

برآورد آسیب پذیری مکانی و جمعیتی ناشی از تخریب زیرساخت های انتقال نیرو در اثر حملات خصمانه با GIS

سعید مهری^۱؛ نوید هوشنگی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد گروه مهندسی GIS؛ دانشکده ژئودزی- ژئوماتیک؛ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ تهران

۲- استادیار گروه مهندسی نقشه برداری؛ دانشکده مهندسی علوم زمین؛ دانشگاه صنعتی اراک (نویسنده مسئول)

دریافت دست نوشته: ۱۴۰۰/۰۱/۰۱؛ پذیرش دست نوشته: ۱۴۰۰/۰۶/۰۸

واژگان کلیدی	چکیده
تئوری گراف آسیب پذیری مکانی- جمعیتی شبکه توزیع برق حملات خصمانه پدافند غیرعامل	با توجه به اهمیت استراتژیک شبکه های انتقال نیرو، شناخت میزان اثرات ناشی از بین رفتن بخش های مختلف در اثر حملات خصمانه، ضرورت داشته و امکان پیش آگاهی و برنامه ریزی را فراهم می کند. هدف اصلی این تحقیق برآورد میزان آسیب پذیری مکانی- جمعیتی استان آذربایجان شرقی ناشی از تخریب زیرساخت های انتقال نیرو در اثر حملات خصمانه می باشد. به این منظور، روشی جدید بر مبنای استفاده از سیستم اطلاعات مکانی (GIS)، تئوری گراف و مفاهیم پدافند غیرعامل ارائه می شود. روش پیشنهادی برای شناسایی امان های مؤثر شبکه های انتقال نیرو، در چهار سناریوی فرضی (تخریب پست های شهرستان اهر، میانه، جلفا و تیکمه داش) از نظر بعد مکانی و جمعیتی اعمال شد. نتایج تحقیق نشان می دهد که با تخریب پست شهرستان اهر پهنه ای به وسعت ۹۱۹۰ کیلومتر مربع دچار خاموشی شده و ۲۸۷۰۰۰ نفر تحت تأثیر قرار خواهند گرفت. در مقایسه با تخریب پست برق شهرستان اهر، تخریب پست های شهرستان های میانه، جلفا و تیکمه داش به ترتیب ۳۷، ۸۱ و ۱۵ درصد از نظر مساحت خاموشی و ۳۵، ۸۱ و ۴۴ درصد از نظر جمعیت، محدوده ی کوچک تری را تحت تأثیر قرار می دهد. روش ارائه شده امکان آزمون و برآورد میزان تخریب سناریوهای متعدد را فراهم کرده و می توان از الگوی ایجاد شده در زیرساخت های دیگری مانند خطوط نفت و گاز نیز استفاده کرد.

۱- پیشگفتار

حملات عمدی (نظامی و تروریستی) می باشند (Adelpour & Ghasemi, 2012; Zio, 2016). به دلیل وابستگی های متقابل بین اجزای شبکه ی توزیع برق، کوچک ترین اختلال می تواند موجب از کار افتادن بسیاری از بخش های حیاتی کشور از جمله شبکه های ارتباطی مخابراتی، صنایع، خدمات اداری و سایر خدمات اساسی و زیرساختی شده و موجب افزایش رعب وحشت عمومی شود (Beyza, et al., 2019; Wang et al., 2018). اهمیت برآورد آسیب پذیری ناشی از تخریب زیرساخت ها در هنگام مواجه شدن با تهدیدات نظامی و تروریستی، دو چندان می شود

در دنیای واقعی شبکه هایی مانند شبکه ی برق، مخابرات، تأمین آب، تأمین گاز طبیعی و غیره، سیستم های زیرساختی حیاتی (CIS: Critical Infrastructure Systems) هستند که برای عرضه ی تولیدات و تسهیل تعاملات انسانی به صورت یکپارچه کار می کنند (Wang, et al., 2018). این شبکه ها همواره در معرض خطرات طبیعی، حملات عمدی و شکست های تصادفی می باشند (Abedi, et al., 2019; Wang, et al., 2017). شبکه های تولید و توزیع نیروی برق نیز از جمله زیرساخت های پیچیده و آسیب پذیر به ویژه در

(Shvani, 2019)؛ زیرا تخریب‌های عمدی به‌گونه‌ای انجام می‌گردد که مدت تأثیر آن بالا بوده و در زمان کوتاه امکان تعمیر بخش‌های آسیب‌دیده وجود نداشته باشد. از این‌رو، آسیب‌پذیری زیرساخت‌های حیاتی مانند شبکه‌ی برق برای مقابله با منابع اختلال باید به حداقل برسد (Abedi et al., 2019).

۱-۱- مبانی نظری تحقیق

بر اساس استراتژی‌های نظامی، انهدام زیرساخت‌های اساسی یک کشور مانند زیرساخت نیرو از جمله اهداف اولیه حملات نظامی است (Eskandari, et al., 2015). زیرساخت‌های انرژی یکی از اهداف اولیه در زمان وقوع جنگ بوده و حفاظت از آنها بسیار مهم است (Muhammad & Reza, 2019). تخریب بالای شبکه‌های تولید و توزیع نیروی برق در عملیات هوایی عراق علیه نیروگاه شهید سلیمی نکا، حمله به تأسیسات برق عراق در عملیات طوفان صحرا توسط آمریکا، عملیات بمباران یوگسلاوی توسط سازمان پیمان آتلانتیک شمالی (ناتو) در جریان جنگ کوزوو (عملیات نوبل انویل) (Thomas, 2001) و یا انهدام نیروگاه‌های لبنان در جنگ ۳۳ روزه توسط رژیم صهیونیستی (Mahmoud, 2008)، حمله تروریستی به پست انتقال سان‌خوزه (San Jose) در آمریکا (Muhammad et al., 2019) و عملیات مختلف دیگر نشان از اهمیت این موضوع دارد. لذا، ارزیابی سناریوهای مختلف به‌منظور جلوگیری از وقوع بحران و یا برنامه‌ریزی و ایجاد آمادگی کامل جهت رفع مشکلات ناشی از وقوع حملات، لازم و ضروری می‌باشد.

در حملات نظامی مانند حملات هوایی، زمینی و دریایی استفاده از اقدامات پدافندی عامل و غیرعامل، جهت حفظ زیرساخت‌ها موضوعی بنیادی است (Biranvand & Momeni, 2019). پدافند غیرعامل با هدف حفاظت از المان‌های مختلف مانند نیروی انسانی، تجهیزات نظامی و زیرساخت‌ها و با محوریت عدم استفاده از تجهیزات جنگی، راهکار مناسبی برای کاهش تلفات و خسارات می‌باشد (Arash B & E, 2014; Gholamreza & Sajjad, 2018). اقدامات پدافند غیرعامل (ترفندها، پوشش، فریب، استتار،

توزیع استحکامات و سازه‌های ایمن و اعلام اخبار) برای کاهش آسیب‌ها و اثرات در حملات نظامی یکی از مؤثرترین روش‌های دفاع در برابر تهدیدات محسوب شده (Muhammad et al., 2019) و به دلیل مسائل مختلفی از جمله هزینه‌های پایین در مقایسه با پدافند عامل، ارجحیت دارد (Latter & Martinelli, 1965). در کشور ایران بیشتر طرح‌ها بدون در نظر گرفتن مبانی پدافند غیرعامل طراحی و اجرا شده‌اند (Eskandari et al., 2015). پدافند غیرعامل نقش مهمی در استمرار فعالیت چرخه‌ی تولید تا مصرف انرژی الکتریکی ایفا می‌نماید (Muhammad et al., 2019; Shvani, 2019). لذا، رعایت اصول پدافند غیرعامل در حوزه‌های مختلفی از جمله مدیریت شهری (Kamran, et al., 2013)، مدیریت زیرساخت نیرو (Esfahani, 2015) و به‌منظور پیشگیری از حملات خصمانه و یا کاهش اثرات تخریبی و کاهش آسیب‌پذیری‌ها الزامی است (Hejazi, 2015).

نحوه‌ی توزیع فضایی و عملکرد عناصر اصلی شهر، در میزان آسیب‌پذیری آن در برابر خطرات مختلف به‌ویژه حملات نظامی مؤثر هستند (Arash B et al., 2014). برای لحاظ نمودن اصول پدافند غیرعامل در صنعت برق باید ابتدا المان‌های مؤثر در کارایی زیرساخت‌ها و میزان تأثیرات مکانی- جمعیتی ناشی از وقوع سناریوهای تخریب تعیین و مدل‌سازی گردد. با توجه به ماهیت مکانی و توصیفی آسیب‌پذیری زیرساخت‌های انتقال نیرو، المان‌های مؤثر شامل شبکه‌ی برق، سناریوی تخریب و جمعیت تحت پوشش می‌باشد. به‌منظور مدل‌سازی هم‌زمان بعد مکانی و توصیفی المان‌ها و ارتباط میان هریک، باید از توابع و آنالیزهایی با ماهیت مکانی استفاده کرد. با توجه به قابلیت‌های سیستم اطلاعات مکانی (GIS: Geospatial Information System) در ذخیره، بازیابی و آنالیز داده‌های مکانی و توصیفی، بررسی المان‌های فوق در محیط سیستم اطلاعات مکانی ممکن می‌باشد (Hawchar, et al., 2020; Ramezani, et al., 2018). با شناخت المان‌های اساسی و استفاده از قابلیت‌های GIS می‌توان راه‌کارهای مناسبی جهت تخمین میزان آسیب‌پذیری مکانی و جمعیتی ناشی از تخریب زیرساخت‌های انتقال نیرو با رویکرد پدافند غیرعامل انجام داد.

