

## ارزیابی کمی میزان خطرپذیری شبکه تأمین انرژی الکتریکی شهرها در برابر مخاطرات و تهدیدات گوناگون

سید جلال حسینی<sup>۱</sup>، مهدی صمدی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نیشابور ۲- استادیار، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

(دریافت: ۹۷/۰۳/۲۷، پذیرش: ۹۷/۰۹/۰۳)

### چکیده

هدف از این مقاله، ارائه روشی جدید برای ارزیابی میزان خطرپذیری سیستم قدرت در برابر تهدیدات گوناگون است. این تهدیدات ممکن است در اثر بلایای طبیعی یا حملات تروریستی، شبکه تأمین انرژی الکتریکی را با مشکلات جدی مواجه سازد. در این راستا، عوامل اصلی تعیین کننده اهمیت یک منطقه شناسایی و در قالب ۱۶ آیتم کمی سازی شده‌اند. در ادامه، با ترکیب این ۱۶ شاخص فرعی، شاخص اصلی پیشنهادی برای ارزیابی خطر در هر منطقه محاسبه شده است. برای آنالیز میزان خطرپذیری کل سیستم، اثر عوامل شانزده گانه در احتمال خروج عناصر اصلی سیستم (شامل خط انتقال و باس) تعیین گردیده است. در نهایت، مدلی برای محاسبه احتمال و میزان خاموشی باس‌های مختلف در هر یک از حوادث محتمل، بر مبنای مفاهیم احتمال خطر و ارزش منطقه پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی بر روی اطلاعات جغرافیایی یک مورد مطالعاتی شبیه سازی شده است. در نتایج به دست آمده، شهرهای دارای بیشترین احتمال خطر، باس‌های بحرانی سیستم و نیز میزان خاموشی مورد انتظار معین شده‌اند. مدل پیشنهادی در این مقاله می‌تواند در شناسایی دقیق و علمی نقاط آسیب پذیر و بحرانی یک منطقه و همچنین ارزیابی سطح آسیب پذیری از دیدگاه پدافند غیرعامل مورد استفاده قرار گیرد.

**کلیدواژه‌ها:** پدافند غیرعامل، سطح آسیب پذیری، حملات تروریستی، خاموشی، سیستم قدرت

## Risk Level Assessment of the Power Supply Network Against Various Threats

S. J. Hoseini, M. Samadi\*

Hakim Sabzevari University, Sabzevar

(Received: 17/06/2018; Accepted: 24/11/2018)

### Abstract

The aim of this paper is to provide a new approach for assessing the risk of a power system against natural events and the threats imposed by the terrorist attacks. In this regard, the main determinants of the importance of an area are quantified in the form of 16 introduced items. Subsequently, by combining these 16 sub-indicators, the main index for risk assessment is calculated for each region. In order to analyze the total risk of the system, the outage probability of each element (including the transmission line and the bus) is determined considering the sixteen proposed factors involved. Finally, a new model is proposed to calculate the unserved power of each event using the proposed risk index and region value. The proposed method has been simulated on the geographic information of a case study. The proposed model can help to identify the critical points, as well as the quantitative assessment of the vulnerability level.

**Keywords:** Passive Defence, Vulnerability Level, Terrorist Attacks, Unserved Power, Power System

## ۱. مقدمه

کم (از قبیل خروج یک عنصر شبکه بر اثر خرابی تجهیز) محافظت می‌شود. باین حال حوادثی با احتمال وقوع کم ولی تأثیر زیاد (HILP<sup>۳</sup>) نیز وجود دارند که در صورت عدم پیش‌بینی‌های لازم، منجر به خاموشی‌های گسترده در شبکه می‌شوند. حوادث طبیعی از قبیل زلزله، طوفان، سیل و حوادث گوناگون تروریستی در زمره این رخدادها قرار می‌گیرند. در این راستا مفهوم تاب‌آوری در سیستم‌های قدرت مطرح می‌شود که استقامت سیستم در برابر حوادث HILP و توانایی ترمیم و بازیابی سریع به حالت عادی اولیه را بررسی می‌کند [۱۲-۱۱]. در ادامه تعدادی از مقالات در حوزه تاب‌آوری سیستم قدرت به اختصار مرور شده‌اند.

روشی جامع برای بهبود تاب‌آوری سیستم با توجه به شرایط قبل و بعد از حادثه پیشنهاد شده است [۱۳]. اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی شامل توزیع مجدد تولید، تغییر توپولوژی توسط کلید زنی و حذف بار است. با معرفی دو مفهوم تاب‌آوری عملیاتی و تاب‌آوری زیرساختی، اثر حوادث چندگانه مورد آنالیز قرار گرفته است [۱۴]. نتایج به‌دست‌آمده کارایی چارچوب پیشنهادی در کمی‌سازی تاب‌آوری سیستم و نیز استراتژی‌های بهبود آن را نشان می‌دهد. مدل جدیدی نیز برای ارزیابی تاب‌آوری سیستم قدرت بریتانیا در برابر خطرات ناشی از تغییرات آب و هوایی ارائه شده است [۱۵]. اثرات رویدادهای شدید آب و هوایی به کمک مفهومی تحت عنوان منحنی شکنندگی<sup>۴</sup> مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو مطالعه شده است [۱۶].

توسعه ریزشبکه‌های با قابلیت تغذیه بارها به‌صورت جزیره‌ای توسط منابع داخلی، نقش مؤثری در افزایش تاب‌آوری سیستم در مواجهه با رویدادهای مخرب دارد [۱۷]. یک برنامه‌ریزی پیشگیرانه برای بهبود تاب‌آوری ریزشبکه‌ها در برابر سیل‌های شدید بر مبنای حداقل‌سازی حذف بار ارائه شده است [۱۸]. مدلی نیز برای توسعه ظرفیت‌های تولید سیستم برای عملکرد بهینه در شرایط عادی و نیز رخداد حملات مخرب ارائه شده است [۱۹]. در این ساختار، سه عامل اصلی مسئله یعنی طراح، مهاجم و مدافع در کنار هم مدل‌سازی می‌شوند.

تاب‌آوری شبکه برق آمریکا بر اساس اطلاعات تجربی اختلالات رخ داده در این شبکه مطالعه شده است [۲۰]. در این راستا در هر خاموشی سراسری، سه پارامتر مدت‌زمان بین خروج‌ها، بار ازدست‌رفته در هر حادثه و مدت‌زمان سپری‌شده تا بازیابی کامل سیستم آنالیز شده است. رویکرد جدیدی نیز برای پیش‌بینی حوادث شدید آب و هوایی منجر به قطعی گسترده و طولانی در شبکه برق پیشنهاد شده است [۲۱]. طبق نتایج ریسک قطع برق تابع عوامل مختلفی شامل نوع خطر طبیعی، گستردگی شبکه انتقال، وسعت مناطق روستایی و شهری و سطح

از جمله موضوعاتی که امروزه در طی تحولات جدید منطقه و جنگ‌های نوین موردتوجه قرار گرفته است، مفهوم پدافند غیرعامل است. پژوهش‌های حوزه پدافند غیرعامل به ارائه روش‌ها و راه‌حل‌های کاهش خسارات احتمالی حاصل از حملات نظامی به مناطق مختلف می‌پردازد. بهره‌گیری از منافع پدافند غیرعامل، نیاز به شناخت درست و تحلیل جامع آثار حوادث مختلف در سیستم دارد [۱]. سیستم قدرت یکی از زیرساخت‌های حیاتی است که نقش مهمی در توسعه پایدار هر کشوری دارد. بنابراین مطالعه امنیت سیستم قدرت از اهمیت زیادی برخوردار است [۲-۴]. بنابراین تهدیدات و اختلالات جدی در کارکرد این سیستم حتی اگر منشأ طبیعی داشته باشد، در حوزه مطالعات پدافند غیرعامل بررسی می‌شود. البته گاهی امنیت سیستم در اثر حملات تروریستی تهدید می‌شود. در ادامه مرور مختصری بر بعضی مقالات در این حوزه انجام شده است.

