گسل‌ها با روش فازی طبق شکل ۲۵ ایجاد شـد. بـرای محاسـبهٔ معیـار سـیلاب، موقعیـت مسیر سیلاب بر روی نقشـه مشـخص و نقشـهٔ فاصـله از مسیر سیلاب مطابق نقشـه ۲۶ ایجـاد شـد. بـرای لحـاظ کردن حریم و ارجحیت دادن به نقاط نسبت به فاصله تـا سیلاب، نقشهٔ فازی سیلاب طبق شکل ۲۷ ایجاد شد.



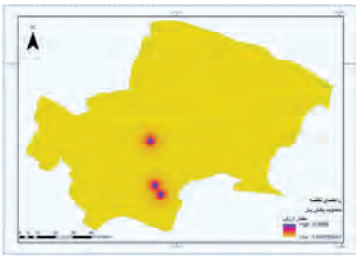
شکل ۲. فاصله از ثقل بار



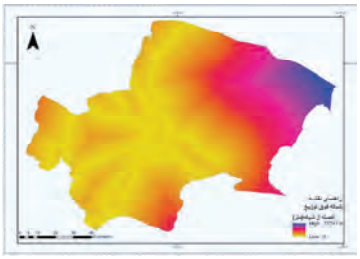
شکل ۳. نقشهٔ فازی ثقل بار



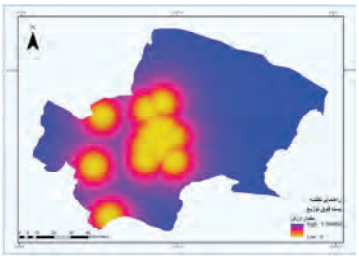
شکل ۴. پخش بار بهینه



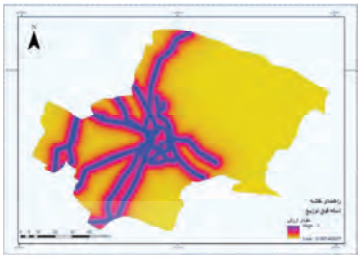
شکل ۵. فازی‌سازی پخش بار بهینه



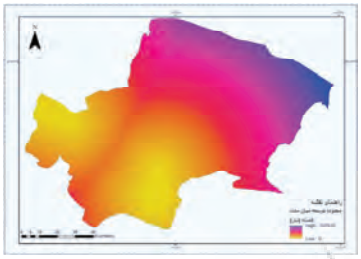
شکل ۶. فاصله از شبکهٔ فوق‌توزیع



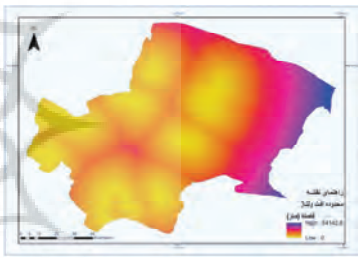
شکل ۱۱. نقشهٔ فازی پست‌های فوق‌توزیع



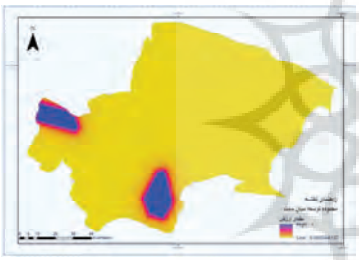
شکل ۷. نقشهٔ فازی شبکهٔ فوق‌توزیع



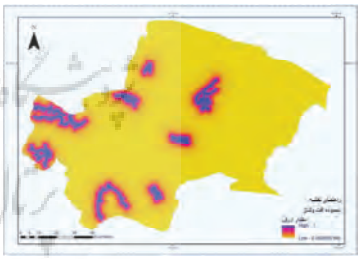
شکل ۱۲. فاصله از محدوده توسعهٔ میان‌مدت



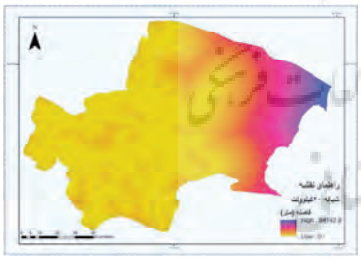
شکل ۸. فاصله از محدودهٔ افت ولتاژ



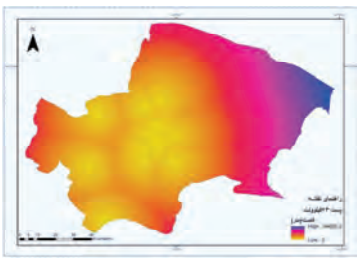
شکل ۱۳. نقشهٔ فازی محدودهٔ توسعهٔ میان‌مدت