۲-۱- پیشینه تحقیق

تحقیقات مختلفی با رویکرد کاربردهای GIS در برآورد آسیب پذیری صنعت برق انجام شده است. از GIS به منظور جلوگیری از تداخل و مجاورت مستقیم شبکه ی برق با تأسیسات پرخطر مانند مخازن گاز، اجتناب از قرارگیری دکل های فشارقوی و مراکز اصلی توزیع برق در مراکز مهم و حوزه های شهری پرتراکم استفاده شده است. در ایتالیا سامانه ی اطلاعات مکانی تحت وب (WebGIS) برای پیش بینی مناطقی که احتمال قطعی برق به دلیل انباشت برف بر روی کابل های فشارقوی و متوسط وجود داشت، توسعه داده شده است (Lacavalla, et al., 2015). ناطقی و همکاران (۲۰۱۴) در پدیده ی طوفان در آمریکا مدت زمان قطعی برق را در دو دسته عوامل قابل پیش بینی و غیرقابل پیش بینی طبقه بندی کرده و نتیجه گرفتند در صورتی که بتوان مشخصات طوفان از قبیل سرعت، جهت و مدت زمان آن را قبل از وقوع طوفان، به صورت دقیق پیش بینی کرد، همچنین اطلاعات دقیق از وضعیت توپوگرافی و اطلاعات هواشناسی دقیق از منطقه در دسترس باشد، می توان مدت زمان قطعی برق را محاسبه نمود (Nateghi, et al., 2014). Hawchar و همکاران (۲۰۲۰) به ارزیابی آسیب پذیری زیرساخت های حساس در چارچوب GIS پرداخته و نقشه های رتبه بندی ریسک چندبخشی را ایجاد کردند. در این نقشه ها مجاورت جغرافیایی زیرساخت حیاتی که در معرض تهدید آب و هوایی هستند، محاسبه شدند (Hawchar et al., 2020). در اصفهان نیز آسیب پذیری زیرساخت های حیاتی (زیرساخت برق) در برابر تهدیدات هواپایه ی هوشمند با توسعه ی روشی مکانی انجام شد که نتایج نشان داد تعداد گیرکننده ها (Jammer) و میزان آسیب قابل کاهش می باشد (Ramezani et al., 2018).

در زمینه ی مباحث مربوط به آسیب پذیری، اهمیت و لزوم اجرای مباحث مطرح در پدافند غیرعامل نیز تحقیقات متعددی انجام شده است. از شبکه ی عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network) و سامانه های قدرت به عنوان یک عامل مهم پدافندی استفاده شده تا اطلاعات بهره برداران سامانه ی قدرت در شرایط عادی و اضطراری با دقت و سرعت بالاتری در اختیار بهره برداران شبکه قرار گیرد (Velayati &

Ghaffarpour, 2015). پهنه بندی آسیب پذیری کلی شهر تهران با رویکرد پدافند غیرعامل و با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP: Analytical Network Process) معکوس نشان داد که ۲۴/۹۳ درصد از قطعات شهری در معرض آسیب پذیری خیلی بالا در حملات هوایی هستند (Gholamreza et al., 2018). برای تعیین بهترین مکان جهت احداث مرکز جدید کنترل و دیسپاچینگ تهران (مراکز حساسی که در کنترل و مدیریت نیروگاه ها و شبکه سراسری برق کاربرد دارند) از روش تصمیم گیری چند معیاره (MCDM: Multi Criteria Decision Making) با رویکرد پدافند غیرعامل استفاده شده است (Kia & Aalami, 2014). از قابلیت های GIS برای پهنه بندی عرصه های مسکونی در راستای امنیت شهروندان در شهر دزفول استفاده شده و مشخص گردیده که فاصله از مراکز حساس نظامی مهم ترین فاکتور در این پهنه بندی می باشد. همچنین چندین محدوده ی مناسب جهت استقرار عرصه های مسکونی تعیین شده است (Biranvand et al., 2019). بررسی آسیب پذیری شهر اهواز در برابر حملات نظامی با استفاده از روش AHP نشان داده که یک درصد از شهر آسیب پذیری خیلی کم، ۴۱ درصد از شهر اهواز آسیب پذیری کم، ۵۶ درصد آسیب پذیری زیاد، ۲ درصد از شهر اهواز کاملاً آسیب پذیر است (Hasanali, et al., 2015). برای شهر کوهدشت، آسیب پذیری زیرساخت های شهری در مقابل حوادث طبیعی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP: Multi Criteria Decision Making) در بستر سیستم اطلاعات مکانی بررسی شده و نتایج نشان داده که ۶۸ درصد از زیرساخت های شهری در آسیب پذیری ۴۵ تا ۷۱ درصد، در مقابل حوادث طبیعی قرار دارند (Amanpour, et al., 2016).

علاوه بر روش های تصمیم گیری چندمعیاره مانند AHP در تعیین زیرساخت های شهری آسیب پذیر، یکی از اصلی ترین روش ها شبیه سازی سناریوهای مختلف است. روش های استفاده شده برای تخمین محدوده ی آسیب پذیری شبکه ی برق یا سایر زیرساخت های حیاتی عموماً بر اساس تئوری گراف بوده اند (Liu & Song, 2020). در تحقیقی برای هر یک از شریان های آب و برق در یک منطقه ی شهری، مدلی متشکل از تئوری گراف و لئونتیف به طور مجزا توسعه داده

شده و با استفاده از تئوری لئونتیف، برای سناریوهای مختلف، میزان شاخص سرویس‌دهی با در نظر گرفتن اثرهای وابستگی محاسبه و رتبه‌بندی شده است (Eskandari et al., 2015). Beyza و همکاران (۲۰۱۹) به رتبه‌بندی بخش‌های مختلف در شبکه‌های انتقال انرژی وابسته به یکدیگر (شبکه برق و گاز) با استفاده از روشی پیشنهادی مبتنی بر تئوری گراف پرداخته و نشان دادند که تئوری گراف می‌تواند در ارزیابی و شناسایی مهم‌ترین زیرساخت‌های برق و گاز طبیعی وابسته به یکدیگر مفید و دقیق باشد. Wang و همکاران (۲۰۱۷) روشی برای شبیه‌سازی اطلاعات حملات تروریستی و شناسایی مناطق در معرض حمله با توجه به ساختارهای جامعه توسعه دادند. آنها از تئوری گراف برای تخمین میزان آسیب‌پذیری شبکه‌ی برق ناشی استفاده کرده و لحاظ تمهیدات ویژه برای مناطق پرخطر پیشنهاد کردند (Wang et al., 2017).

بررسی تحقیقات موجود نشان می‌دهد در حوزه‌ی پدافند غیرعامل در صنعت برق با استفاده از سیستم‌های اطلاعات مکانی، غالباً هدف مکان‌یابی احداث‌های جدید و مطالعه‌ی مخاطرات طبیعی بوده است. در این دسته از تحقیقات، اثرات حملات خصمانه کمتر بررسی شده است. عموماً تحقیقات مرتبط با مباحث آسیب‌پذیری و پدافند غیرعامل میزان آسیب‌پذیری مناطق مختلف، از دیدگاه تراکم زیرساخت‌هایی که به‌عنوان اهداف حملات خصمانه هستند، بررسی شده و صرفاً مناطقی که به دلیل تراکم زیرساخت‌ها، احتمال وقوع حملات خصمانه در آنها بالاست را به‌عنوان مناطق آسیب‌پذیر معرفی کرده‌اند. به عبارت دیگر اثر ناشی از تخریب یک زیرساخت حیاتی (از نظر مکانی و جمعیتی) بررسی نشده است.

۲-۲- هدف تحقیق

مطالعات محدودی در کشور ایران به ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه‌ی برق ناشی از حملات خصمانه پرداخته‌اند و در منطقه مطالعاتی تحقیق حاضر (استان آذربایجان شرقی) پژوهشی مشاهده نشد. هدف اصلی این تحقیق برآورد میزان آسیب‌پذیری مکانی- جمعیتی استان آذربایجان شرقی ناشی از تخریب زیرساخت‌های انتقال نیرو در اثر حملات خصمانه با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی می‌باشد. در تحقیق حاضر،

مفهوم آسیب‌پذیری از دیدگاهی نو مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این دیدگاه گستره مکانی و جمعیتی تحت تأثیر از تخریب زیرساخت مورد بررسی قرار گرفته و مشخص می‌گردد در صورتی که بخشی از یک زیرساخت در اثر حملات خصمانه آسیب ببیند، چه محدوده‌ی جغرافیایی و چه تعداد جمعیت، از سرویس‌های آن زیرساخت محروم خواهد شد. بدین‌منظور ابتدا پایگاه داده مکانی (Spatial Database) و نقشه‌های زیرساخت شبکه‌ی انتقال برق در بستر سیستم اطلاعات مکانی تهیه می‌شود. سپس ارتباط بین زیرساخت شبکه‌ی برق با سکونتگاه‌های جمعیت تحت پوشش با استفاده از آنالیزهای مکانی در محیط سیستم اطلاعات مکانی ایجاد می‌شود. در ادامه سناریوهای مختلف تخریب، ناشی از عملیات نظامی و تروریستی تعریف شده و میزان آسیب‌پذیری ناشی از سناریوهای تخریب با استفاده از GIS که به‌صورت نقشه‌های آسیب برای هر سناریو است تخمین زده می‌شود. بر اساس بررسی تحقیقات مختلف، این دیدگاه یک دیدگاه جدید در مطالعات پدافند غیرعامل بوده و استفاده از آن برای برآورد اثرات تخریب زیرساخت برق، نوآوری محسوب می‌شود.