جایابی بهینه تجهیزات مهم و اضطراری سیستم می‌تواند با طراحی یک تئوری بازی بین مهاجم تروریست و مدافع انجام گردد [۱]. در بعضی مقالات، شاخص‌هایی جهت تعیین میزان اهمیت پست‌های برق ۴۰۰ کیلوولت از دیدگاه پدافند غیرعامل بر مبنای قابلیت بهره‌برداری و ظرفیت پست پیشنهاد شده است. ملاحظات پدافند غیرعامل می‌تواند در برنامه‌ریزی دینامیک منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع نیز مطرح شود [۳]. در این مدل‌ها گاهی کاهش مدت‌زمان خاموشی بارهای شبکه به‌عنوان یکی از اهداف اصلی مدنظر قرار می‌گیرد. حملات منجر به خروج‌های آبخاری در سیستم قدرت نیز می‌تواند به کمک تئوری بازی بین مهاجم و مدافع فرمول‌بندی شود. در چنین مدلی، محدودیت بودجه، هزینه‌های خاموشی بار، هزینه‌های حمله و دفاع در نظر گرفته می‌شود [۵]. ارزیابی سیستم در شرایط رخداد حملات تروریستی زنجیره‌ای ممکن است بر اساس وابستگی متقابل بین زیرساخت‌ها بررسی گردد [۶].

ارزیابی آسیب‌پذیری سیستم برای آگاهی بهره‌بردار از عواقب و خسارات حوادث محتمل، امری ضروری است. بعضی شاخص‌های متداول جهت ارزیابی آسیب‌پذیری و امنیت سیستم قدرت عبارت‌اند از: شاخص فاصله تا مرز آسیب‌پذیری [۷]، شاخص امنیت رفع خطای بحرانی (CCT<sup>۱</sup>) و حاشیه انرژی (EM<sup>۲</sup>) [۸]، شاخص ترکیبی مبتنی بر میزان بار تأمین نشده [۹]، شاخص کارایی شارش توان و شاخص کارایی ولتاژ [۱۰].

سیستم قدرت غالباً در برابر رخدادها با احتمال زیاد و تأثیر

<sup>۳</sup> High-Impact Low-Probability

<sup>۴</sup> Fragility curve

<sup>۱</sup> Critical Clear Time

<sup>۲</sup> Energy Margin

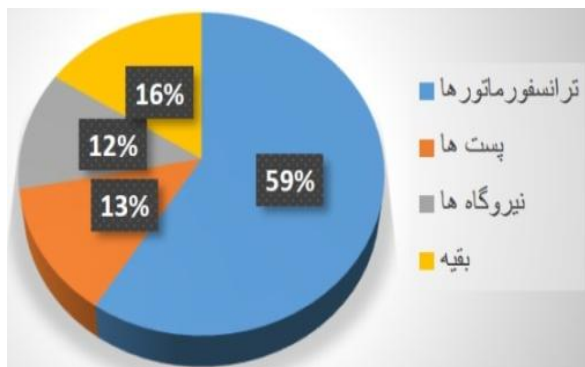
در تهاجمات نظامی بخش زیادی از تهدیدات متوجه شهرها و تأسیسات موجود در آن می‌شود. مهم‌ترین عوامل مؤثر در انتخاب شهرها به‌عنوان هدف نظامی [۲۴-۲۳] عبارت‌اند از:

- استقرار مراکز تصمیم‌گیری سیاسی، اداری و نظامی
- تجمع نیروی انسانی و سرمایه‌های مادی و معنوی
- پشتیبانی جنگ با توجه به امکانات و خدمات رفاهی
- حلقه ارتباطی و کانون انسجام منطقه روستایی اطراف

صاحب‌نظران سیاسی و نظامی آمریکا تحقیقات قابل‌توجهی در جهت بررسی شیوه‌های مؤثرتر برای جنگ انجام داده‌اند. در آگوست ۱۹۹۱، تئوری پنج حلقه واردن به پنتاگون ارائه گردید. طبق این تئوری مهم‌ترین وظیفه در طرح‌ریزی یک جنگ، شناسایی مراکز ثقل کشور بوده و چنانچه این مراکز شناسایی و مورد هدف قرار گیرند، کشور موردتهاجم در کوتاه‌ترین زمان تسلیم خواهد شد [۲۵].

وقفه طولانی در سازه‌های زیربنایی و شبکه‌ای، موجب اختلال در فرایندهای نظامی و اقتصادی شود. این زیرساخت‌ها شامل شبکه‌های آب، برق، مخابرات، گاز، فاضلاب، راه و راه‌آهن، هستند. در جوامع مدرن، زیرساخت‌های پایدار به هم وابستگی متقابل داشته و تشکیل یک سیستم بزرگ را می‌دهند [۶-۵]. ضرر وابستگی متقابل، افزایش آسیب‌پذیری است.

از جمله اهدافی که در ساعات اولیه جنگ مورد اصابت قرار می‌گیرد، تأسیسات نیروگاهی، خطوط انتقال و پست‌های برق است. با ازکارافتادن سیستم تأمین انرژی الکتریکی و قطع برق، دشمن به بسیاری از اهداف خود دست می‌یابد [۲۶-۲۷]. بنابراین، مطالعه امنیت سیستم قدرت از اهمیت زیادی برخوردار است. خرابی سیستم‌های قدرت به سطح اطمینان و نیز جایگاه اجزا در سیستم بستگی دارد. شکل (۲)، سهم بخش‌های مختلف سیستم در اتفاقات گوناگون را نشان می‌دهد.

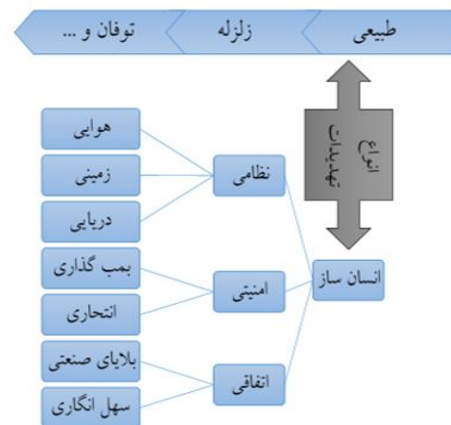


شکل ۲. درصد اتفاقات در تجهیزات مختلف سیستم قدرت

سرمایه‌گذاری در عملیات تعمیر و نگهداری (مثلاً جایگزینی تجهیزات قدیمی) است.

با مطالعه مقالات مختلف در حوزه پدافند غیرعامل می‌توان گفت: کمی‌سازی عوامل تأثیرگذار بر سطح آسیب‌پذیری شبکه تأمین برق یک منطقه از موضوعاتی است که تا به حال کمتر مورد توجه قرار گرفته است. هدف از این مقاله، ارزیابی میزان خطرپذیری سیستم برق‌رسانی به مناطق جمعیتی شهری در برابر حوادث طبیعی و نیز تهدیدات ناشی از حملات تروریستی است. در این راستا ابتدا عوامل اصلی تعیین‌کننده اهمیت یک منطقه شناسایی و در قالب ۱۶ آیتم کمی‌سازی شده‌اند. در ادامه، شاخص خطر پیشنهادی برای هر منطقه از مجموع وزن‌دار این عوامل محاسبه شده است.

برای آنالیز میزان خطرپذیری کل سیستم، ابتدا با توجه به آمار حوادث و خرابکاری‌های گوناگون تجهیزات سیستم قدرت و نیز دخالت عوامل شانزده‌گانه پیشنهادی مرتبط، احتمال خروج هر یک از عناصر اصلی سیستم (شامل خط انتقال و باس) محاسبه شده است. این خروج‌ها می‌تواند بر اثر یک حادثه طبیعی و یا یک حمله تروریستی باشد. سپس مناطق مختلف سیستم به کمک شاخص خطر پیشنهادی برای هر منطقه، ارزش‌گذاری شده‌اند. درنهایت، شاخص‌های احتمال و میزان خاموشی کل سیستم در اثر مجموعه حوادث با احتساب بیش از ۴۹ هزار حالت محتمل، ارزیابی شده است. آزمایش روش پیشنهادی بر روی اطلاعات جغرافیایی یک منطقه فرضی انجام شده است. برای مدل‌سازی سیستم قدرت، شبکه ۲۴ باسه استاندارد IEEE بر روی منطقه مورد مطالعه نگاشت شده و ارزیابی‌ها انجام شده است. مطابق شکل (۱)، تهدیدها به دودسته تهدیدهای طبیعی و انسان‌ساز تقسیم می‌شود.