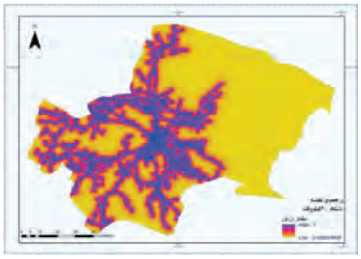
شکل ۹. نقشهٔ فازی محدودهٔ افت ولتاژ



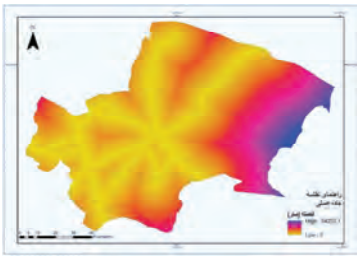
شکل ۱۴. فاصله از شبکهٔ ۲۰کیلوولت



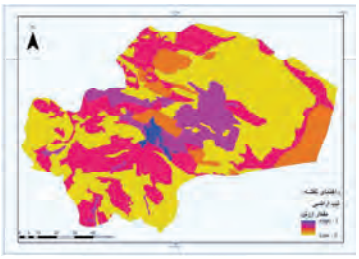
شکل ۱۰. فاصله از پست‌های فوق‌توزیع



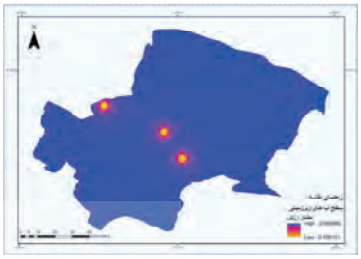
شکل ۱۵. نقشهٔ فازی شبکهٔ ۲۰ کیلوولت



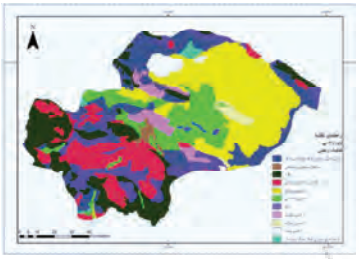
شکل ۱۶. فاصله تا جادهٔ اصلی



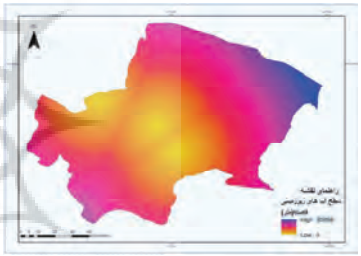
شکل ۲۱. نقشهٔ فازی تیپ اراضی



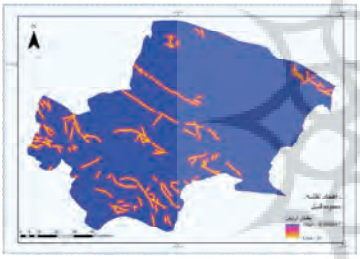
شکل ۱۷. نقشهٔ فازی جادهٔ اصلی



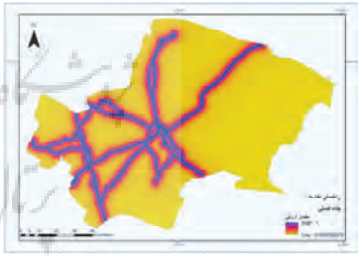
شکل ۲۲. میزان شیب



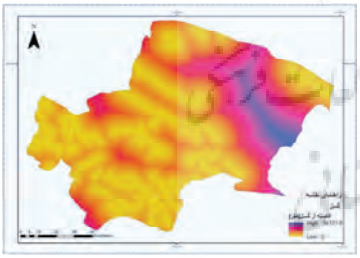
شکل ۱۸. فاصله از سطح آب‌های زیرزمینی



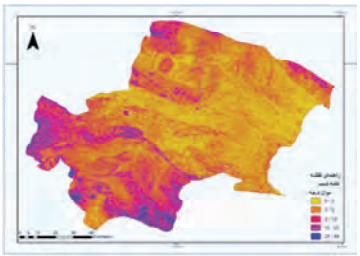
شکل ۲۳. نقشهٔ فازی شیب



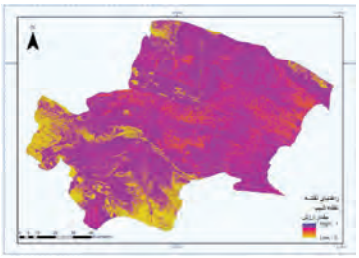
شکل ۱۹. نقشهٔ فازی سطح آب‌های زیرزمینی



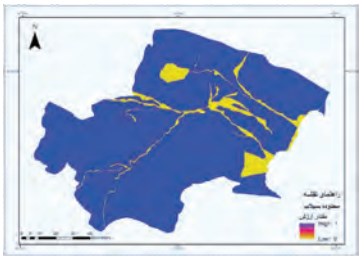
شکل ۲۴. فاصله از محدودهٔ گسل



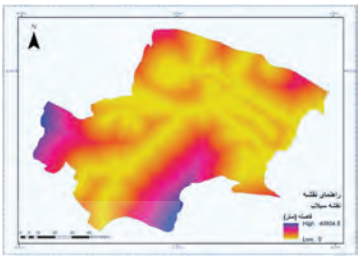
شکل ۲۰. تفکیک تیپ اراضی



شکل ۲۵. نقشهٔ فازی گسل



شکل ۲۶. فاصله از محدودهٔ سیلاب

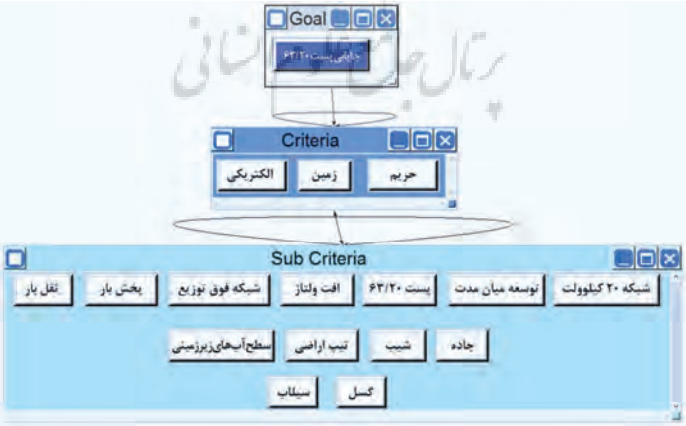


شکل ۲۷. فازی‌سازی سیلاب

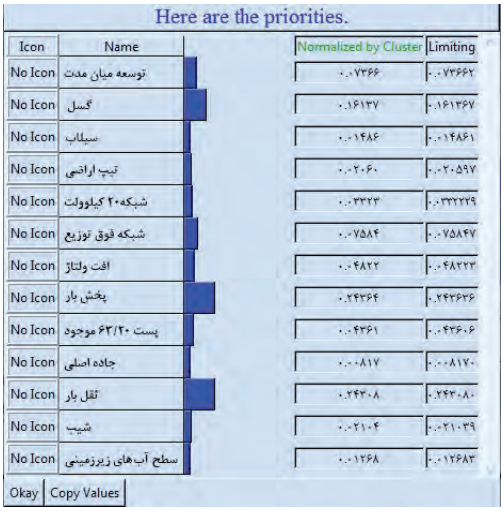
۳-۱- تعیین وزن نهایی معیارها با روش ANP

در این پژوهش، ارزش‌گذاری معیارها و زیرمعیارها با روش ANP صورت گرفت. تعریف روابط متقابل در میان معیارها و تعیین وزن نهایی هر معیار با استفاده از مقایسه‌های زوجی در بستر نرم‌افزار Super Decision انجام شد. مدل شبکه‌ای ترسیم‌شده به تفکیک لایهٔ هدف، لایهٔ معیارهای اصلی و لایهٔ زیرمعیارها، طراحی و سازمان‌دهی