۳- معرفی منطقه مورد مطالعه و داده‌های استفاده‌شده

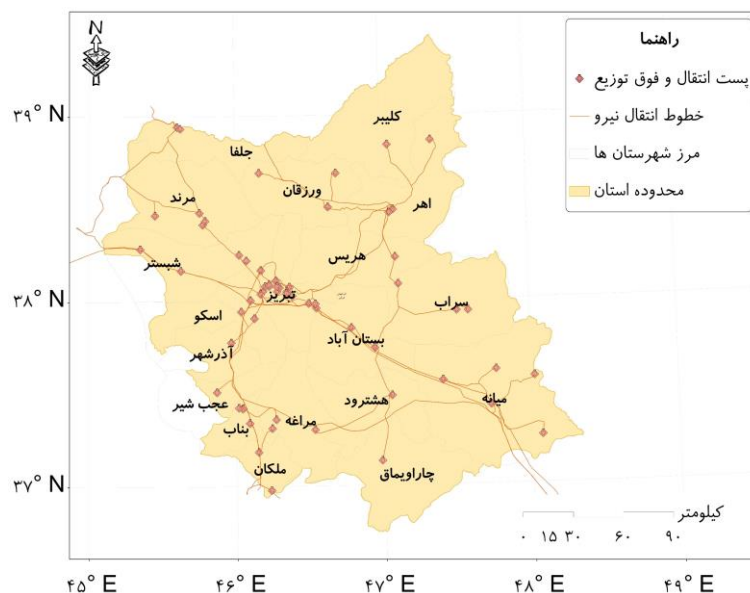
استان آذربایجان شرقی بزرگ‌ترین و پرجمعیت‌ترین استان ناحیه‌ی شمال غربی ایران محسوب می‌شود (شکل ۱). این استان ۴۵٬۴۸۱ کیلومتر مربع مساحت (حدود ۲/۸ درصد از وسعت کل ایران) و ۳ میلیون و ۷۲۵ هزار نفر جمعیت (۵ درصد از کل جمعیت ایران) دارد. این استان مرزی از سمت شمال با جمهوری‌های آذربایجان و ارمنستان همسایه می‌باشد. آذربایجان شرقی یکی از بزرگ‌ترین کانون‌های صنعت، اقتصاد و تولید در شمال غرب کشور محسوب می‌شود. این استان دارای مجموعه‌های عظیم صنعتی همچون پالایشگاه بزرگ تبریز، پتروشیمی تبریز، مجتمع بنزین‌سازی تبریز، تراکتورسازی، موتورسازان، کامیونت‌سازی، ماشین‌سازی و چندین صنایع بزرگ دیگر را در خود جای داده است.

این استان جهت تأمین انرژی برق از نیروگاه گازی و حرارتی تبریز، نیروگاه سهند، نیروگاه صوفیان، نیروگاه هیبریدی (بادی و خورشیدی) تبریز، سد ارس، سد خدافرین،

انتقال نیرو در اثر حملات خصمانه مشخص است. تحقیق حاضر بر اساس وضع موجود زیرساخت برق و آمار سکونت‌گاه‌های جمعیتی سال ۱۳۹۶ انجام شده است. در انجام تحقیق به داده‌های جمعیتی و شبکه برق نیاز است. مشخصات و فرمت داده‌های موردنیاز در جدول ۱ بیان شده است. لازم به ذکر است که با توجه به عدم دسترسی به داده‌های دقیق شبکه برق و مباحث امنیتی کشور از داده‌های تقریبی و غیردقیق استفاده شده است. لذا در صورت وجود داده‌های دقیق از شبکه برق می‌توان همین روش پیشنهادی را بر روی آنها اعمال کرد.

سد شهریار، سد قیز قلعه سی، سد مارازاد بهره می‌برد. استان آذربایجان شرقی دارای ۶۳۴ کیلومتر خط ۴۰۰ کیلوولت، ۱۴۳۹ کیلومتر خط ۲۳۰ کیلوولت، ۱۱۲۰ کیلومتر خط ۱۳۲ کیلوولت و ۹۳۹ کیلومتر خط ۶۳ کیلوولت است. همچنین شبکه برق این استان (انتقال و فوق توزیع) در مجموع دارای تعداد ۹۶ پست که شامل پست‌های ۶۳، ۲۰، ۱۳۲، ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت است، می‌باشد.

با لحاظ نقش استراتژیک این استان مرزی در صنعت کشور و محدودیت منابع تأمین انرژی لزوم تخمین میزان آسیب‌پذیری مکانی و جمعیتی ناشی از تخریب زیرساخت‌های



شکل ۱- منطقه مطالعاتی

جدول ۱- داده‌های استفاده‌شده در تحقیق

داده‌ها	لایه‌های اطلاعاتی	نوع داده	فرمت داده
جمعیت	آمار جمعیت	توصیفی	جدول
	مراکز جمعیتی	موقعیت	نقشه، وکتور، نقطه
	خطوط انتقال	توصیفی	جدول
شبکه برق	خطوط انتقال	موقعیت	نقشه، وکتور، خط
		توصیفی	جدول
	پست انتقال	نقشه	نقشه، وکتور، نقطه
	خطوط فوق توزیع	توصیفی	جدول
		نقشه	نقشه، وکتور، خط
	پست فوق توزیع	توصیفی	جدول
		نقشه	نقشه، وکتور، نقطه

تحقیق با استفاده از قابلیت‌های *GIS*، یک روش غیرمستقیم برای تعیین اهمیت المان‌های مختلف شبکه برق و اثر تخریب هر المان، ارائه می‌شود.

در روش غیرمستقیم برآورد محدوده و جمعیتی که در اثر تخریب یک یا چند پست یا خط از شبکه، دچار خاموشی می‌شوند با استفاده از تئوری گراف و آنالیزهای مکانی انجام می‌شود. این الگوریتم که اقتباس شده از تحقیقات (Beyza et al., 2019; Wang et al., 2017) است در سه مرحله انجام می‌شود: ابتدا پست‌های فوق توزیع که در اثر تخریب یک یا چند پست یا خط از شبکه دچار خاموشی می‌شوند با استفاده از تئوری گراف مشخص می‌شوند. در ادامه با استفاده از آنالیزهای مکانی (مانند *Point in polygone*) محدوده تحت پوشش پست‌های فوق توزیع که در مرحله اول شناسایی شده‌اند، تعیین می‌شود. در مرحله آخر با استفاده از آنالیز مکانی (*Spatial Join*) جمعیت محدوده‌هایی که دچار خاموشی می‌شوند محاسبه می‌گردد. در ادامه هر مرحله تشریح می‌شود:

۴-۱- استفاده از تئوری گراف در شناسایی

پست‌های دچار خاموشی

در الگوریتم پیشنهادی کل شبکه انتقال و فوق توزیع به صورت گراف (گزاره ۱) تعریف می‌شود که نودهای گراف (*V*) شامل پست‌های انتقال و فوق توزیع و یال‌ها (*E*) نشانگر خطوط انتقال و فوق توزیع هستند.

$$G = (V, E) \quad (1)$$

گراف شبکه گرافی جهت‌دار است که جهت هر یال نشانگر جهت حرکت جریان در شبکه است. جریان از منبع به سمت محل مصرف حرکت می‌کند. مرتبه‌ی ورودی هر رأس، نشانگر تعداد خطوط انتقالی است که وظیفه‌ی تأمین برق هر رأس (پست) را دارند. لذا مرتبه ورودی را می‌توان به تعداد منابع تأمین‌کننده انرژی رأس (پست) مذکور، تعبیر نمود. مرتبه (*Degree of Vertex*) خروجی هر رأس از گراف شبکه نشانگر تعداد خطوط خارج شده از رأس و به عبارت دیگر، تعداد پست‌های (رأس‌های) پایین‌دست شبکه

۴- مواد و روش

اهمیت المان‌های شبکه برق تابع دو پارامتر مراکز جمعیتی و زیرساخت‌های تغذیه شونده از هر المان شبکه برق مانند پست‌ها یا خطوط انتقال می‌باشد. به منظور تعیین اهمیت هر المان از شبکه برق، ابتدا باید تمام زیرساخت و مراکز جمعیتی که از آن المان شبکه برق تغذیه می‌شوند، مشخص گردد. سپس بر اساس اهمیت زیرساخت‌های تغذیه شونده از المان مذکور و تعداد جمعیت تحت پوشش آن، میزان اهمیت المان مذکور تعیین گردد. در صورتی که این روند برای تمامی المان‌های شبکه برق انجام شود، می‌توان المان‌های مختلف شبکه برق را بر اساس جمعیت و تعداد زیرساخت‌های تحت پوشش طبقه‌بندی نمود. به منظور تعیین اهمیت المان‌های شبکه‌ی برق می‌توان به دو روش (۱) مستقیم و (۲) بر اساس روش ارائه شده در این تحقیق (روش غیرمستقیم)، عمل نمود. در روش مستقیم، دو پارامتر (۱) تعداد زیرساخت‌های تغذیه شونده از المان شبکه برق و (۲) جمعیت تحت پوشش هر المان، به صورت دقیق بررسی می‌گردد. در این روش ابتدا تمامی مراکز جمعیتی و زیرساخت‌های موجود در منطقه‌ی تحت پوشش شبکه برق مورد مطالعه قرار گرفته و با توجه به سطح‌بندی زیرساخت‌ها (حساس، حیاتی و غیره) بررسی می‌شوند. در ادامه مسیر تأمین انرژی هر مرکز جمعیتی و زیرساخت به صورت دقیق مشخص می‌گردد. در مرحله بعدی با توجه به مسیرهای تأمین انرژی مراکز جمعیتی و زیرساخت‌های موجود در منطقه، المان‌های شبکه برق از نظر تعداد جمعیت و تعداد زیرساخت‌هایی که برق آنها را تأمین می‌کنند، طبقه‌بندی می‌شوند. به منظور استفاده از این شیوه برای تعیین اهمیت المان‌های مختلف شبکه‌ی برق مثل پست‌ها و خطوط انتقال، نیاز است تا اطلاعات مربوط به تمامی زیرساخت‌های تغذیه شونده از شبکه برق (مانند زیرساخت‌های نظامی) و مراکز جمعیتی در دسترس باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد به دلایل مختلف امکان دسترسی به داده‌های مربوط به تمامی زیرساخت‌ها، به دلیل اهمیت امنیتی این اطلاعات، غیرممکن است. به این دلیل در این