شکل ۱. دسته‌بندی انواع تهدیدات [۲۲]

قابل محاسبه است.

$$CPI_k = \frac{population_k}{\sum_{k=1}^N population_k} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

**دهستان:** با توجه به پراکنندگی جغرافیایی و لزوم تأمین بار مصرفی مورد نیاز دهستان‌ها توسط شبکه برق، تعداد دهستان‌های هر منطقه پارامتری دارای اهمیت است. برای در نظر گرفتن این موضوع شاخصی مطابق رابطه (۲) تعریف شده است.

$$VNI_k = \frac{VN_k}{\sum_{k=1}^N VN_k} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

**نوع منطقه از لحاظ ناهمواری‌ها:** عبور خط انتقال از مناطق کوهستانی، باعث می‌شود در صورت بروز حادثه، حضور گروه تعمیرات و رفع مشکل با تأخیر بیشتری انجام گردد. مناطق موجود در مورد مطالعاتی این مقاله در سه دسته کوهستانی، کوهپایه‌ای و بیابانی قرار می‌گیرند. بر این اساس، شاخصی به نام  $MII_k$  تعریف شده که میزان کوهستانی بودن منطقه را بیان می‌کند. مقدار این شاخص، بر اساس اطلاعات نقشه‌های جغرافیایی تخمین زده شده است.

**دما:** تجهیزات اصلی سیستم قدرت شامل ژنراتورها، خطوط انتقال و پست‌ها، بهترین عملکرد را در یک محدوده دمایی مشخص دارند. کاهش و یا افزایش شدید دما، گاهی منجر به آسیب جدی، خروج تجهیز و بعضاً خاموشی در بخشی از شبکه می‌شود [۳۷]. بر این اساس، شاخصی مطابق رابطه (۳)، تعریف شده است.

$$ATI_k = \frac{AAT_k}{\text{Max}\{AAT_k\}} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

**شهرک صنعتی:** شهرک‌های صنعتی به‌عنوان قلب تپنده هر شهر کمک شایانی به اقتصاد آن منطقه می‌کند. در واقع، مراکز صنعتی بزرگ قسمت اعظمی از بار در یک شهر را به خود اختصاص می‌دهند. برای لحاظ کردن این موضوع، شاخصی مطابق (۴) برای ارزیابی تعداد مراکز صنعتی بزرگ تعریف شده است.

$$IPI_k = \frac{IPN_k}{\sum_{k=1}^N IPN_k} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

**مرز مشترک با کشورهای مجاور:** داشتن مرزهای مشترک برای هر کشور امتیازات و مضراتی را به دنبال دارد. در این هم‌جواری طبیعتاً، شهرها نیز بی‌بهره نخواهند بود. اگر کشور هم‌جوار از لحاظ امنیتی و ثبات در آرامش باشد شرایطی خوب را برای کشور همسایه فراهم می‌کند. همچنین، نداشتن تضاد سیاسی با کشور همسایه و همسویی سیاست‌های منطقه‌ای،

بعضی خسارات سیستم قدرت ناشی از کارشکنی، تروریسم و حمله نظامی است. مثلاً شبکه برق کلمبیا در طول ۱۱ سال گذشته، ۲۰۰ حمله را تجربه کرده است [۲۹-۲۸]. در جدول (۱)، تعداد آسیب‌های وارده سالانه به اجزای سیستم قدرت در آمریکای شمالی لیست شده است [۶].

**جدول ۱.** آسیب‌های وارده به اجزای سیستم قدرت آمریکای شمالی

درصد	تعداد در سال	
۴۵٫۵	۱۸۲	خطوط انتقال و دکل‌ها
۱۵	۶۰	خطوط توزیع
۸٫۲۵	۳۳	کلیدهای قدرت
۷٫۲۵	۲۹	ترانسفورماتور
۵٫۲۵	۲۱	پست
۴٫۷۵	۱۹	تجهیزات تولیدکننده
۳٫۷۵	۱۵	باس‌ها و کلیدها
۱۰٫۲۵	۴۱	سایر موارد
۱۰۰	۴۰۰	مجموع

با توسعه فناوری اطلاعات، آسیب‌های جدیدی مانند حملات سایبری نیز مطرح می‌شود. سیستم قدرت همواره در معرض خطر هکرها و سایبرتروریسم است. با توجه به توسعه شبکه‌های هوشمند در سراسر جهان، مشکلات امنیتی سایبری نیز رو به افزایش است [۳۵-۳۰].

## ۲. روش پیشنهادی

آسیب‌پذیری و نیز ارزش حمله به یک منطقه از طرف یک گروه تروریستی، تابعی از ویژگی‌های جغرافیایی، صنعتی و زیرساختی است. در ادامه، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ارزش یک منطقه شهری بر مبنای مفهوم پدافند غیرعامل معرفی شده است. ایده اولیه در تعریف تعدادی از موارد و آیتم‌های معرفی شده، محتوای سند توسعه استان خراسان [۲۶] و شهرستان‌ها، بوده است.

### ۲-۱. عوامل مؤثر بر میزان خطر و ارزش مناطق مختلف

در این بخش، ۱۶ شاخص مهم در ارزیابی میزان درخطر بودن شهرهای مختلف (شامل هر دو نوع طبیعی و تروریستی) و نیز ارزش منطقه معرفی می‌شود. درنهایت با وزن دهی مناسب، شاخص نهایی ارائه خواهد شد. توضیح تمام نمادهای به‌کار رفته در فهرست علائم در انتهای مقاله، ارائه شده است.

**جمعیت:** جمعیت شهری یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در سطح اهمیت منطقه است. میزان جمعیت یکی از عواملی است که به‌صورت مستقیم بر مصرف انرژی الکتریکی منطقه تأثیرگذار است. شاخص جمعیت هر شهر به‌صورت نرمالیزه طبق رابطه (۱)

**ظرفیت نیروگاه‌ها:** نیروگاه‌ها برحسب وضعیت جغرافیایی منطقه، امکان تأمین سوخت، اثرات بر تبادلات شبکه و... جایابی و ساخته می‌شوند. طبیعتاً نیروگاه‌های با ظرفیت بالاتر، مورد توجه بیشتری قرار می‌گیرند؛ چون هم سهم بیشتری در تأمین بار دارند و هم در صورت بروز حادثه و خروج، خاموشی شدیدتر خواهد بود. بر این اساس، مجموع ظرفیت نیروگاه‌های هر منطقه از رابطه (۸) محاسبه شده و شاخص ارزیابی این آیتم طبق (۹) تعریف می‌گردد.

$$PPC_k = \sum_i (\text{Power Plant Capacity})_i \quad \forall i \in \text{City}_k \quad (8)$$

$$PCI_k = \frac{PPC_k}{\sum_{k=1}^N PPC_k} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

**راه‌های ارتباطی:** راه‌های مواصلاتی اصلی بین شهرها، از موارد مهم در رفع مشکلات شبکه از جهت تجهیز رسانی و رفع عیب آن است. بعضی شهرها از لحاظ جغرافیایی در منطقه‌ای قرار می‌گیرند که به‌عنوان شاهراه قلمداد می‌شوند. لذا، تعداد راه‌های ارتباطی هر شهر با سایر شهرها بر مبنای اطلاعات نقشه‌های جغرافیایی ارزیابی و شاخصی مطابق رابطه (۱۰) تعریف می‌شود.

$$MPI_k = \frac{NMP_k}{\sum_{k=1}^N NMP_k} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

**معادن:** شاید در نگاه اول، معادن رابطه مستقیمی با سیستم برق‌رسانی نداشته باشد، ولی وجود معادن مهمی همچون طلا و دیگر فلزات و سنگ‌های گران‌بها می‌تواند جزو مواردی باشد که تروریست‌ها را در جهت حمله و تصاحب آن منطقه برانگیزاند. به همین دلیل تعداد معادن هر منطقه که تأثیری مستقیم بر حملات و نتیجتاً آسیب به شبکه برق دارد در رابطه (۱۱)، مدنظر قرار گرفته است.

$$MI_k = \frac{NM_k}{\text{Max}_k \{NM_k\}} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

**دیو و فراوانی تجهیزات:** هر سیستم و شبکه‌ای برای عملکرد مناسب و قابل اطمینان در زمان بروز حادثه، به تجهیزاتی با قابلیت دسترسی سریع نیاز دارد. این تجهیزات در مکان‌هایی قرار دارند که بنا به نوع شبکه و اهمیت آن منطقه می‌توانند برای جلوگیری از مشکلات بعدی و یا برطرف کردن خاموشی آن قسمت از شبکه یاری‌رسانی داشته باشند. این آیتم با نماد  $EDI_k$  ارزیابی شده است.