شدند. در شکل ۲۸ مدل شبکه‌ای تعریف معیارها و زیرمعیارهای مذکور و همچنین ارتباط درونی و بیرونی آنها نشان داده شده است. در این شکل یک کلاستر هدف با نام Goal، یک کلاستر معیار با نام Criteria و یک کلاستر زیرمعیار با نام Sub Criteria تعریف شده است. سپس در هر کلاستر گره‌های معیار قرار دارند. در بالای کلاستر معیار و زیرمعیار یک حلقه دیده می‌شود که این نشان‌دهندهٔ روابط درونی بین معیارهاست. فلش بالای کلاسترها نیز نشان از روابط بیرونی کلاستر با دیگر کلاسترها دارد.

در مرحلهٔ بعد، مقایسهٔ زوجی خوشه‌ها با استفاده از روابط تعریف‌شده از طریق پرسش‌نامهٔ ANP که توسط متخصصان و کارشناسان در این زمینه تهیه شده بود در محیط نرم‌افزاری Super Decision انجام و در نهایت سه سوپرماتریس غیروزنی، وزنی و حدی، به همراه وزن نهایی هریک از معیارها و زیرمعیارها تهیه شد. معیار مشخصات الکتریکی با وزن ۰/۷۶۱۲۸ بیشترین وزن را به خود اختصاص داد و بعد از آن معیار حریم با وزن ۰/۱۷۶۲۳ در رتبهٔ دوم و پس از آن معیار مشخصات زمین با وزن ۰/۰۶۲۴۹ در رتبهٔ سوم از نظر اهمیت قرار گرفت. در مدل ANP، میزان نرخ ناسازگاری باید کمتر از ۰/۱ باشد که برای مدل انجام‌شده برابر ۰/۰۹۲۱۲ بوده که نشان از صحت مقایسه‌ها دارد. در شکل ۲۹ وزن نهایی معیارها ارائه شده است.



شکل ۲۸. تعریف معیارها و زیرمعیارها در نرم‌افزار Super Decision



شکل ۲۹. وزن نهایی معیارها

۳-۲- اعمال وزن به لایه‌های اطلاعاتی

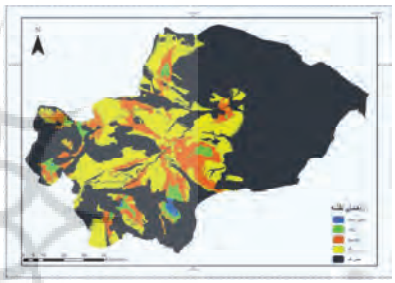
پس از تعیین وزن نهایی حاصل از مدل ANP برای معیارها، نیاز است که هر لایهٔ اطلاعاتی در وزن تعیین‌شدهٔ خود ضرب شود. برای این امر از افزونهٔ Raster Calculater در نرم‌افزار Arc GIS استفاده شده است.