در شکل ۲، ماتریس *next* ماتریس مسیرهای گراف است که نشان‌گر نحوه ارتباط بین المان‌های مختلف شبکه است. به‌منظور مشخص کردن مسیر موجود در بین هر جفت رأس *i* و *j* از الگوریتم ارائه شده در شکل ۳ استفاده می‌شود.

```
let dist be a  $|V| \times |V|$  array of minimum distances initialized to  $\infty$  (infinity)
let next be a  $|V| \times |V|$  array of vertex indices initialized to null

procedure FloydWarshallWithPathReconstruction() is
  for each edge (u, v) do
    dist[u][v]  $\leftarrow$  w(u, v) // The weight of the edge (u, v)
    next[u][v]  $\leftarrow$  v
  for each vertex v do
    dist[v][v]  $\leftarrow$  0
    next[v][v]  $\leftarrow$  v
  for k from 1 to |V| do // standard Floyd-Warshall implementation
    for i from 1 to |V|
      for j from 1 to |V|
        if dist[i][j] > dist[i][k] + dist[k][j] then
          dist[i][j]  $\leftarrow$  dist[i][k] + dist[k][j]
          next[i][j]  $\leftarrow$  next[i][k]
```

شکل ۲- شبه کد الگوریتم فلوید-وارشال اصلاح شده

```
procedure Path(u, v)
  if next[u][v] = null then
    return []
  path = [u]
  while u  $\neq$  v
    u  $\leftarrow$  next[u][v]
    path.append(u)
  return path
```

شکل ۳- نحوه تعیین مسیر موجود بین رأس‌های *i* و *j* با استفاده از نتایج الگوریتم فلوید-وارشال اصلاح شده

به‌طورکلی دو نوع تخریب می‌تواند اتفاق بیفتد، (۱) تخریب رئوس (پست‌ها) و (۲) تخریب یال‌ها (خطوط). برای تعیین مناطقی که از تخریب رئوس شبکه دچار خاموشی می‌شوند، الگوریتم ارائه شده در جدول ۲ پیشنهاد می‌شود. در ادامه با استفاده از لایه محدوده‌های سکونت‌گاهی (مثل لایه شهرستان‌ها) و استفاده از آنالیز *Point in Polygon* می‌توان محدوده‌های دچار خاموشی را تعیین نمود. سپس جمعیت محدوده‌های دچار خاموشی تلفیق شده (*Aggregate*) و مجموع جمعیتی که در اثر تخریب المان دچار خاموشی شده‌اند مشخص می‌شود. خروجی این روش، علاوه بر میزان جمعیت تحت اثر، محدوده‌ی مکانی که در آن خاموشی ایجاد شده است نیز

برق است که این پست وظیفه‌ی تأمین انرژی آنها را بر عهده دارد (Beyza et al., 2019; Eskandari et al., 2015). طبق تعریف، دو پست شبکه مجاور هستند اگر حداقل یک یال میان آنها (خط انتقال یا فوق توزیع) وجود داشته باشد. برای اینکه شبکه در تأمین برق مناطق دچار مشکل نشود، می‌بایست گراف شبکه همبند (*Connected Graph*) باشد. گراف *G* را همبند گوییم، اگر یک مسیر بین هر دو رأس آن وجود داشته باشد. در حقیقت، باید حداقل یک یال برای هر رأس وجود داشته باشد. در صورتی که در اثر تخریب رأس (پست) و یا یال‌ها (خطوط انرژی) گراف شبکه ناهمبند (*Disconnected Graph*) شود، بخشی از مناطق دچار خاموشی خواهند شد. به‌منظور تعیین مناطقی که در اثر تخریب یک رأس یا یال گراف دچار خاموشی می‌شود، می‌بایستی تعیین شود که با از بین رفتن هر المان گراف، کدام المان‌ها نیز از مدار خارج می‌شوند. لذا می‌توان تمام رأس‌هایی که از مدار خارج می‌شوند را شناسایی و سپس با تلفیق این نتایج با تحلیل‌های مکانی، گستره مکانی تحت تأثیر را شناسایی کرد.

بدین منظور ابتدا باید تمام مسیرهای انتقال انرژی در گراف شبکه مشخص شوند. برای این کار از الگوریتم بهینه‌شده‌ی فلوید-وارشال استفاده شد. الگوریتم فلوید-وارشال یک الگوریتم مبتنی بر روش برنامه‌نویسی پویا (*Dynamic Programming*) برای محاسبه‌ی اندازه‌ی کوتاه‌ترین مسیر بین هر دو جفت گره گراف‌های وزن‌دار است (Cormen, et al., 2009; Rosen, 2003). این الگوریتم به‌صورت پیش‌فرض امکان مشخص کردن مسیرهای بین رئوس گراف را ندارد. اما می‌توان با انجام اصلاحات جزئی بر روی آن، ماتریس مسیرها را تولید کرد. ماتریس مسیرها، مسیرهای موجود در بین رأس‌های گراف را نشان می‌دهد.

ورودی این الگوریتم، ماتریس مجاورت گراف است. بنابراین خروجی‌های الگوریتم فلوید-وارشال اصلاح شده، شامل دو ماتریس (۱) اندازه مسیرها و (۲) مسیرها است. در محاسبات این تحقیق ماتریس مسیرها مورد استفاده قرار می‌گیرد. شبه کد الگوریتم فلوید-وارشال اصلاح شده در شکل ۲ ارائه شده است.

- تخریب پست ۲۳۰ کیلوولت شهرستان اهر که هم‌ارز با تخریب سه خط اهر-آگاراک ۲۳۰ کیلوولت، اهر - شفا ۲۳۰ کیلوولت و اهر - والی ۲۳۰ کیلوولت
- تخریب پست ۲۳۰ کیلوولت میانه هم‌ارز با تخریب خطوط ۲۳۰ کیلوولت میانه - تیکمه‌داش و میانه - زنجان
- تخریب پست ۱۳۲ کیلوولت جلفا هم‌ارز با تخریب چهار خط ۱۳۲ کیلوولت جلفا - ارس، جلفا - نساجی، جلفا - خوی ۳ و مرند ۲- جلفا
- تخریب پست ۲۳۰ کیلوولت تیکمه‌داش هم‌ارز با تخریب خطوط تیکمه‌داش - سردرود، میانه - تیکمه‌داش و سراب غربی- تیکمه‌داش

در تعریف سناریوهای تخریب، فرض می‌گردد پست‌ها مورد تهاجم خصمانه قرار گرفته است؛ زیرا هر پست معمولاً از چندین خط تغذیه می‌کند و تخریب تک‌خط، معمولاً باعث خارج شدن پست از مدار نمی‌شود. در صورتی که تخریب یک خط باعث گردد پستی از مدار خارج گردد، به‌منظور برآورد آسیب مکانی و جمعیتی ناشی از تخریب خط، باید پستی که در اثر تخریب خط از مدار خارج شده است، بررسی گردد. با توجه به اینکه شرایط جنگی شبیه‌سازی شده، بدترین حالت در هر سناریو یعنی تخریب کامل کل محدوده زیرمجموعه در نظر گرفته می‌شود.

۵- نتایج

در این تحقیق از نرم‌افزار ArcGIS10.4.1، به دلیل ضریب نفوذ بالا، سادگی استفاده و ابزارهای کارتوگرافی پیشرفته استفاده شد. در این تحقیق از ساختار File Geodatabase برای ذخیره‌سازی داده‌های تحقیق استفاده شد. در شبکه‌های قدرت، وظیفه‌ی خطوط برق متصل کردن پست‌های مختلف به همدیگر است. برای بررسی و محاسبه‌ی محدوده مکانی و جمعیتی آسیب‌پذیر در اثر تخریب هر خط، باید پستی که در اثر تخریب خط، از شبکه خارج می‌گردد مورد بررسی قرار گیرد. لذا سناریوهای تخریب صرفاً برای تخریب پست‌ها تعریف و تحلیل شدند.

۵-۱- سناریوی اول: تخریب پست ۲۳۰ کیلوولت

برآورد می‌کند. در این تحقیق، تحلیل‌ها در سطح خطوط و پست‌های انتقال و فوق توزیع انجام می‌شود. لذا چهار سناریوی مختلف تخریب برای تعیین محدوده‌ی جغرافیایی و جمعیت متأثر از وقوع سناریوی تخریب، تعریف می‌شود.