**آسیب‌پذیری خط:** خطوط انتقال برق، شریان‌های اصلی انتقال توان از مراکز نیروگاهی به مراکز بار هستند. بنابراین، طول مجموعه خطوط انتقال واقع در منطقه، یکی از آیتم‌های

مزایای اقتصادی و امنیتی فراوانی برای هر دو کشور به همراه دارد. بدیهی است با وجود اختلاف و تضاد منافع بین دو کشور هم‌جوار، زیرساخت‌های منطقه از جمله شبکه برق دچار تهدیداتی می‌شود. در سیستم مورد مطالعه این مقاله، تعدادی از مناطق، با کشورهای همسایه مرز مشترک دارند. بر این اساس، مجموع طول مرزهای هر منطقه برای محاسبه شاخص رابطه (۵) استفاده شده است. این شاخص برای شهرهای غیر مرزی برابر صفر است.

$$BLI_k = \frac{BL_k}{\sum_{k=1}^N BL_k} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

**فرودگاه:** فرودگاه‌ها جزو اصلی‌ترین اجزای امنیتی و ثبات یک کشور هستند که در صورت بروز مشکل در صدر اخبار رسانه‌های بین‌المللی قرار خواهند گرفت. همچنین، در هنگام رخداد حوادث، فرودگاه‌ها به‌عنوان عاملی برای رساندن سریع تجهیزات، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار هستند. باوجود فرودگاه‌ها و مانور عملیاتی سریع در آسمان، سرعت حل برخی مشکلات می‌تواند افزایش چشمگیری داشته باشد. اهمیت هر فرودگاه بر اساس مواردی نظیر میزان پروازها، میزان فعالیت فرودگاه و عدم نیاز به کسب مجوز برای انتخاب مسیر مورد نیاز، مانور هوایی در صورت بروز حادثه و مسیرهای موجود پروازی و در نهایت وسعت باند پروازی جهت ورود و خروج تجهیزات تعیین می‌شود. برای لحاظ کردن این موارد، در رابطه (۶) شاخص AI به‌صورت مجموع وزن‌دار چهار ویژگی مهم هر فرودگاه محاسبه و ارزیابی می‌شود. مقدار این شاخص عددی کوچک‌تر مساوی یک است که برای شهر دارای فرودگاه با بیش‌ترین تعداد پرواز، وسیع‌ترین باند پروازی و قدرت مانور بالا برابر یک در نظر گرفته شده و برای شهرهای فاقد فرودگاه این شاخص صفر فرض می‌شود.

$$AI_k = \lambda_1 \times (\text{Number of Flights})_k + \lambda_2 \times (\text{Activity Level})_k + \lambda_3 \times (\text{Maneuvering Area})_k + \lambda_4 \times (\text{Flight Bandwidth})_k \quad (6)$$

$$k = 1, 2, \dots, N$$

**زلزله‌خیزی و وضعیت گسل‌های منطقه:** هر کشوری بنا به موقعیت جغرافیایی که قرار گرفته است دستخوش تغییرات لایه‌های زیرزمینی و سطحی زمین قرار می‌گیرد. این‌گونه تغییرات در لایه‌های زمین می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری را در آن منطقه بالأخص سیستم برق‌رسانی آن وارد نماید. بر این اساس، با توجه به تعداد گسل‌های موجود طبق نقشه و سابقه زلزله، زلزله‌خیزی مناطق مختلف به کمک رابطه (۷) کمی‌سازی شده است.

$$FI_k = \frac{FN_k}{\text{Max}_k \{FN_k\}} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

$$BBI_k = \frac{(\text{number of Border crossing Bus})_k}{\sum_{k=1}^N (\text{number of Border crossing Bus})_k} \quad (17)$$

$$k = 1, 2, \dots, N$$

## ۲-۲. شاخص خطر پیشنهادی برای ارزیابی هر منطقه

با در نظر گرفتن همه پارامترهای مؤثر معرفی شده در روابط قبل، نهایتاً شاخص میزان خطر طبق رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود. مقدار بزرگ‌تر این شاخص در هر منطقه، متناظر اهمیت بیشتر و احتمال حمله بالاتر به آن منطقه است.  $w_{16}$  ضرایب وزنی شاخص‌های فرعی ۱۶ گانه، در محاسبه شاخص میزان خطر ( $RLI$ ) هستند.

$$\begin{aligned} RLI_k = & \omega_1 \times CPI_k + \omega_2 \times VNI_k + \omega_3 \times MII_k \\ & + \omega_4 \times ATI_k + \omega_5 \times IPI_k + \omega_6 \times BLI_k \\ & + \omega_7 \times AI_k + \omega_8 \times FI_k + \omega_9 \times PCI_k \\ & + \omega_{10} \times MPI_k + \omega_{11} \times MI_k + \omega_{12} \times EDI_k \\ & + \omega_{13} \times TLI_k + \omega_{14} \times SI_k + \omega_{15} \times BLI_k \\ & + \omega_{16} \times BBI_k \end{aligned} \quad (18)$$

$$k = 1, 2, \dots, N$$

## ۲-۳. مدل پیشنهادی برای آنالیز امنیت کل سیستم در برابر حوادث

در بخش قبل، وابستگی متقابل شرایط جغرافیایی و تجهیزات و تأسیسات اصلی شبکه برق بیان و مهم‌ترین عوامل مؤثر شناسایی شدند. با ارزیابی کمی شاخص‌ها، مناطق مختلف سیستم متناسب با شاخص خطر پیشنهادی برای هر منطقه، ارزش‌گذاری می‌شوند. همچنین با استفاده از اطلاعات جدول (۱) (در بخش ۲)، احتمال بروز حادثه در بخش‌های مختلف شبکه با توجه به اطلاعات واقعی جمع‌آوری شده محاسبه و ثبت می‌شود. برای محاسبه میزان توان از دست‌رفته (خاموشی) در هر باس یعنی  $UP_j$  از مسئله بهینه‌سازی تعریف شده در روابط (۲۴-۱۹)، استفاده شده است. تابع هدف ارائه شده در (۱۹)، به دنبال کمترین خاموشی برای باس‌های بااهمیت‌تر (بر مبنای شاخص پیشنهادی  $RLI$ )، است. روابط (۲۳-۲۰)، معادلات پخش بار مستقیم بهره‌برداری از سیستم قدرت را نشان می‌دهند. در چنین مدلی، ارتباطات بین باس‌ها و خطوط سیستم به‌طور دقیق لحاظ می‌شود. رابطه (۲۴)، قید حداکثر میزان خاموشی در هر باس است. مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی به تعداد کل حوادث محتمل اجرا می‌شود. حوادث مفروض شامل تمام حالت‌های ممکن خروج تک عنصر (خط یا باس) و خروج هم‌زمان چند عنصر است که توضیحات بیشتر در بخش ۴-۳-۲ ارائه شده است. این مسئله با هدف کمترین خاموشی برای باس‌های بااهمیت‌تر (بر مبنای شاخص پیشنهادی  $RLI$ )، و به تعداد کل حوادث محتمل اجرا می‌شود. درنهایت با لحاظ کردن احتمال رخداد حوادث مختلف (بر مبنای ترکیبی از شاخص‌های پیشنهادی و اطلاعات آماری)، شاخص‌های ارزیابی

منعکس‌کننده اهمیت منطقه مورد نظر بوده و رابطه مستقیمی با خطر حمله به آن دارد. در این راستا، مجموع طول خطوط عبوری از هر شهر از رابطه (۱۲) محاسبه شده و در ادامه شاخص متناظر در رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$LTL_k = \sum_i (\text{Length of Transmisson Line}_i) \quad \forall i \in \text{City}_k \quad (12)$$

$$TLI_k = \frac{LTL_k}{\sum_{k=1}^N LTL_k} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

**آسیب‌پذیری باس:** بخش‌های اصلی شبکه یعنی نیروگاه‌ها و مصارف اصلی از طریق باس‌ها (پست‌ها) به هم متصل هستند. این باس‌ها گاهی از اهمیت بسیار زیاد، در برخی موارد بیشتر از خطوط، برخوردار هستند. نقطه اتصال خطوط بودن و نیز رفع بعضی مشکلات شبکه توسط تجهیزات موجود در پست‌ها، از دلایل اصلی اهمیت زیاد باس‌ها است. برای لحاظ کردن این موضوع، شاخصی مطابق رابطه (۱۴) برای ارزیابی تعداد پست‌های هر منطقه پیشنهاد شده است.