۳-۳- همپوشانی فازی در مکان‌یابی با عملگر فازی

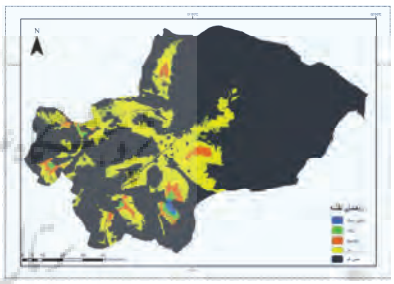
پس از اینکه تمامی معیارها هم‌مقیاس شدند و وزن نهایی هر معیار بر لایهٔ فازی آن اعمال شد، نیاز است که این نقشه‌ها با یکدیگر همپوشان شوند. برای این کار از ابزار Fuzzy Overlay در نرم‌افزار Arc GIS استفاده شده است. برای همپوشانی فازی می‌توان یکی از روش‌های پنج‌گانه (AND، OR، SUM، PRODUCT و GAMMA) را براساس هدف پژوهش انتخاب کرد. بررسی تابع AND نشان می‌دهد که این تابع به‌دلیل نبود شاهد یا عامل یا شاخص خاص در تعیین محدوده یا مکان مناسب برای توسعه و همچنین ضعف این عملگر در اعمال اثر تمامی شاخص‌های دخیل در ارزیابی محدودهٔ بهینه، مناسب هدف پژوهش نیست. از تابع OR در مناطقی که شاخص‌های تأثیرگذار محدود بوده و وجود عوامل یا شاخص‌های مثبت برای تعیین محدوده یا مکان مناسب برای توسعه و پیشبرد طرح کافی باشد از این عملگر استفاده می‌شود. بنابراین تابع OR نیز مناسب هدف پژوهش نیست. نتایج استفاده از تابع SUM این است که ارزش پیکسل به‌سمت یک میل می‌کند در نتیجه تعداد پیکسل بیشتری در کلاس خیلی خوب قرار می‌گیرد و از معایب آن این است که حساسیت کمی در مکان‌یابی دارد. بنابراین استفاده از این تابع نیز در راستای هدف پژوهش نیست. نتایج استفاده از تابع PRODUCT به این شرح است که اعداد کوچک‌تر می‌شوند و به‌سمت صفر میل می‌کنند و تعداد پیکسل کمتری در کلاس خیلی خوب قرار می‌گیرد. به همین دلیل این عملگر حساسیت بالایی در مکان‌یابی اعمال می‌کند که این قابلیت ممکن است عرصه‌های مناسب دیگری را جزو مناطق مناسب قرار ندهد. این خصوصیت از معایب این عملگر در امر مکان‌یابی است. عملگر Gamma حدفاصل عملگرهای ضرب و جمع جبری فازی است. این عملگر حساسیت خیلی بالای ضرب فازی و حساسیت خیلی کم جمع فازی را تعدیل کرده و به واقعیت نزدیک‌تر است. به همین دلیل در این پژوهش از عملگر گاما برای همپوشانی لایه‌ها استفاده شده است.

در این پژوهش از مقادیر ۰.۷، ۰.۸ و ۰.۹ برای شناسایی محدودهٔ بهینه احداث پست ۶۳/۲۰ کیلوولت استفاده شده است. پس از تهیهٔ نقشه‌های فازی، به‌منظور تعیین بهینه‌ترین محدوده، نقشه‌های هر سه گاما به پنج طبقهٔ خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم تقسیم‌بندی شدند. در جدول ۱، درصد مساحت طبقات پنج‌گانه نسبت به مساحت کل استان به تفکیک حد آستانه‌های گاما ارائه شده است. بررسی نقشه‌های تهیه‌شده و درصد مساحت هرکدام از طبقات نشان می‌دهد حد آستانهٔ ۰/۷ کمترین پهنه‌بندی را در طبقات خیلی زیاد و زیاد و بیشترین پهنه‌بندی را در محدودهٔ خیلی کم نسبت به دیگر حد آستانه‌ها دارد. همچنین گامای ۰/۹ بیشترین درصد مساحت را در

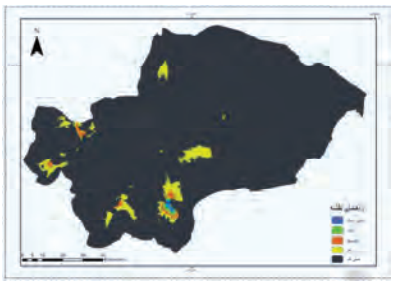
طبقات خیلی زیاد و زیاد و کمترین محدوده را در بخش خیلی کم نسبت به دیگر مقادیر به خود اختصاص داده است. با توجه به اینکه هدف از این پژوهش تعیین محدودهٔ بهینه برای احداث پست است، با انطباق وضعیت معیارها، متناسب با وضعیت هر معیار، بهینه‌ترین حالت در بخش خیلی زیاد واقع می‌شود که در شکل‌های ۳۰، ۳۱ و ۳۱ به رنگ آبی مشخص شده است. در این محدوده‌ها باید زمین مورد نظر بررسی شود. بنابراین زمین‌هایی که در این محدوده‌ها واقع شده باشد بیشترین انطباق را با معیارها و شبکهٔ فوق‌توزیع و شبکهٔ توزیع دارند.