جدول ۲- الگوریتم تعیین نودهای خاموش شبکه

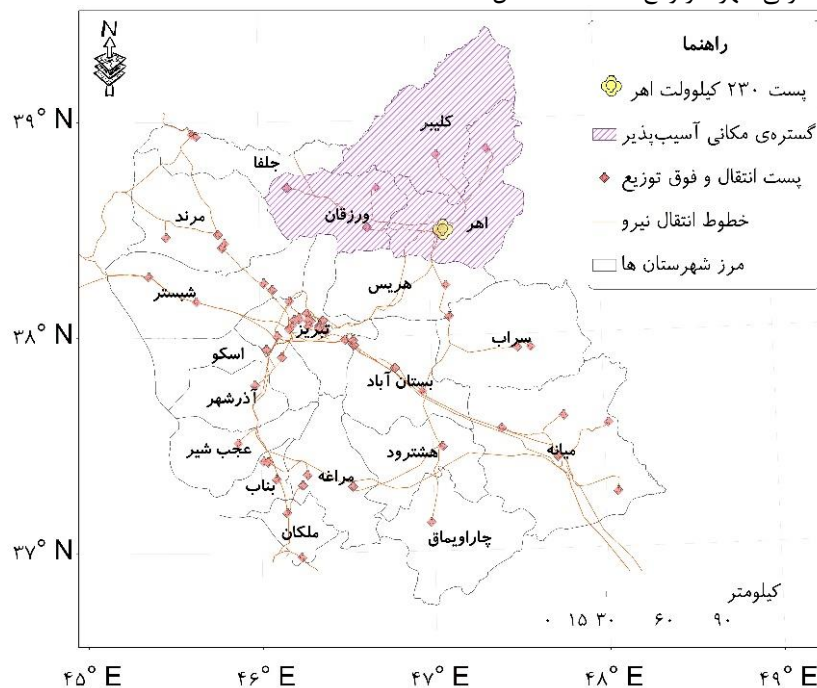
مرحله	عملیات
ورودی	۱- ماتریس مجاورت شبکه ۲- المان(های) تخریب شده
۱	اجرای الگوریتم اصلاح‌شده‌ی فلوید- وارshall به‌منظور تعیین تمام مسیرهای موجود در گراف شبکه
۲	نودهای تخریب شده در ارائه نودهای خاموش ذخیره می‌شود
۳	اگر یالی از شبکه هم تخریب شده باشد؛ آنگاه نود(های) که در انتهای یال(های) تخریب شده قرار دارد
۴	(با توجه به جهت جریان و گراف شبکه)، در آرایه نودهای خاموش ذخیره می‌شوند.
۵	برای هر نود در آرایه نودهای خاموش:
۶	تمامی مسیرهایی که با نود تخریب شده شروع می‌شود استخراج می‌شوند.
۷	استخراج نودهای مسیرهای استخراج شده در مرحله قبل و ذخیره در ماتریس نودهای خاموش احتمالی
۸	برای تمام نودهای موجود در آرایه نودهای خاموش احتمالی (for)
۹	استخراج مسیرهایی که نود خاموش احتمالی در آنها حضور دارد ولی در جایگاه شروع مسیر نیست. (مسیرهایی از نود خاموش احتمالی شروع نمی‌شود)
۱۰	اگر در مسیرهای فوق، نودهایی جدیدی مشاهده شود (نودی که در آرایه نودهای خاموش احتمالی وجود ندارد)، این نود به نود آرایه خاموش احتمالی اضافه می‌شود)
۱۱	اگر مسیرهای مرحله ۶، مسیری که در آن نود تخریب‌شده در جایگاهی قبل از نود خاموش احتمالی مشاهده نشود، نود مذکور دچار خاموشی نمی‌شود و از آرایه نودهای خاموش احتمالی حذف می‌شود.
	در صورتی که شرط فوق برقرار نباشد، نود قرار داشته باشد، نود مذکور در آرایه نودهای خاموش ذخیره می‌شود
۱۲	آرایه نودهای خاموش به‌عنوان خروجی گزارش می‌شود

برآورد آسیب پذیری مکانی و جمعیتی ناشی از تخریب زیرساخت های انتقال نیرو در اثر حملات خصمانه با GIS

شهرستان اهر

ارتباطات این پست با سایر المان های شبکه برق بر اساس روش پیشنهادی استخراج و در جدول ۳ بیان شده است.

در این سناریو، پست ۲۳۰ کیلوولت اهر که در حاشیه ی شهر اهر، در ابتدای جاده ی اهر به کلیر بررسی شد. این پست از نظر جغرافیایی در شمال شرقی شهر اهر واقع شده است (شکل ۴).



شکل ۴- گستره ی مکانی آسیب پذیر ناشی از وقوع سناریوی تخریب شماره یک، تخریب پست ۲۳۰ کیلوولت اهر

جدول ۳- ارتباطات پست ۲۳۰ اهر^۱ که در سناریوی تخریب شماره یک آسیب دیده است

المان آسیب دیده	المان مرتبط	ارتباط المان	تأمین برق از المان دیگر
پست ۲۳۰ اهر	پست ۶۳ کلیر	ندارد	خیر
	پست ۶۳ هوراند	ندارد	خیر
	پست ۲۳۰ آگاراک	-----	-----
	پست ۲۳۰ سنگون	ندارد	خیر
	پست ۲۳۰ شفا	دارد	از پست ۲۳۰ شفا
	پست ۲۳۰ والی	دارد	از پست ۲۳۰ والی
	پست ۲۳۰ هریس	دارد	از پست ۶۳ مهربان
	پست ۶۳ مهربان	دارد	از پست ۲۳۰

پست ۲۳۰ اهر

المان آسیب دیده	المان مرتبط	ارتباط	تأمین برق از المان دیگر
			تیکمه داش
پست ۶۳ سیلو	ندارد	خیر	
پست ۶۳ ورزقان	پست ۶۳	خیر، آخرین المان شبکه است	خاروانا

^۱ واحد اعداد ذکر شده در جدول کیلوولت است.

با توجه به جدول ۳، با خارج شدن پست ۲۳۰ کیلوولت اهر از مدار در اثر حملات خصمانه، پست های تأمین کننده ی برق شهرستان های کلیر، هوراند، ورزقان، معدن مس سنگون و سیلوی اهر از مدار خارج می شوند؛ زیرا خطوط ارتباطی این پست ها صرفاً منتهی به پست ۲۳۰ کیلوولت اهر است و از مسیر دیگری تغذیه نمی شوند. به دلیل ارتباط پست های مهربان و هریس با پست ۲۳۰ کیلوولت تیکمه داش، در صورت خروج پست اهر از مدار، قادر به

ارتباط هستند، مورد بررسی قرار گرفتند که آیا امکان تأمین برق این المان‌ها بعد تخریب پست ۲۳۰ کیلوولت، از طریق سایر بخش‌های شبکه وجود دارد یا نه.

با توجه به نتایج تحلیل مکانی مشاهده می‌شود که تخریب این پست در اثر حملات خصمانه باعث ایجاد خاموشی در شهرستان میانه خواهد شد (شکل ۵). نتایج این سناریوی تخریب نشان داد که با از بین رفتن پست ۲۳۰ کیلوولت میانه، شهرستان میانه دچار خاموشی خواهد شد. همچنین تمامی زیرساخت‌های موجود در این منطقه مانند فولاد میانه که از صنایع سنگین منطقه است، به دلیل قطع برق، از کار خواهند افتاد. جمعیت آسیب‌پذیر در این سناریو برابر با ۱۸۶۰۰۰ نفر است. همچنین محدوده‌ی مکانی آسیب‌پذیر که در شکل ۵ نشان داده شده است برابر با ۵۷۰۵ کیلومتر مربع است.

جدول ۴- ارتباطات پست ۲۳۰ میانه^۱ که در سناریوی تخریب شماره دو آسیب‌دیده است

المان	المان مرتبط	ارتباط المان مرتبط	تأمین برق از المان دیگر
خط ۲۳۰ میانه- زنجان	دارد	عدم اثر در خاموشی استان	
پست ۶۳ فولاد میانه	ندارد	خیر	
پست ۶۳ کاغذ کنان	ندارد	خیر	
پست ۶۳ خلخال	ندارد	خیر	
پست ۶۳ ترک	پست ۶۳ ترکمانچای	خیر	
پست ۲۳۰ تیکه داش	دارد (چندگانه)	بله	

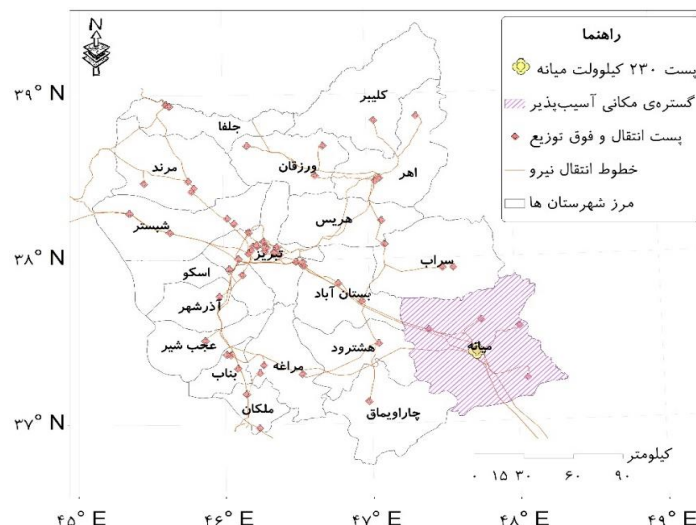
^۱ واحد اعداد ذکر شده در جدول کیلوولت است.

تأمین برق محدوده‌ی تحت پوشش خود خواهد بود. بنابراین محدوده‌ی آسیب‌پذیر ناشی از تخریب پست ۲۳۰ کیلوولت اهر شامل شهرستان‌های اهر، کلیبر و ورزقان خواهد بود. این محدوده در شکل ۴، نشان داده شده است.

با از بین رفتن پست ۲۳۰ کیلوولت اهر، شهرستان‌های اهر، کلیبر و ورزقان دچار خاموشی خواهند شد. همچنین تمامی زیرساخت‌های موجود در این مناطق مانند سیلو (که برای تأمین غذای مردم مورد نیاز است) و صنایع بزرگ مانند معدن مس سونگون با قطعی برق مواجه خواهند شد. جمعیت آسیب‌پذیر در این سناریو برابر با مجموع جمعیت ساکن در مناطق خوی است که با توجه به اطلاعات ذخیره شده در پایگاه داده‌ی مکانی برابر با ۲۸۷۰۰۰ نفر است. همچنین در اثر تخریب این المان، در مجموع پهنه‌ای به وسعت ۹۱۹۰ کیلومتر مربع دچار خاموشی خواهند شد. همچنین در اثر این تخریب ارتباط شبکه برق با پست آگاراک که برای صادرات و واردات برق مورد استفاده قرار می‌گیرد، قطع خواهد شد که خود به منزله‌ی اختلال در فرایند صادرات و واردات کشور است.