$$SI_k = \frac{(\text{Number of Substaion})_k}{\sum_{k=1}^N (\text{Number of Substaion})_k}; k = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

**آسیب‌پذیری خط مرزی:** خروج یک خط انتقال از مدار، می‌تواند موجب خاموشی در سیستم بشود. بدیهی است با افزایش سطح آسیب‌پذیری خط و احتمال خروج بالاتر، احتمال بروز خاموشی در شبکه نیز افزایش خواهد داشت. البته میزان خاموشی ناشی از خروج خطوط مختلف با هم متفاوت است. با توجه به توضیحات داده‌شده در بخش مرزهای خارجی (در بخش ۳-۱-۶)، درجه اهمیت خطوط مرزی (خطوط انتقال برق در مجاورت مرز با کشور همسایه) و میزان آسیب‌پذیری آن‌ها بیشتر از سایر خطوط است. خطوط مرزی بر اساس توپولوژی شبکه برق و نیز نقشه منطقه مورد مطالعه مشخص می‌شوند. در این راستا، مجموع طول خطوط مرزی در رابطه (۱۵) و شاخص مربوطه در رابطه (۱۶) ارائه شده است.

$$LBL_k = \sum_i (\text{Length of Border crossing Line}_i) \quad (15)$$

$$\forall i \in \text{City}_k$$

$$BLI_k = \frac{LBL_k}{\sum_{k=1}^N LBL_k} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (16)$$

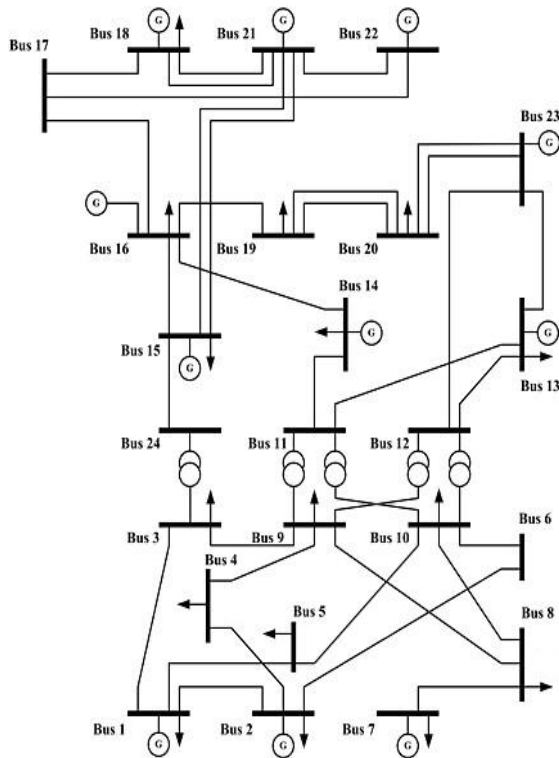
**آسیب‌پذیری باس مرزی:** مشابه خطوط مرزی، باس‌های مرزی نیز برای مناطقی که مرز مشترک با کشورهای همسایه دارند، مشخص می‌شوند. دلایل اهمیت باس مرزی و آسیب‌پذیری آن، مشابه مباحث مطرح‌شده در بخش قبل است. بر این اساس، شاخصی مطابق (۱۷) تعریف شده است.

همسایه، ظرفیت نیروگاهی مناسب از جمله ویژگی‌های این منطقه است.

در شکل (۳)، بخشی از شهرستان‌های مورد مطالعاتی مشاهده می‌شود. برای اطلاعات آماری جمعیت شهری هر منطقه و تعداد دهستان‌ها از مرجع [۳۸] استفاده شده است. برای مدل‌سازی سیستم قدرت، از شبکه استاندارد ۲۴ باسه IEEE با دیگرام تک‌خطی مطابق شکل (۴) استفاده شده است. در واقع، این شبکه بر روی اطلاعات جغرافیایی منطقه نگاشت شده و ارزیابی‌های مربوطه انجام شده است.



شکل ۳. بخشی از جغرافیای منطقه مورد مطالعه



شکل ۴. دیگرام تک‌خطی شبکه ۲۴ باسه استاندارد IEEE [۳۹]

امنیت کل سیستم محاسبه می‌شوند.

$$\text{Min} \sum_{j=1}^{N_{bus}} RLI_j \times UP_j \quad (19)$$

$$K.P_{Line} = A.P_G - B.(P_{Load} - UP) \quad (20)$$

$$P_{Line, mn} = \frac{\theta_m - \theta_n}{x_{mn}} \quad \forall \text{ all lines} \quad (21)$$

$$|P_{Line}| \leq P_{Line}^{Max} \quad \forall \text{ all lines} \quad (22)$$

$$0 \leq P_{G_i} \leq P_{G_i}^{Max} \quad \forall \text{ all units} \quad (23)$$

$$0 \leq UP_j \leq P_{Load_j} \quad \forall \text{ all loads} \quad (24)$$

متغیرها و پارامترهای به کار رفته در این مسئله به صورت زیر است:

- $UP_j$  توان تأمین نشده باس زام
- $K$  ماتریس تلاقی گره و شاخه
- $A$  ماتریس تلاقی واحدها و خطوط
- $B$  ماتریس تلاقی بارها و خطوط
- $P_G$  بردار تولید واحدها
- $P_{Load}$  بردار بار باس‌ها
- $P_{Line}$  بردار توان جاری در خطوط
- $\theta$  زاویه ولتاژ باس
- $x_{mn}$  راکتانس خط بین باس  $m$  و  $n$

حوادث طبیعی مخرب و نیز تهدیدات تروریستی غالباً وقایعی با احتمال کم و اثر زیاد هستند. بنابراین صرف توجه به احتمال رخداد نمی‌تواند روش مناسبی برای ارزیابی این حوادث باشد. برای توجه به این موضوع در این مقاله، ترکیب دو پارامتر احتمال حادثه و اثر حادثه مدنظر قرار گرفته است. در واقع امید ریاضی مقدار خاموشی احتمالی ناشی از حادثه که از رابطه (۲۵) محاسبه می‌شود، مبنای ارزیابی شدت حادثه است.

$$EENS = \sum_{s=1}^{N_s} prob_s \times \left( \sum_{j=1}^{N_{bus}} UP_j^s \right) \quad (25)$$

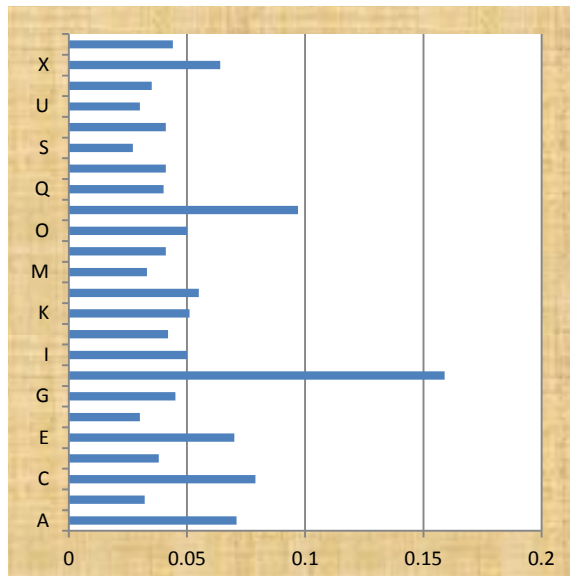
بنابراین سهم حوادث دارای خاموشی زیاد ولو با احتمال کم، در تعیین نقاط آسیب‌پذیر بسیار مهم خواهد بود.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. معرفی سیستم مورد مطالعه

پس از بررسی و تحلیل‌های لازم، یک منطقه فرضی به‌عنوان مورد مطالعاتی برای ارزیابی روش پیشنهادی انتخاب گردید. وسعت مناسب، تنوع جغرافیایی، داشتن خطوط مرزی با کشورهای

احتمال حوادث در نظر گرفته شده: برای شبیه‌سازی اثر حوادث و حملات بر روی شبکه و ارزیابی کمی آن دو شاخص  $LOLP^1$  (نشان‌دهنده احتمال از دست رفتن بار) و شاخص  $EENS^2$  (بیانگر انرژی تأمین نشده مورد انتظار) محاسبه شده‌اند. این کار با اجرای مدل پیشنهادی در روابط (۱۹-۲۴) انجام شده است.