شکل ۳۰. Gamma 0.7



شکل ۳۱. Gamma 0.8



شکل ۳۲. Gamma 0.9

جدول ۱. درصد مساحت طبقات پهنه‌بندی نسبت به مساحت کل استان

مقادیر گاما	مقادیر درصد مساحت به‌تفکیک طبقات				
	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم
گاما ۰/۷	۰.۱۰	۰.۱۳	۰.۵۲	۲.۸۰	۹۶.۴۵
گاما ۰/۸	۰.۲۰	۰.۵۳	۲.۲۴	۱۶.۲۷	۸۰.۷۷
گاما ۰/۹	۰.۳۵	۱.۹۷	۱۰.۷۱	۲۰.۵۲	۶۶.۴۵

۳-۴- ارزیابی تطابق مقادیر گامای فازی با لایهٔ محدودهٔ مطلوب معیارهای اصلی

پس از تهیهٔ لایه‌های نهایی توسط مقادیر مختلف گامای فازی، برای انتخاب گامای مناسب باید ارزیابی لازم صورت گیرد. بدیهی است که گامای با دقت زیاد با توجه به هدف این تحقیق، مقادیر مناسب تلقی می‌شوند. به‌منظور تشخیص بهینه‌ترین حد آستانهٔ گاما، از مدل ضریب همبستگی گاما در نرم‌افزار SPSS v26 استفاده شده است. برای استفاده از این مدل نیاز است علاوه‌بر ایجاد جدول توافقی، کمیت‌ها از نوع رتبه‌ای تعریف شوند. به این منظور ابتدا نقشه‌های تهیه‌شده از گامای ۰/۷، ۰/۸ و ۰/۹، با استفاده از ابزار Reclassify در نرم‌افزار ArcGIS 10.4.1 به ۵ کلاس با روش شکستگی‌های طبیعی با عناوین «خیلی‌زیاد»، «زیاد»، «متوسط»، «کم» و «خیلی کم» تقسیم‌بندی شدند.

در مرحلهٔ بعد محدودهٔ خیلی زیاد و زیاد در لایه‌های طبقه‌بندی‌شدهٔ نقشهٔ رستری هر معیار در قالب یک فایل پلیگون ذخیره شد و در نهایت تمامی این لایه‌ها با ابزار Merge با هم ادغام و سپس با ابزار Dissolve به‌صورت یک بلوک واحد ذخیره شدند. در این پژوهش این لایه را لایهٔ مطلوب می‌نامیم. فرایند فوق برای محدودهٔ متوسط، کم و خیلی کم لایه‌ها نیز انجام شد و این سه محدوده در یک لایهٔ جدا ذخیره شدند که آن را لایهٔ نامطلوب می‌نامیم. سپس توسط ابزار Extract by Mask نقشه‌های هر سه گاما براساس لایهٔ مطلوب و لایهٔ نامطلوب برش داده شد و نسبت فراوانی پیکسل‌ها در هر سه نقشهٔ گاما به‌تفکیک طبقات پنج‌گانه‌ای که تقسیم‌بندی شده بودند، طبق

جداول ۱، ۲ و ۳ به دست آمد و بر این اساس، ضریب همبستگی گاما طبق رابطهٔ (۵) (Gudarzi, 2018) و مقدار انحراف از معیار هر سه گاما در نرم‌افزار SPSS محاسبه شد.

رابطهٔ (۵) $$G = \frac{NS-ND}{NS+ND}$$

در این رابطه G مقدار گاما، NS تعداد زوج‌های هماهنگ و ND تعداد زوج‌های ناهماهنگ را نشان می‌دهد. مقادیر محاسبه‌شده مطابق جدول ۳ است. نتایج انحراف از معیار در جدول ۵ نشان می‌دهد حد آستانه ۰/۷ با انحراف از معیار (۰.۳۱۹۴۴)، نسبت به حد آستانه‌های ۰/۸ و ۰/۹، مناسب‌ترین گاما برای انتخاب محل احداث پست ۶۳/۲۰ کیلوولت است. اندازهٔ عددی ضریب همبستگی گاما بین کمیت‌های گاما و ارزش‌های طبقات پنج‌گانه طبق جدول ۶ برابر با ۰.۰۸۸ است. مقدار احتمال تقریبی نیز معنادار و برابر با ۰/۰۱۰ است که نشان می‌دهد کمیت‌های گاما و ارزش‌های طبقات پنج‌گانه بر هم تأثیر معناداری دارند. مثبت بودن این ضریب به‌معنای وجود ارتباط مستقیم بین گاما و ارزش است.