۵-۲- سناریوی دوم: تخریب پست ۲۳۰ کیلوولت میانه

تخریب این پست معادل تخریب خطوط ۲۳۰ کیلوولت میانه- تیکمه‌داش و ۲۳۰ کیلوولت میانه- زنجان است. این پست در شهرستان میانه، ابتدای جاده تهران واقع شده است. به‌منظور برآورد پهنه‌ی آسیب‌پذیر ناشی از تخریب این پست، تمامی ارتباطات این پست بر اساس روش پیشنهادی استخراج و در جدول ۴ ارائه شده است. به‌منظور تعیین دقیق مناطقی که در اثر تخریب این پست در آنها خاموشی صورت می‌گیرد، ارتباطات پست تا دو مرحله تحلیل شد. به‌عبارت دیگر المان‌ها و پست‌های دیگری که با این پست در



شکل ۵- گستره مکانی آسیب پذیر ناشی از وقوع سناریوی شماره دو، تخریب پست ۲۳۰ کیلوولت میانه

در صورتی که پست ۱۳۲ کیلوولت جلفا بر اثر حمله خصمانه از مدار خارج گردد تمامی زیرساخت های موجود در پهنه ی جغرافیایی به مساحت ۱۷۲۰ کیلومترمربع، دچار خاموشی خواهد شد که در مجموع ۵۵۲۰۰ نفر را تحت تأثیر قرار می دهد. همچنین این تخریب می تواند باعث از کارافتادن قطار برقی تبریز - جلفا گردد که از زیرساخت های مهم و اساسی منطقه است.

جدول ۵- ارتباطات پست ۱۳۲ جلفا^۱ که در سناریوی تخریب شماره سه آسیب دیده است

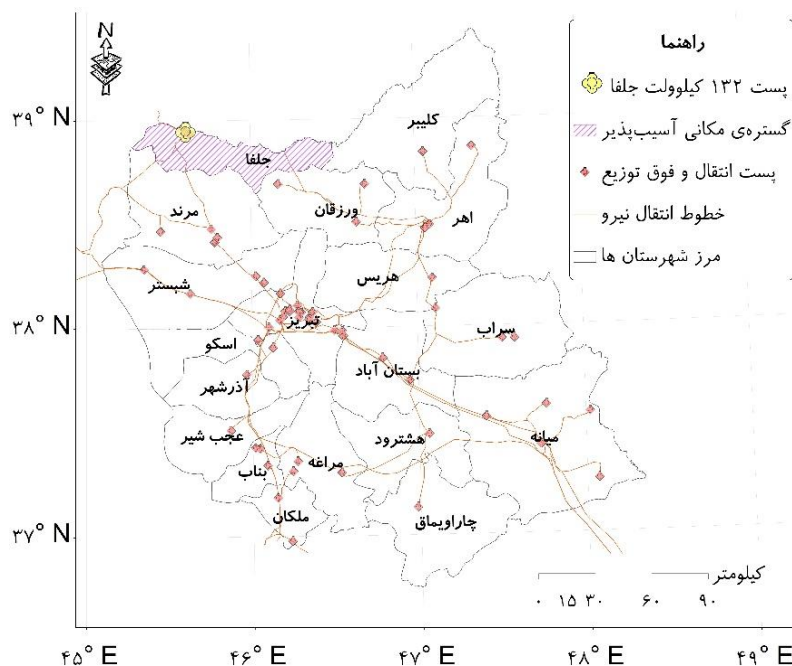
المان آسیب دیده	المان مرتبط	ارتباط المان مرتبط	تأمین برق از المان دیگر
پست راه آهن جلفا- تبریز	ندارد	ندارد	ندارد
پست ۱۳۲ ارس	دارد	دارد	دارد
پست ۱۳۲ مرند	دارد	دارد	دارد
پست ۱۳۲ خوی سه	دارد (چندگانه)	بله	

^۱ واحد اعداد ذکر شده در جدول کیلوولت است.

۵-۳- سناریوی سوم: تخریب پست ۱۳۲ کیلوولت جلفا

تخریب چهار خط ۱۳۲ کیلوولت جلفا - ارس، جلفا - نساجی، جلفا - خوی ۳ و مرند ۲ - جلفا، معادل با تخریب پست ۱۳۲ کیلوولت جلفا است. این پست در شمال استان و در شمال غربی شهر جلفا واقع شده است. در این بخش، محدوده ی جغرافیایی و همچنین تعداد جمعیت آسیب پذیر ناشی از این تخریب بررسی شدند. در این سناریو نیز مانند سناریوهای قبل، تمامی ارتباطات این پست با سایر المان های شبکه برق و امکان تأمین برق المان های مرتبط به این المان از مسیرهای دیگر شبکه، با روش پیشنهادی استخراج شد. نتایج حاصل از این تحلیل در جدول ۵ ارائه شده است.

با توجه به موارد ذکر شده در جدول ۵، تمامی المان هایی که این پست با آنها ارتباط دارد، خود دارای ارتباط با سایر المان های شبکه هستند و در صورت خروج این پست از مدار می توانند برق مورد نیاز خود را از مسیرهای دیگر تأمین کنند. تنها المانی که با خروج این المان از خط، قادر به تأمین برق نخواهد بود، پست راه آهن جلفا - تبریز است. بنابراین محدوده ی خاموشی ناشی از تخریب این پست برابر با محدوده ی شهرستان جلفا خواهد بود که در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- گستره‌ی مکانی آسیب‌پذیر ناشی از وقوع سناریوی شماره سه، تخریب پست ۱۳۲ کیلوولت جلفا

قره‌آغاج است؛ به این معنا که با از بین رفتن پست تیکمه داش پست‌های ۶۳ کیلوولت هشت‌رود، خراجو و قره‌آغاج از شبکه خارج می‌شوند (شکل ۷).

جدول ۶- ارتباطات پست ۲۳۰ تیکمه‌دش^۱ که در سناریوی تخریب شماره چهار آسیب‌دیده است

آسیب‌دیده	المان مرتبط	ارتباط المان مرتبط	تأمین برق از المان دیگر
پست ۲۳۰ سردرود	دارد	دارد	دارد
پست ۶۳ بستان‌آباد	دارد	دارد	دارد
پست ۶۳ سعیدآباد	دارد	دارد	دارد
پست ۶۳ مهربان	دارد	دارد	دارد
پست ۶۳ سراب غربی	دارد	دارد	دارد
پست ۶۳ ترکمانچای	دارد	دارد	دارد
پست ۲۳۰ میانه	دارد	دارد	دارد
پست ۶۳ هشت‌رود	دارد	ندارد	ندارد

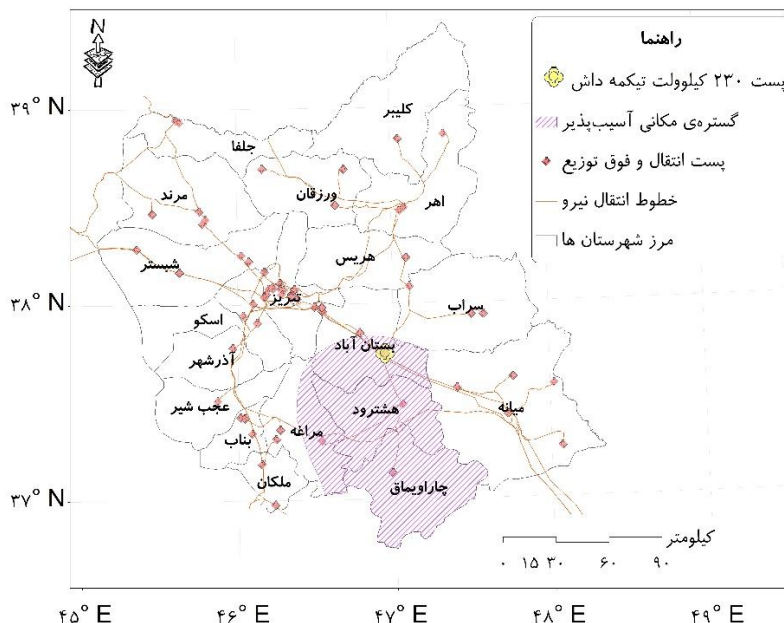
پست ۱۳۲ تیکمه‌دش

۵-۴- سناریوی چهارم: تخریب پست ۲۳۰ کیلوولت تیکمه‌دش

این سناریو هم‌ارز با تخریب خطوط تیکمه‌دش - سردرود، میانه - تیکمه‌دش و سراب غربی - تیکمه‌دش است. پست ۲۳۰ کیلوولت تیکمه‌دش در نزدیکی شهر تیکمه‌دش، در مسیر جاده قدیم تبریز به تهران قرار دارد. موقعیت مکانی این پست در شبکه برق در استان آذربایجان شرقی در شکل ۷ نشان داده شده است. این پست ارتباطات متعددی با سایر المان‌های شبکه‌ی برق دارد که به‌منظور تعیین محدوده‌ی مکانی آسیب‌پذیر ناشی از تخریب این المان، با روش پیشنهادی بررسی شدند و نتایج این بررسی در جدول ۶ بیان شده است.

پست تیکمه‌دش با هشت پست دیگر ارتباط دارد. بررسی شبکه برق نشان داد که از این میان هفت پست توانایی تأمین برق مورد نیاز خود را از مسیرهای دیگر شبکه‌ی برق دارند. تنها پستی که فقط از پست تیکمه‌دش تغذیه می‌گردد و با پست‌های دیگر ارتباطی ندارد، پست ۶۳ کیلوولت هشت‌رود است. پست ۶۳ کیلوولت هشت‌رود تنها تغذیه‌کننده‌ی پست‌های ۶۳ کیلوولت خواجه و ۶۳ کیلوولت

^۱ واحد اعداد ذکر شده در جدول کیلومتر است.



شکل ۷- گستره‌ی مکانی آسیب‌پذیر ناشی از وقوع سناریوی شماره چهار، تخریب پست ۲۳۰ کیلوولت تیکمه‌داش

را دو چندان می‌کند. به‌منظور شناسایی علت این امر شبکه به‌صورت دقیق‌تر بررسی شد. نتایج نشان داد که هر اندازه مرتبه‌ی خروجی المان تخریب شده بالاتر باشد (برق تأمین انرژی تعداد بیشتری از پست‌های (رأس‌های) پایین‌دست شبکه را بر عهده داشته باشد) اثر و گستره‌ی آسیب‌پذیری ناشی از تخریب آن پست نیز بیشتر خواهد بود.