شکل ۵. ارزیابی شاخص RLI پیشنهادی در مناطق مختلف

جدول ۳. ارزش خاموشی شهرهای دارای مرکز بار

شماره باس	اسم شهر	ارزش منطقه مورد حمله
۱	X	۸۹۱۴,۹۱
۲ و ۶ و ۷	P	۱۲۳۴۹,۷۲
۳	V	۴۳۴۰,۳۶
۴ و ۵	U	۴۸۵۵,۵۸
۸	Y	۶۱۵۱,۴۴
۹	T	۶۲۹۱,۹۶
۱۰	O	۶۹۱۶,۴۷
۱۳ و ۱۴ و ۱۹ و ۲۲	H	۲۰۰۰۰
۱۵ و ۱۶	I	۷۹۳۱,۳۰
۱۸	C	۹۵۳۹,۴۲

در واقع، وضعیت سیستم در تک‌تک حوادث محتمل در نظر گرفته شده و پارامترهای اصلی بهره‌برداری از جمله خاموشی در هر باس و توان هر خط محاسبه و ارزیابی شده‌اند. مجموعه حوادث در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی‌های انجام شده به صورت زیر است:

- خروج یک خط: ۴۰ حادثه
- خروج یک واحد: ۳۳ حادثه

در جدول (۲) و نیز جدول (۶) در پیوست مقاله، اطلاعات جامع فرض شده برای شهرهای منطقه ارائه شده است.

جدول ۲. اطلاعات عمومی شهرهای مورد مطالعاتی

اسم شهر	معادن	تعداد راه ارتباطی اصلی	خط انتقال عبوری از شهر	پست انتقال هر شهر	خطوط انتقال مرزی	باس مرزی
A	۱۴	۳	۳	۱	۳	۱
B	۱۰	۳	۱	۰	۰	۰
C	۰	۲	۴	۱	۴	۱
D	۲۱	۳	۱	۰	۰	۰
E	۱	۴	۶	۱	۶	۱
F	۰	۴	۱	۰	۱	۰
G	۱۴	۳	۱	۰	۰	۰
H	۱۲	۷	۱۱	۴	۱۱	۴
I	۲	۵	۸	۲	۰	۰
J	۱۴	۹	۲	۱	۰	۰
K	۲	۴	۴	۱	۴	۱
L	۴	۵	۵	۱	۵	۱
M	۸	۴	۵	۰	۰	۰
N	۷	۷	۱	۰	۱	۰
O	۳	۳	۵	۱	۵	۱
P	۰	۶	۹	۳	۹	۳
Q	۰	۸	۸	۱	۰	۰
R	۷	۳	۴	۱	۰	۰
S	۳	۵	۱	۰	۰	۰
T	۱۶	۸	۵	۱	۰	۰
U	۵	۴	۶	۲	۰	۰
V	۸	۴	۳	۱	۰	۰
X	۱	۵	۷	۱	۷	۱
Y	۳	۴	۳	۱	۳	۱

### ۳-۲. محاسبه شاخص خطر هر منطقه

با استفاده از اطلاعات جغرافیایی مورد مطالعاتی و محاسبه دقیق شاخصه‌ای پیشنهادی، نهایتاً شاخص RLI ارزیابی شده که شکل (۵) مقدار آن برای شهرهای مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، منطقه نام‌گذاری شده با حرف H، بیش‌ترین مقدار شاخص را دارا است. رتبه‌های بعدی نیز به‌وضوح در شکل مشخص هستند.

### ۳-۳. ارزیابی امنیت کل سیستم در برابر حوادث

برآورد هزینه خاموشی بارها بر مبنای RLI با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده برای شاخص RLI در رابطه (۱۸)، هزینه خاموشی در شهرهای دارای مراکز بار برآورد شده است. در این راستا، شهر دارای بیش‌ترین اهمیت (H) بیش‌ترین هزینه خاموشی را داشته و سایر شهرها متناسب با RLI خود مقادیر کمتری را به خود اختصاص داده‌اند (جدول ۳).

<sup>1</sup> Loss of Load Probability

<sup>2</sup> Expected Energy Not Served



شاخص بسیار متداول برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم محاسبه و ارائه شده‌اند. این شاخص‌ها عبارت‌اند از شاخص LOLP و شاخص EENS. جدول (۵)، مقدار این دو شاخص در حوادث گوناگون را نشان می‌دهد.

جدول ۵. شاخص‌های ارزیابی سیستم در برابر حوادث

EENS (MWh)	LOLP	نوع حادثه خروج
0	0	یک خط
0	0	یک واحد
0.00057	$4.08 \times 10^{-6}$	دو خط
4.042	0.05996	دو واحد
0	0	یک خط و یک واحد
22.386	0.02669	یک خط و دو واحد
100.318	0.00048	دو خط و یک واحد

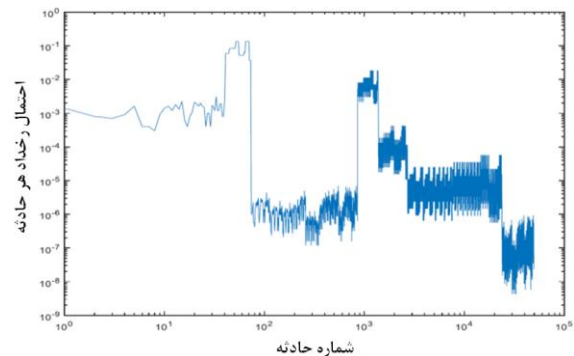
ملاحظه می‌شود، حادثه خروج دو خط و یک واحد علی‌رغم LOLP کمتر (نسبت به حادثه خروج دو واحد و نیز خروج یک خط و دو واحد)، بیش‌ترین خاموشی را به دنبال دارد. با جمع مقادیر شاخص EENS مربوط به هر حادثه در جدول (۵) می‌توان سطح آسیب‌پذیری کلی سیستم در برابر مجموعه حوادث مفروض را تعیین نمود. در سیستم مورد مطالعه، مقدار انرژی تأمین‌نشده انتظاری برابر ۱۲۶،۷۴۶ مگاوات ساعت به‌دست می‌آید. برنامه‌ریزان با اقداماتی نظیر توسعه سیستم تولید و انتقال می‌توانند در جهت کاهش آسیب‌پذیری سیستم گام بردارند. مدل پیشنهادی مقاله قادر است، میزان آسیب‌پذیری سیستم در سناریوهای توسعه‌ای مختلف را نیز به‌طور مشابه ارزیابی نماید.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، میزان خطرپذیری مناطق شهری در برابر حوادث طبیعی و نیز تهدیدات ناشی از حملات تروریستی به شبکه برق مدل‌سازی و ارزیابی گردید. در این راستا ۱۶ آیت‌های اصلی عوامل تأثیرگذار شناسایی و کمی‌سازی شده‌اند. این آیت‌ها شامل عوامل جغرافیایی و طبیعی و نیز ویژگی‌های مربوط به سیستم قدرت منطقه هستند. برای محاسبه احتمال خاموشی و توان تأمین‌نشده در حوادث مختلف، از ارزیابی آیت‌ها در مناطق مختلف استفاده شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده، شهرهای H و P دارای بیش‌ترین ارزش (متناظر احتمال خطر بیشتر در برابر حملات) هستند. همچنین بعد از اجرای برنامه ارزیابی خاموشی، باس‌های بحرانی سیستم و نیز میزان خاموشی مورد انتظار تعیین شده است. استفاده از اطلاعات واقعی، می‌تواند موجب ارزیابی

- خروج ۲ خط: ۷۸۰ حادثه
- خروج ۲ واحد: ۵۲۸ حادثه
- خروج یک خط و یک واحد: ۱۳۲۰ حادثه
- خروج یک خط و دو واحد: ۲۱۱۲۰ حادثه
- خروج دو خط و یک واحد: ۲۵۷۴۰ حادثه

در این مطالعه، از در نظر گرفتن سایر حوادث (مثلاً خروج هم‌زمان سه واحد و...) به دلیل احتمال رخداد بسیار کم، صرف‌نظر شده است. در ارزیابی حوادث، مجموعاً ۴۹۵۶۱ حادثه شبیه‌سازی شده که در شکل (۶)، احتمال حوادث مختلف (به ترتیب بیان‌شده بالا) به‌صورت لگاریتمی رسم شده است.