جدول ۲. تعداد پیکسل‌ها در محدودهٔ مطلوب معیارهای اصلی

مقادیر گاما	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم
گاما ۰/۷	۱۲۸۱۳	۱۷۶۶۱	۷۰۲۸۳	۳۷۵۱۲۱	۸۳۴۶۶۶۶
گاما ۰/۸	۲۴۳۰۵	۷۰۹۵۶	۳۰۰۵۴۹	۲۰۹۷۰۲۳	۶۳۲۹۷۱۱
گاما ۰/۹	۴۰۴۹۲	۲۶۳۱۴۰	۱۳۹۹۷۵۱	۲۴۲۴۱۰۶	۴۶۹۵۰۵۵

جدول ۳. تعداد پیکسل‌ها در محدودهٔ نامطلوب معیارهای اصلی

مقادیر گاما	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم
گاما ۰/۷	۰	۰	۰	۶۵۲	۴۶۴۵۸۳۷
گاما ۰/۸	۰	۰	۱۲۲	۸۳۴۵۷	۴۵۶۲۹۱۰
گاما ۰/۹	۰	۰	۳۵۳۷۰	۳۴۶۰۵۶	۴۲۶۵۰۶۳

جدول ۴. نسبت فراوانی پیکسل‌های محدودهٔ مطلوب به محدودهٔ نامطلوب معیارهای اصلی برحسب مقادیر ضریب همبستگی

مقادیر گاما	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم
گاما ۰/۷	۱	۱	۱	۱	۰.۲۸
گاما ۰/۸	۱	۱	۱	۰.۹۲	۰.۱۶
گاما ۰/۹	۱	۱	۰.۹۵	۰.۷۵	۰.۰۵

جدول ۵. انحراف از معیار گاماهای مورد استفاده

Descriptive Statistics

	تعداد مشاهدات	کمترین مقدار	بیشترین مقدار	میانگین	انحراف از معیار
گاما ۰/۹	۵	۰.۰۵	۱.۰۰	۰.۷۴۹۸	۰.۴۰۵۶۲
گاما ۰/۸	۵	۰.۱۶	۱.۰۰	۰.۸۱۷۰	۰.۳۶۷۵۱
گاما ۰/۷	۵	۰.۲۸	۱.۰۰	۰.۸۵۶۳	۰.۳۱۹۴۴
تعداد طبقات معتبر	۵				

جدول ۶. مقدار همبستگی بین کمیت‌های گاما

Symmetric Measures

	مقدار ضریب همبستگی گاما	انحراف استاندارد	مقدار تقریبی T	احتمال تقریبی
نتایج تحلیل داده‌های ترتیبی با استفاده از گاما	۰.۰۸۸	۰.۰۳۴	۲.۵۷۸	۰.۰۱۰
تعداد موارد معتبر	۱۲۱۱			

۴- بحث و نتیجه‌گیری

پست‌های ۶۳/۲۰ کیلوولت با هدف تأمین کمبود انرژی در شبکهٔ توزیع برق احداث می‌شوند و بهره‌بردار اصلی پست‌های ۶۳/۲۰ کیلوولت، شرکت‌های توزیع برق هستند. بنابراین محل احداث پست، تأثیر مستقیمی بر بعد اقتصادی و فنی شرکت‌های توزیع برق دارد. در این پژوهش، ابتدا معیارهای مؤثر و کاربردی مرتبط با شرکت‌های توزیع برق با استفاده از دستورالعمل‌های موجود و نظرسنجی از ۱۰ کارشناس خبرهٔ شرکت توزیع برق قم و برق منطقه‌ای تهران، بررسی و تعیین شدند. تعیین معیارهای مرتبط با شرکت توزیع برق که در بعد عملیاتی، کاربردی و قابل اجرا باشند به‌طور کامل در تحقیقات گذشته به آن پرداخته نشده بود که در پژوهش حاضر بررسی شد. نحوهٔ محاسبه و تعیین شرایط استاندارد برای هر معیار از الزامات انتخاب بهینهٔ محل احداث پست به شمار می‌رود که در تحقیقات گذشته و دستورالعمل‌های موجود ارائه نشده است. از دیگر فعالیت‌های نوآورانه در این پژوهش، جمع‌آوری و تدوین نحوهٔ محاسبهٔ مقادیر هر معیار با استفاده از قوانین، استانداردهای موجود و نظرسنجی از کارشناسان خبره است.