همچنین نتایج نشان می‌دهد، هر قدر المان‌های شبکه مرتبه‌ی ورودی پایین‌تری داشته باشد، در صورت تخریب المان(های) بالادستی به راحتی دچار خاموشی می‌شوند. به عبارت دیگر در سناریوی دو، چهار المان به دلیل اینکه صرفاً دارای مرتبه ۱ هستند و فقط مرتبط به پست تخریب شده در سناریوی دو می‌باشند، بعد از تخریب پست بالادستی دچار خاموشی شده‌اند.

مضافاً هر قدر مرتبه‌ی ورودی نودهای شبکه بیشتر از ۱ باشد، در اثر تخریب پست بالادستی، آن المان توانایی تأمین برق خود از طرق مسیرهای دیگر را خواهد داشت و به راحتی دچار خاموشی نمی‌شود. این مهم، توسط نتایج سناریوهای ۳ و ۴ تأیید شده است. برای نمونه از هشت پست مرتبط با

با توجه به خارج شدن پست‌های ۶۳ کیلوولت خراجو و قره‌آغاج از مدار به هنگام تخریب پست ۲۳۰ کیلوولت تیکمه‌داش، در مجموع ۷۸۳۹ کیلومترمربع در استان آذربایجان شرقی دچار خاموشی خواهد شد. مجموع افراد آسیب‌پذیر ناشی از این سناریوی تخریب برابر با ۱۶۰۰۰ نفر خواهد بود.

۶- بحث

هدف این تحقیق برآورد میزان آسیب‌پذیری مکانی - جمعیتی از تخریب زیرساخت‌های انتقال نیرو در اثر حملات خصمانه است. در این راستا روشی بر مبنای تئوری گراف توسعه داده شد. روش توسعه داده شده به‌منظور ارزیابی در چهار سناریوی مختلف مورد استفاده قرار گرفت. طبق نتایج، آسیب‌پذیری مکانی و جمعیتی ناشی از سناریوی اول (تخریب پست ۲۳۰ کیلوولت اهر) بیشتر از سناریوهای دیگر است. همچنین علاوه بر محدوده‌ی وسیع و تعداد افراد بالای تحت تأثیر این المان، تغذیه‌ی مستقیم سیلوی گندم که از المان‌های مهم در زمان‌های بحرانی است، اهمیت این المان

۷- نتیجه گیری

پدافند غیرعامل از اولویتهای دفاعی، مهم و امنیتی کشور بوده و همواره توصیه شده که برنامه ریزی ها با رویکرد پدافند غیرعامل همراه شوند. این تحقیق به منظور برآورد میزان آسیب پذیری مکانی و جمعیتی ناشی از تخریب المان های شبکه برق در گستره ای استان آذربایجان شرقی انجام شد. با توجه به عدم دسترسی به داده های تمامی زیرساخت ها، در این تحقیق یک روش غیرمستقیم، با استفاده از قابلیت های سیستم اطلاعات مکانی و مفاهیم پدافند غیرعامل و تئوری گراف، برای تعیین اهمیت المان های زیرساخت برق ارائه شد. روش ارائه شده مبتنی بر سه پارامتر المان های شبکه برق (مانند پست انتقال)، سناریوی تخریب خصمانه در گستره جغرافیایی و میزان جمعیت متأثر می باشد. در این تحقیق چهار سناریو به منظور آزمون روش پیشنهادی تعریف و آسیب پذیری مکانی و جمعیتی ناشی از هر سناریو برآورد شد. تعریف سناریوها با توجه به بررسی المان هایی که در عملیات نظامی بیشتر مورد تهاجم قرار گرفته انجام شد. بررسی تاریخ عملیات موفق نظامی، نشان داد که تخریب پست های برق بیشترین تأثیر را در ایجاد خاموشی خواهد داشت. در این تحقیق نیز، در سناریوها فرض شد، پست ها مورد تهاجم خصمانه قرار گرفته اند. سناریوهای لحاظ شده در زیرساخت برق، خطوط انتقال ۴۰۰ و ۲۳۰ کیلوولت و خطوط فوق توزیع ۱۳۲، ۶۳ و ۲۰ کیلوولت به همراه پست های مربوط در استان آذربایجان شرقی پیاده سازی شد. در پیاده سازی این تحقیق، تحقیق داده های شبکه برق، موقعیت و آمار جمعیتی سکونتگاه ها استفاده شد.

نتایج تحقیق نشان داد که با تخریب پست شهرستان اهر پهنه ای به وسعت ۹۱۹۰ کیلومتر مربع دچار خاموشی شده و ۲۸۷۰۰۰ نفر تحت تأثیر قرار خواهند گرفت. با تخریب پست های شهرستان های میانه، جلفا و تیکمه داش به ترتیب ۵۷۰۵، ۱۷۲۰ و ۷۸۳۹ کیلومتر مربع دچار خاموشی شده و ۱۸۶۰۰۰، ۵۵۲۰۰ و ۱۶۰۰۰۰ نفر تحت تأثیر قرار خواهند گرفت. بررسی نتایج چهار سناریوی لحاظ شده نشان می دهد که آسیب پذیری مکانی و جمعیتی ناشی از سناریوی اول

پست تخریب شده سناریوی ۴، فقط یک پست دچار خاموشی می شود. بنابراین پرواضح است که پست های دارای مرتبه ورودی بالاتر، ضریب اطمینان بیشتری نیز داشته و احتمال خاموشی آنها در اثر تخریب پست بالاتر کمتر است. لذا محدوده ی تحت پوشش آنها آسیب پذیری مکانی - جمعیتی کمتری دارند. همچنین در تمام سناریوها محدوده ی تحت پوشش پست هایی که مرتبه ی ورودی و خروجی آنها به ترتیب برابر با یک و صفر است، آسیب پذیرترین مکان ها هستند، زیرا منطقه ی تحت پوشش آنها با تخریب همان پست دچار خاموشی شده و امکان تأمین برق از سایر قسمت های شبکه را ندارد.

در موارد بررسی شده، مختل شدن فقط چند رأس ممکن است منجر به ریزش کامل در برخی مناطق مهم شود و با وابستگی سیستم ها به یکدیگر آسیب پذیری ها افزایش یابد. لذا برای کاهش آسیب پذیری در هنگام وقوع حملات عمدی، باید از مناطق مهم یک شبکه محافظت بیشتری انجام شود (Wang et al., 2018). البته استراتژی های مختلفی به منظور مقاوم سازی و افزایش امنیت پست های برق ارائه شده است (Muhammad et al., 2019).

با توجه به مراحل انجام گرفته در تحلیل سناریوهای فوق الذکر، از این الگو می توان برای تمامی المان های دیگر شبکه نیز استفاده کرد. در این روش محدوده ی مکانی و تعداد افرادی که به دلیل تخریب هر یک از المان های مختلف، از پوشش شبکه برق خارج می گردد محاسبه می شود. می توان با همپوشانی محدوده های آسیب پذیر تولید شده در این روش، با نقشه ی سایر زیرساخت ها، المان های مربوط به سایر زیرساخت ها را که به دلیل حملات خصمانه به شبکه ی برق دچار کمبود برق می گردند را شناسایی نمود. نتایج این تحقیق نشان می دهد که تئوری گراف در تعیین در ارزیابی و شناسایی زیرساخت های آسیب پذیری مکانی - جمعیتی شبکه برق قابلیت بالایی دارد. این نتیجه در تحقیقاتی که صرفاً مسئله مکانی تحقیق را مد نظر قرار داده بودند نیز مشاهده شده است (Beyza et al., 2019; Wang et al., 2017).

برآورد آسیب‌پذیری مکانی و جمعیتی ناشی از تخریب زیرساخت‌های انتقال نیرو در اثر حملات خصمانه با GIS

آسیب‌پذیری اجتماعی (Social Vulnerability Index) یز استفاده گردد.

(تخریب پست ۲۳۰ کیلوولت اهر) بیشتر از سناریوهای دیگر است.

خروجی این روش تعداد افراد و محدوده‌ی جغرافیایی متأثر از تخریب المان‌های شبکه برق بود که در قالب نقشه‌های آسیب‌پذیری ارائه شد. این تحقیق علاوه بر کاربرد داشتن در برنامه‌ریزی برای کاهش آسیب‌های ناشی از حملات خصمانه، می‌تواند در برنامه‌ریزی برای مقابله با بحران‌های طبیعی نیز کاربرد داشته باشد. برای نمونه به اعمال ریسک زلزله، می‌توان خاموشی‌های ناشی از زلزله را محاسبه کرد.