شکل ۶. احتمال رخداد کل حوادث در نظر گرفته‌شده

نتایج شبیه‌سازی حوادث: پس از اجرای مدل پیشنهادی برای ارزیابی خاموشی در هر باس به تعداد کل حوادث، بحرانی‌ترین باس‌ها بر مبنای بیش‌ترین خاموشی در شبکه، به‌صورت جدول (۴)، مشخص می‌شود.

ملاحظه می‌شود از مجموعه حوادث، فقط چهار حادثه نوع ۳، ۴، ۶ و ۷ منجر به خاموشی شده‌اند که در هر چهار مورد باس ۳ به‌عنوان یک باس بحرانی دیده می‌شود. لذا اتخاذ تدابیر لازم و ایجاد آمادگی برای رفع خاموشی حوادث و نیز بازطراحی سیستم در جهت کاهش خاموشی باس ۳، ضروری به نظر می‌رسد.

جدول ۴. بحرانی‌ترین باس‌ها در هر حادثه

نوع حادثه خروج	باس‌های بحرانی
یک خط	-
یک واحد	-
دو خط	3, 4, 14
دو واحد	3, 4, 5
یک خط و یک واحد	-
یک خط و دو واحد	3, 13, 15
دو خط و یک واحد	1, 3, 8

محاسبه شاخص‌های ارزیابی سیستم: در این بخش، دو

- [5] Wu, B.; Tang, A.; Wu, J. "Modeling Cascading Failures In Interdependent Infrastructures Under Terrorist Attacks"; Reliability Eng. Syst. Safety 2016, 147, 1-8.
- [6] Zimmerman, R. "Decision-Making and the Vulnerability of Interdependent Critical Infrastructure"; IEEE Int. Conf. Syst. Man and Cybern. 2004, 5, 4059-4063.
- [7] Kim, M.; El-Sharkawi, M. A.; Marks, R. J. "Vulnerability Indices For Power Systems"; IEEE Trans. Power Syst. 2006, 335-341.
- [8] Kundar, P. "Power System Stability and Control"; McGraw-Hill, 1994.
- [9] Ranjbar, M. H.; Pirayesh, A. "A New Vulnerability Index of Power System due to Terrorist Threats"; Adv. Defence Sci. Technol. 2016, 6, 289-297, (in Persian).
- [10] Eiebe, G. C.; Wollenbera, B. F. "Automatic Contingency Selection"; IEEE Trans. Power Syst. 1979, 92-104.
- [11] Amirioun, M. H.; Aminifar, F.; Lesani, H.; Shahidepour, M. "Metrics and Quantitative Framework for Assessing Microgrid Resilience against Windstorms"; Int. J. Elec. Power 2019, 104, 716-723.
- [12] Panteli, M.; Mancarella, P. "Modeling and Evaluating the Resilience of Critical Electrical Power Infrastructure to Extreme Weather Events"; IEEE Syst. J. 2017, 11, 1733-1742.
- [13] Huang, G.; Wang, J.; Chen, C.; Qi, J.; Guo, C. "Integration of Preventive and Emergency Responses for Power Grid Resilience Enhancement"; IEEE Trans. Power Syst. 2017, 32, 4451-4463.
- [14] Panteli, M.; Mancarella, P.; Trakas, D.; Kyriakides, E.; Hatziaegy, N. "Metrics and Quantification of Operational and Infrastructure Resilience in Power Systems"; IEEE Trans. Power Syst. 2017, 32, 4732-4742.
- [15] Fu, G.; Wilkinson, S.; Dawson, R.; Fowler, H.; Kilsby, C.; Panteli, M. "Integrated Approach to Assess the Resilience of Future Electricity Infrastructure Networks to Climate Hazards"; IEEE Syst. J. 2019, Early Access.
- [16] Panteli, M.; Pickering, C.; Wilkinson, S.; Dawson, R.; Mancarella, P. "Power System Resilience to Extreme Weather: Fragility Modeling, Probabilistic Impact Assessment, and Adaptation Measures"; IEEE Trans. Power Syst. 2017, 32, 3747-3757.
- [17] Gholami, A.; Shekari, T.; Grijalva, S. "Proactive Management of Microgrids for Resiliency Enhancement: An Adaptive Robust Approach"; IEEE Trans. Sustain. Energy 2019, Early Access.
- [18] Amirioun, M. H.; Aminifar, F.; Lesani, H. "Towards Proactive Scheduling of Microgrids against Extreme Floods"; IEEE Trans. Smart Grid 2018, 9, 3900-3902.
- [19] Fang, Y.; Sansavini, G. "Optimizing Power System Investments and Resilience against Attacks"; Reliab. Eng. Syst. Safe. 2017, 159, 161-173.
- [20] Shen, L.; Cassottana, B.; Tang, L. C. "Statistical Trend Tests For Resilience of Power Systems"; Reliab. Eng. Syst. Safe. 2018, 177, 138-147.
- [21] Mukherjee, S.; Nateghi, R.; Hastak, M. "A Multi-Hazard Approach to Assess Severe Weather-Induced Major Power Outage Risks in the U.S."; Reliab. Eng. Syst. Safe. 2018, 175, 283-305.
- [22] Esmaeli, M.; Taghvayi, A. "Urban Reorganization with Focus on Passive Defense (Case Study: Birjand)"; Urban Management 2012, 9, 93-110 (in Persian).

دقیق و علمی نقاط آسیب‌پذیر سیستم در برابر حوادث طبیعی و تروریستی بشود. لذا مدل پیشنهادی مقاله می‌تواند، در زمینه ارزیابی کمی سطح آسیب‌پذیری یک منطقه (از دیدگاه پدافند غیرعامل) به مدیران و سیاست‌گذاران کمک شایانی بنماید.

## فهرست علائم

CPI	City Population Index	شاخص جمعیت شهر
VNI	Village Number Index	شاخص تعداد دهستان
MII	Mountainous intensity Index	شدت کوهستانی بودن منطقه
AAT	Annual Average Temperature	میانگین دمای سالانه
ATI	Average Temperature Index	شاخص میانگین دما
IPN	Industrial Park Number	تعداد مراکز صنعتی بزرگ
IPI	Industrial Park Index	شاخص مراکز صنعتی
BLI	Boundary Length Index	شاخص طول مرز (خارجی)
AI	Airport Index	شاخص اهمیت فرودگاه شهر
FN	Fault Number	تعداد گسل‌های منطقه
FI	Fault Index	شاخص گسل (زلزله‌خیزی)
PPC	Power Plant Capacity	ظرفیت نیروگاه‌های شهر
PCI	Power Plant Capacity Index	شاخص ظرفیت نیروگاه
NMP	Number of Main Path of each city	تعداد راه‌های ارتباطی اصلی
MPI	Main Path Index	شاخص راه‌های اصلی
NM	Number of Mine	تعداد معادن
MI	Mine Index	شاخص معادن
EDI	Equipment Depot Index	شاخص دیپوی تجهیزات
LTL	The total Length of Transmission Line	طول کل خطوط انتقال توان
TLI	Transmission Line Index	شاخص خطوط انتقال
SI	Substation Index	شاخص پست‌های برق
LBL	Length of Border-crossing Lines	طول خطوط انتقال در مناطق مرزی
BLI	Border-crossing Line Index	شاخص خط انتقال مرزی
BBI	Border-crossing Bus Index	شاخص باس‌های مرزی
RLI	Risk Level Index	شاخص میزان خطر

## ۵. مرجع‌ها

- [1] Meng, L.; Kang, Q.; Han, C.; Zhou, M. "Determining the Optimal Location of Terror Response Facilities under the Risk of Disruption"; IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 2018, 19, 476 - 486.
- [2] Jeddi, B.; Ghaffarpour, R.; Ranjbar, A. M. "Optimal Planning of Renewable Energy Resources in Smart Power Distribution Networks for Improvement of Passive Defense Indices"; Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2018, 15, 1-14.
- [3] Khakzad, N.; Reniers, G. "Low-capacity Utilization of Process Plants: A Cost-Robust Approach to Tackle Man-Made Domino Effects"; Reliability Eng. Syst. Safety 2018 (In Press).
- [4] Liao, W.; Salinas, S.; Li, M.; Li P.; Loparo, K. A. "Cascading Failure Attacks in the Power System: A Stochastic Game Perspective"; IEEE Int. Things J. 2017, 4, 2247-2259.

[30] Wu, C.; Hu, Z.; Liu J.; Wu, L. "Secure Estimation for Cyber-Physical Systems via Sliding Mode"; IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. 2018, 1, 1-12.

[31] Cetinkaya, A.; Ishii H.; Hayakawa, T. "Networked Control under Random and Malicious Packet Losses"; IEEE Trans. Autom. Control 2017, 62, 2434-2449.

[32] Li, H.; Rosenwald, G. W.; Jung, J.; Liu, C. "Strategic Power Infrastructure Defense"; Proceedings of the IEEE 2005, 93, 918-933.

[33] Bompard, E.; Gao, C.; Napoli, R.; Russo, A.; Masera, M.; Stefanini, A. "Risk Assessment of Malicious Attacks Against Power Systems"; IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. 2009, 39, 1074-1085.

[34] Fang, W.; Shunshan, F.; Wenxuan, W.; Fuwang, L. "Analysis of Action Mechanism of Graphite Bombs and Reaction Method of Power System"; Int. Conf. Power Syst. Technol. 2010.

[35] Cohen, F. "The Smarter Grid"; IEEE Security & Privacy 2010, 8, 60-63.

[36] <http://ejtemaee.khorasan.ir/>

[37] [Online] Available: <http://www.isipo.ir>

[38] [Online] Available: [www.khrrc.ir](http://www.khrrc.ir)

[39] Billinton, R.; Allan, N. "Reliability Evaluation of Power System"; 2<sup>nd</sup> Edition, New York, 1996.

[23] Hashemi, J.; Rashid, G. A.; Hoseini, H. "Strategic Considerations in the Comprehensive Study of Passive Defense Reducing vulnerabilities City"; Urban Management 2014, 6, 38-63 (in Persian).

[24] Jozi Khamselooei, A.; Javaheran, H. "An Analysis of the Role Passive Defense Plays in Strategic Security of Metropolises"; Geographical Data SEPEHR 2013, 22, 87-92 (in Persian).

[25] Pishgahifard, Z.; Ahmadi, F. "Assessment of National Security Threats in North Regions Locations of Iran"; Environmental Based Territorial Planning (Amayesh) 2010, 3, 53-77 (in Persian).

[26] Alizadeh Pahlavan, M. R.; Khosravi, M. "Presentation of a Practical Approach in Planning and Placement of Distributed Generation Sources Based on Multi-Objective Genetic Algorithms"; Adv. Defence Sci. Technol. 2018, 3, 181-190

[27] Amin, M. "Security Challenges For the Electricity Infrastructure"; Computer 2002, 35, 8-10.

[28] Zimmerman, R.; Restrepo, C.; Dooskin, N.; Hartwell, R.; Miller, J.; Remington, W. "Electricity Case: Main Report Risk, Consequences, and Economic Accounting"; CREATE, Tech. Rep., May 2005.

[29] Albert, I.; Nakarado, G. L.; Albert, R. "Structural Vulnerability of the North American Power Grid"; Physical Review E 2004, 69, 1-8.

پیوست

جدول ۶. اطلاعات جامع شهرها

ظرفیت نیروگاه ها (مگاوات)	تعداد نیروگاه	روی گسل	زلزله خیز	فرودگاه	هم مرزی (کیلومتر)		کارخانه بزرگ	شهرک صنعتی	میانگین دما	دما (سانتی گراد)		نوع منطقه	تعداد دهستان	جمعیت (نفر)	اسم شهر	
					کشور همسایه ۲	کشور همسایه ۱				سردترین	گرمترین					
-	-	-	هست	دارد	-	۲۰۷	-	۳	۱۳	-۰/۴	۲۶/۴	کوهستانی	۵	۳۶۵,۸۹۶	A	۱
-	-	هست	هست	-	-	-	-	۱	۱۴/۹	۲/۶	۲۷/۲	کوهپایه ای	۵	۳۶,۸۹۸	B	۲
۱۴۴۴	۱	-	هست	-	-	۷۵	۱	۲	۱۳/۶۵	-۰/۱	۲۷/۴	کوهستانی	۹	۱۵۷,۰۱۴	C	۳
-	-	-	هست	-	-	-	۵	۱	۱۲/۴۵	-۰/۸	۲۵/۷	کوهستانی	۷	۱۲۷,۰۱۲	D	۴
۶۰۰	۱	هست	هست	-	-	۲۸	۳۸	۲	۱۰/۸	-۲/۳	۲۲/۹	کوهستانی	۵	۱۷۹,۷۱۴	E	۵
-	-	-	-	-	-	۱۵۵	۳۵	۱	۱۴/۳	-۰/۶	۲۷/۸	کوهستانی	۷	۷۴,۳۳۶	F	۶
۹۵۴	۱	-	-	-	-	-	۷۰	۲	۱۱/۶۵	-۱/۶	۲۴/۹	کوهپایه ای	۵	۱۲۵,۶۰۱	G	۷
۸۷۶	۳	هست	هست	دارد	-	۱۸۰	-	۶	۱۲/۷۵	-۰/۵	۲۵	کوهپایه ای	۱۷	۳,۰۶۹,۹۴۱	H	۸
۱۳۸۸	۲	هست	هست	-	-	-	-	۳	۱۱	-۱	۲۳	کوهپایه ای	۱۷	۴۳۳,۱۰۵	I	۹
-	-	هست	-	دارد	-	-	-	۱	۱۰/۴۵	-۲	۲۲/۹	کوهپایه ای و بیابانی	۲۵	۳۱۹,۸۹۳	J	۱۰
۴۸۴	۱	-	-	دارد	-	۱۰۴/۳۵	-	۱	۱۴/۷۵	۱/۱	۲۸/۴	کوهپایه ای و بیابانی	۶	۸۹,۹۵۶	K	۱۱
-	-	هست	-	-	-	۸۷	۵۱/۴	۱	۱۶/۲	۴/۲	۲۸/۲	بیابانی و کوهپایه ای	۱۲	۲۶۲,۷۱۲	L	۱۲
-	-	-	-	-	-	-	-	۱	۱۱/۷	-۰/۳	۲۳/۱	کوهپایه ای	۵	۹۳,۹۳۰	M	۱۳
-	-	-	هست	-	-	۲۹۷	-	۱	۱۷/۱	۵/۲	۲۹	بیابانی	۶	۱۰۸,۴۲۴	N	۱۴
-	-	-	هست	-	-	۱۲۳	-	۱	۱۶/۶	۴/۸	۲۸/۴	بیابانی	۸	۱۲۱,۸۵۹	O	۱۵
۹۵۶	۱	-	هست	-	-	۱۶۹	-	-	۱۵/۷	۳/۸	۲۷/۶	بیابانی و کوهپایه ای	۸	۱۵۳,۴۰۱	P	۱۶
-	-	-	هست	دارد	-	-	-	۱	۱۳/۹	۱/۴	۲۶/۴	کوهپایه ای و بیابانی	۱۱	۲۱۰,۳۹۰	Q	۱۷
-	-	هست	هست	-	-	-	-	۱	۱۵/۶	۲/۳	۲۷/۹	کوهپایه ای	۵	۱۵۷,۱۴۹	R	۱۸
-	-	-	هست	-	-	-	-	-	۱۶/۵	۲/۹	۲۹/۱	بیابانی و کوهپایه ای	۶	۷۲,۶۲۶	S	۱۹
-	-	-	هست	دارد	-	-	-	۲	۱۷	۴/۸	۲۹/۲	بیابانی	۷	۸۰,۷۸۳	T	۲۰
-	-	هست	-	-	-	-	-	-	۱۶/۷	۴/۲	۲۹/۲	بیابانی و کوهپایه ای	۳	۴۱,۶۲۴	U	۲۱
-	-	-	-	دارد	-	-	-	۲	۲۰/۵۵	۷/۲	۳۳/۹	بیابانی	۸	۶۹,۶۵۸	V	۲۲
۰/۰۲۴	۱	-	هست	دارد	-	۱۴۰	-	-	۱۶/۶۵	۵/۱	۲۸/۲	کوهپایه ای و بیابانی	۶	۲۵۹,۵۰۶	X	۲۳
-	-	-	هست	-	-	۱۲۰	-	-	۱۸/۱۵	۶/۴	۲۹/۹	کوهپایه ای	۵	۵۷,۲۵۸	Y	۲۴