شبکه‌ای بودن ساختار توزیع برق باعث شده است که معیارهای انتخاب پست با یکدیگر ارتباط داشته و بر هم تأثیرگذار باشند. ازاین‌رو برای کسب نتایج دقیق در مکان‌یابی پست، باید ارتباط و تأثیر معیارها با یکدیگر نیز در محاسبات لحاظ شود. نظر به مطالعات انجام‌شده که در بخش مقدمه ارائه شد، در اغلب تحقیقات برای اولویت‌بندی و تصمیم‌گیری از روش AHP استفاده شده است که این روش فاقد امکان بررسی روابط بین معیارهاست. محاسبهٔ ارتباط درونی و تأثیر معیارها بر یکدیگر با روش ANP، روشی نو در تحقیقات است که در این پژوهش استفاده شده است. برخی معیارهای انتخاب محدودهٔ پست ۶۳/۲۰ کیلوولت از نوع کیفی و برخی نیز از نوع کمّی هستند. با توجه به تعدد معیارها و نسبی بودن تأثیر هرکدام در تعیین محدودهٔ احداث پست، لازم است تمامی اطلاعات نرمال‌سازی شوند. در این پژوهش برای نرمال‌سازی داده‌ها از روش فازی استفاده شده است. وزن نهایی معیارها که از روش فرایند ANP به دست آمده است، در نقشهٔ فازی معیارها ضرب و سپس از عملگر فازی گاما با حد آستانه‌های ۰/۷، ۰/۸ و ۰/۹ برای همپوشانی نقشه‌های معیارها استفاده شد. به‌منظور تعیین حد آستانهٔ بهینه، از مدل ضریب همبستگی گاما در نرم‌افزار SPSS استفاده شد و با محاسبهٔ ضریب همبستگی و انحراف از معیار، مشخص شد حد آستانهٔ گامای ۰/۷ بهترین دقت را در تعیین محل بهینهٔ احداث پست ۶۳/۲۰ دارد. از دیگر روش‌های نو در بین تحقیقات انجام‌شده، استفاده از ضریب همبستگی گاما برای مقایسهٔ حد آستانه‌های گاماست. نتایج نهایی به‌دست‌آمده از مقایسهٔ حد آستانه‌های مختلف گاما نشان می‌دهد حد آستانهٔ ۰/۷ دقت بیشتری در مکان‌یابی محدودهٔ پست نسبت به دیگر مقادیر گاما دارد. با تحلیل نقشهٔ نهایی مشخص شد محدودهٔ شهر کهک که در منطقهٔ جنوبی استان قم واقع شده است به‌عنوان بهینه‌ترین محدوده برای احداث پست ۶۳/۲۰ کیلوولت در سطح استان قم است.

از مهم‌ترین مشکلات پیش رو در این پژوهش، دسترسی نداشتن به لایه‌های اطلاعاتی زمین‌شناسی، مشخص نبودن هزینه‌های زمین‌های پیشنهادی و عدم واگذاری اطلاعات مورد نیاز توسط شرکت‌های دولتی و یا مطالبهٔ هزینه‌های قابل توجه در قبال ارائهٔ اطلاعات توسط شرکت‌های خصوصی است.

در راستای استفاده و ارتقای مدل پژوهش پیشنهاد می‌شود:

- به‌منظور سهولت دسترسی به منابع مورد نیاز، لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز از طریق شرکت توزیع برق و یا برق منطقه‌ای به‌صورت ارتباط بین سازمانی از دیگر سازمان‌ها تهیه شد.
- با توجه به نتایج دقیق این پژوهش، شرکت‌های برق منطقه‌ای و شرکت‌های توزیع برق در خصوص انتخاب محل احداث پست ۶۳/۲۰ از پژوهش‌های علمی به‌خصوص مدل ارائه‌شده در این پژوهش استفاه کنند.

- معیارهای مرتبط با شرکت‌های برق منطقه‌ای در نظر گرفته شود و در صورت نیاز، معیارهای هزینهٔ خرید زمین و هزینهٔ احداث و تجهیزات پست به معیارهای این پژوهش اضافه شود.
- به‌منظور تدقیق نتایج از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، داده‌های مکانی و علم GIS و همچنین روش‌های فازی برای انجام پژوهش‌های مشابه به‌صورت صحیح استفاده شود.

۵- منابع

Allah Akbari F., G. Jandaghi, 2016, Location of electricity distribution stations in Qom using MCDM method. The 13th International Industrial Engineering Conference, Mazandaran.

Amjadipour, M., 2013, Optimum location of super distribution substations based on reliability, Master's thesis of power engineering, Faculty of Engineering, Birjand University.

Ashourlou D., A. Metkan, A. Kazemi, A. Hosseini, M. Azadbakht, M. Hajeb, A. Gholampour, 1387, Determining the pixel size to calculate the physiographic characteristics of the catchment basin for 1:25000 topographic maps of Iran, Chaslanma. Geology of Iran, 2nd year, 8th issue, pages 47-54.

Bahmanpour A., 1379, Post and feeder planning in electric power distribution systems by genetic algorithm method, 15th International Electricity Conference, Volume 3.

Boonchiam, P. and Mithulananthan, N., 2006, Understanding of dynamic voltage restorers through MATLAB simulation , Thammasat Int. J. Sc. Tech., vol. 11, no. 3.

Country Planning and Budget Organization, 1400, Regulations for Geometric Design of Suburban Roads, Publication 800, Year 1400, Number 1.

Ebrahimzadeh A., P. Izdi, S. Kehzadi, 2014, strategic planning of sustainable development of ecotourism using integrated model (AWOT and ANP) case study of Kurdistan Province, Journal of Space Geographical Analysis, 5th year, 15th serial number.

Faraji Sabokbar, H., M. Salmani, F. Feridouni, H. Karimzadeh, H. Rahimi, 2017, Locating the sanitary landfill of rural waste using the Analytical Network Process (ANP) model, a case study of the rural areas of Qochan. Humanities Teacher's Quarterly, Volume 14, Number 1.

Ghafarian M., M. Rahimian, 2014, optimization of the selection of the location of high voltage substations by the proportional weight evaluation method, a case study of Yazd Regions Electric Company. The 30th International Electricity Conference, Tehran.

Golestani A., 1386, Calculation and determination of load gravity and its application to determine the location of sub-distribution substations, 10th Iranian Electrical Engineering Student Conference, Isfahan. Guderzi S., 2018, Calculation of statistics in social sciences, Tuiserkan Islamic Azad University Publications.