روش ارائه شده در این تحقیق را می‌توان در تمامی شبکه‌های برق مورد استفاده قرار داد. تحقیق حاضر به دلیل کاربردی بودن دامنه‌ی گسترده‌ای دارد و می‌توان اثرات ناشی از تخریب هر المان را در سایر زیرساخت‌ها نیز برآورد کرد. اما به دلیل بعد امنیتی برخی از داده‌ها، در این تحقیق صرفاً بعد مکانی و جمعیتی ناشی از تخریب المان‌های شبکه برق بررسی شد که در آن میزان بار شبکه و تحمل انتقال انرژی خطوط و پست‌ها در بررسی خاموش‌ها در نظر گرفته نشده است. پیشنهاد می‌گردد برای تحقیقات آتی این مهم در نظر گرفته شود. به عبارتی با توجه به توانایی خطوط سایر المان‌ها بررسی شود که در صورت تخریب هر المان، کدام بخش شبکه علی‌رغم داشتن ارتباط فیزیکی، به دلیل پایین بودن توان انتقال شبکه بالادستی دچار خاموشی می‌شوند. در این تحقیق سناریوهای مختلف با تخریب یک المان از شبکه بررسی شده است. اما پیشنهاد می‌گردد تحلیل تاب‌آوری شبکه در صورت تخریب هم‌زمان چند المان (پست یا خط) بررسی شود. همچنین توصیه می‌شود با برآورد میزان احتمال بروز مخاطرات طبیعی، الزامات لازم برای مقابله با این مخاطرات نیز بررسی شود. محققین می‌توانند از این الگو در سایر زیرساخت‌ها مانند شبکه‌ی ارتباطات بی‌سیم و شبکه‌ی آب‌رسانی استفاده کرده و برای برآورد میزان آسیب ناشی از تخریب هر المان و تأثیر آن در جمعیت محدوده‌ی اثر، از شاخص‌های مطرح در مطالعات اجتماعی از جمله

۸- مراجع

- [1] Abedi, A., Gaudard, L., & Romerio, F. (2019). Review of major approaches to analyze vulnerability in power system. *Reliability Engineering & System Safety*, 183, 153-172. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.11.019>
- [2] Adelpour, M., & Ghasemi, H. (2012). Essentials of Passive Defense in Electric Power Systems. Paper presented at the 20th Iranian Conference of Electrical Engineering
- [3] Amanpour, S., Mohamadi Deh Cheshme, M., & Alizadeh, M. (2016). Evaluating Vulnerability of Kuhdasht Urban Infrastructure's through Passive Defense Approach. *Town and Country Planning*, 8(1), 133-154. Retrieved from 10.22059/jtcp.2016.59145
- [4] Arash, B., & E., S. (2014). An Analytical Approach to the Issue of Passive Defense in Relation with Preservation of Urban Elements. *Current World Environment*, 26(28), 350-360. Retrieved from 10.12944/cwe9.2.15
- [5] Beyza, J., Garcia-Paricio, E., & Yusta, J.M. (2019). Ranking critical assets in interdependent energy transmission networks. *Electric Power Systems Research*, 172, 242-252. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.03.014.9301063>
- [6] Biranvand, M., & Momeni, k. (2019). Zoning of residential areas with passive defense approach in the direction of citizens' security in GIS environment (Case study: Dezful city). *Journal of Disciplinary Geography*, 7(25), 1-20. Retrieved from <https://www.sid.ir/fa/Journal/ViewPaper.aspx?id=528242>
- [7] Cormen, T.H., Leiserson, C.E., Rivest, R.L., & Stein, C. (2009). Introduction to algorithms: MIT press
- [8] Eesfahani, A.M. (2015). Architectural design requirements and standards in passive defense *Cumhuriyet Science Journal*, 36(4), 859-871. Retrieved from <https://docplayer.net/153283407-Architectural-design-requirements-and-standards-in-passive-defense.html>
- [9] Eskandari, M., Omidvar, B., & Sani, M.S.T. (2015). Loss estimation of interdependent infrastructures in targeted attacks. *Emergency Management*, 3(Passive Defense Week Special Issue), 19-30. Retrieved from http://www.joem.ir/article_11585_3595ebc57b2c3e481500d5e5419dc81b.pdf
- [10] Gholamreza, Z. & Sajjad, A. (2018). Vulnerability assessment of cities with passive defense approach using IHWP method & GIS (case study: Tehran). *Safe city*, 1(2). Retrieved from <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=484813>
- [11] Hasanali, F.S., Morteza, O., Mahdi, M. & Amir, B. (2015). Providing a model for zoning of Ahvaz City based on Sorting of alternatives by similarity to profile (SSP). *Emergency Management*, 3(2), 45-56. Retrieved from http://www.joem.ir/article_12751_8c7f7ee728f28d7306dcbf8228ad4bbc.pdf
- [12] Hawchar, L., Naughton, O., Nolan, P., Stewart, M.G., & Ryan, P.C. (2020). A GIS-based framework for high-level climate change risk assessment of critical infrastructure. *Climate Risk Management*, 29, 100235. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.crm.2020.100235>
- [13] Hejazi, S. J. (2015). Evaluation and Analysis of Passive Defense Structure Requirements in Ahvaz Metro System. *Passive Defense Quarterly*, 7(2). Retrieved from <http://journals.i.hu.ac.ir/index.php/pd/article/view/6354>

- [14] Kamran, H., Amini, H., & Hossaini Amini, H. (2013). Application of passive defense in urban housing planning. *Urban - Regional Studies and Research Journal*, 4(15), 21-24, Retrieved from <https://www.sid.ir/en/Journal/ViewPaper.aspx?ID=341164>
- [15] Kia, M., & Aalami, H.A. (2014). A New Approach for Optimal Location of Power Dispatching Centers Based on Passive Defence Criteria Using EAHP. *Scientific Journal of Advanced Defense Science and Technology*, 5(1), Retrieved from <http://journals.ihu.ac.ir/index.php/adst/article/view/6064>
- [16] Lacavalla, M., Marcacci, P. & Frigerio, A. (2015). Forecasting and monitoring wet-snow sleeve on overhead power lines in Italy. Paper presented at the Environmental, Energy and Structural Monitoring Systems (EESMS), 2015 IEEE Workshop on
- [17] Latter, A.L., & Martinelli, E. (1965). Active and Passive Defense. RAND Corporation. Retrieved from <https://www.rand.org/pubs/papers/P3165-1.html>
- [18] Liu, W. & Song, Z. (2020). Review of studies on the resilience of urban critical infrastructure networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 193, 106617, Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.res.2019.106617>
- [19] Mahmoud, K. (2008) day war day count: first to tenth day. Retrieved from <https://rasekhoon.net/article/show/140435/روز-شمار-جنگ-۳۳-روزه-روز-اول-تا-دهم>
- [20] Muhammad, P. & Reza, D. (2019). Reinforcing Power Network Infrastructures by Employing Passive Defense Applications. *Passive Defense Quarterly*, 9(4), 57-67, Retrieved from https://pd.ihu.ac.ir/article_204449.html
- [21] Nateghi, R., Guikema, S.D. & Quiring, S.M. (2014). Forecasting hurricane-induced power outage durations. *Natural hazards*, 74(3), 1795-1811, Retrieved from 1/0.1007s11069-014-1270-9
- [22] Ramezani, A., Malek, M., Sahami, H. & Hosnavi, R. (2018). Developing a spatial methodology to reduce the vulnerability of critical infrastructures against intelligent air-based threats. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 23, 126-138, Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2018.10.001>
- [23] Rehak, D. (2020). Assessing and strengthening organisational resilience in a critical infrastructure system: Case study of the Slovak Republic. *Safety Science*, 123, 104573, Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.104573>
- [24] Rosen, K.H. (2003). Mandatory Package: Discrete Mathematics and Its Applications. In (5th Edition ed.): McGraw-Hill Science/Engineering/Math
- [25] Shvani, N. (2019). Identification of Urban Vulnerability Indicators in Ilam City against Environmental Hazards with an Emphasis on Passive Defense Approach. *Safe city*, 7, 1-15. Retrieved from <http://ispdrc.ir/http-ispdrc-ir-%D9%85%D9%82%D8%A7%D9%84%D9%87-7-5>
- [26] Thomas, W. (2001). The Ethics of Destruction: Norms and Force in International Relations (1 ed.): Cornell University Press.
- [27] Velayati, M.H., & Ghaffarpour, R. (2015). Enhance the Passive Defense of Power System Networks Using Prediction Damping, Type and Location of Power System's Oscillations. *Scientific Journal of Advanced Defense Science and Technology*, 6(1), Retrieved from <http://journals.ihu.ac.ir/index>

php/adst/article/view/7866 .

- [28] Wang, S., Stanley, H.E., & Gao, Y. (2018). A methodological framework for vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems under deliberate attacks. *Chaos, Solitons & Fractals*, 117, 21-29. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2018.10.011>
- [29] Wang, S., Zhang, J., Zhao, M. & Min, X. (2017). Vulnerability analysis and critical areas identification of the power systems under terrorist attacks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 473, 156-165. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.01.003>.
- [30] Zio, E. (2016). Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures. *Reliability Engineering & System Safety*, 152, 137-150, Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.res.2016.02.009>.

Estimation of Spatial and Demographic Vulnerability Due to Destruction of Transmission Infrastructure in Hostile Attacks by GIS

Saeed Mehri¹, Navid Hooshangi^{2*}

Abstract

The dependence of human activities on the electrical energy infrastructure has increased the strategic importance of this infrastructure. The examination of various military operations shows that the power network has always been the focus of hostile attacks on this infrastructure. Understanding the destruction effects on various parts of the electric network as a result of hostile attacks, identifies important elements and provides the possibility of forecasting and planning passive and active defense strategies. The main purpose of this study is to estimate the spatial-demographic vulnerability of East Azerbaijan province due to the destruction of power transmission infrastructure. To this end, a new method based on the use of Geospatial Information System (GIS), graph theory and passive defense concepts is proposed and it is determined that if a part of an infrastructure is damaged by hostile attacks, what geographical area and how many populations will be deprived of the services of that infrastructure. The proposed method has been applied in four different hypothetical scenarios (destruction of substations in Ahar, Miyaneh, Jolfa and Tikmeh Dash) in terms of spatial and demographic dimensions to identify the effective elements of simulated power transmission network of East Azerbaijan in Iran.

The results of the research show that the spatial and demographic vulnerabilities of the first scenario (degradation of the 230 kV substations) are greater than the other scenarios. With the destruction of the Ahar city power station, an area of 9190 square kilometers will suffer from power outages and 287,000 people will be affected. Compared to the destruction of substations in Ahar city, the destruction extent of substations in Miyaneh, Jolfa and Tikmeh cities was 37%, 81% and 15% in terms of power outages area and 35%, 81% and 44% in terms of population, respectively. The proposed method provides the possibility of testing and estimating the effects of destruction of various scenarios and the model created in other infrastructures such as oil and gas lines can also be used. The study of the proposed method showed that graph theory has a high capability in determining, evaluating and identifying the infrastructure of spatial-demographic vulnerability of the electricity network.

Key Words: Graph Theory, The Spatial-Demographic Vulnerability, Power Transmission Network, Passive Defense

* Corresponding author: Navid Hooshangi, Tehran, Iran