Gönen, T., 1986, Electric Power Distribution System Engineering, McGraw-Hill ,New York.

Golam Kabir, M., Ahsan Akhtar, H., 2013, Integrating modified Delphi method with fuzzy AHP for optimal power substation location selection, International Journal of Multicriteria Decision Making, Vol. 3, No. 4, pp 381-398. http://dx.doi.org/10.1504/IJMCDM.2013.056654

Holt S.B., D.M. Crawford, 2014, A Mathematical Optimization Technique for Locating and Sizing Distribution Substation and Deriving their Optimal Service Areas , IEEE Trans, PAS-94, No.2, pp.230- 235.

Khator, S. K., Leung, L. C., 1997, Power Distribution Planning: a review of models and issues, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, pp. 1151–1159.

Hosseini, H. 2013. Geomorphological assessment of land suitability for the physical development of Diwandre city using fuzzy logic AHP, National Conference of Geomorphology Association.

Lami, I.M., Abastante, F., 2014, Decision making for urban solid waste treatment in the context of territorial conflict: Can the Analytic Network Process help?, Land Use Policy, Vol 41:11-20. http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.04.010

Malczewski, J., 1999, GIS and Multi-criteria Decision Analysis, PP. 177-189. http://dx.doi.org/10.2307/254268.

Miranda, V., et al., 1994, Genetic algorithms in optimal mulri-stage distribution network planning, IEEE Trans. Power system, Vol. 9, No.4, PP. 1927-1933. http://dx.doi.org/10.1109/59.331452

Maleki S., M. Hosseini Siah Goli, A. Soleimani-Rad, 2016, the use of fuzzy gamma operator to optimize temporary accommodation in geographic information system (case example: Chahar Shahr region of Ahvaz). Quarterly journal of geography and environmental studies, year six, number twenty-four.

Ministry of Roads and Urban Development, 2018, National Building Regulations of Iran, Chapter 8 (Edition 3), Publications of Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran.

Ministry of Roads and Urban Development, 2013, Code of Design of Buildings against Earthquake - Standard 2800 (Edition 4), 2014, Publications of Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran.

Momeni M., A. Sharifi Salim, 2013, multi-criteria decision making models and software, published by the authors with the support of Elixir pharmaceutical company, Tehran.

Office of Organization and Improvement of Methods of Tehran Regional Electricity Company, 2016, Land Selection Form for Transmission and Super Distribution Substations, Code Form F/PR/TP/01/001.

President's Office of Planning and Strategic Supervision, 2013, Regulations on Geometric Design of Iran's Roads, Publication No. 415.

Research Center of the Islamic Council, 2000, Regulations related to the bed and privacy of rivers, streams, canals, marshes, natural ponds and water supply, irrigation and drainage networks, rules and regulations, period 79.

Rouhi J., B. Yousfi, 2013, optimal placement of sub-distribution substations 63.20 KV in development conditions. 11th international conference, Tehran.

Ramirez I., Rasudo, J. and Gonen, T., 1991, Pseudodynamic planning for expansion of power distribution systems, IEEE Trans. PWRS, vol. 6, No 1, PP.245-254.

Saadi Mesgari M., m. Timuri, H. Shorovarzi, 2015, location of hospitals using Fuzzy GIS. Shahrnagar magazine, number 54.

Salimi, M., A. Ronasi, F. Qadri, S. Naderi, 2016, the application of Fuzzy_AHP method and location information system in optimal location for post construction in Abdanan city, Ilam province, the fourth national conference on the application of GIS spatial information system in Water and electricity industry, Arak.Soleimani Amiri G., M. Taheri, 2017, ranking of factors affecting the quality of internal audit activity: network analysis model (ANP), Danesh Hakurbarsi, 18th year, number 71, pp. 13.

Saaty T.L., 2005, Theory and Applications of the Analytic Network Process: Decision Making with Benefits, Opportunities, Costs, and Risks, RWS Publications. https://doi.org/10.4236/ce.2016.716229

Shoja Iraqi M., S. Tolaei, P. Ziaian, 2013, optimal location of crisis management support bases using geographic information system (case study: District 6 of Tehran Municipality), urban and regional studies and researches. E, third year, number 10.

Deputy of Technical Affairs of the Ministry of Energy, 2016, instructions for choosing a post office, publication No. 103.

Wall, D.L., and Thampson, G.L., 2016, A Branch and Bound Model for Choosing Optimal Substation Written by H., 1384,

Earthquake, Cities and Faults, Journal of Geographical Research, No. 52, pp. 110-93.

Location , IEEE Trans. PAS-100, No.5, pp. 2683-2687.

Wang, Z. et al., 2000, A practical approach to the conductor size selection in planning radial sidtribution systems, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 15, No. 1, PP. 350-354. http://dx.doi.org/10.1109/61.847272

Zhang, N., Zhou, K., Du, X. 2017. Application of fuzzy logic and fuzzy AHP to mineral prospectivity mapping of porphyry and hydrothermal vein copper deposits in the Dananhu-Tousuquan island arc, Xinjiang, NW China. Journal of African Earth Sciences128, 84-96. http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.12.011

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی