# تحلیل خسارت شریان‌های حیاتی با درنظرگرفتن اثرات وابستگی در اثر حملات هدفمند

## مطالعه موردی شبکه آب و برق در یک منطقه شهری

**محمد اسکندری** - دانشجوی دکتری عمران- نقشه‌برداری گرایش سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.
**بابک امیدوار*** - دانشیار، گروه مدیریت در سوانح طبیعی، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران. bomidvar@ut.ac.ir
**محمدصادق توکلی ثانی** - کارشناسی ارشد مدیریت در سوانح طبیعی، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران.

تاریخ دریافت: ۹۳/۶/۱۵ | تاریخ پذیرش: ۹۳/۷/۷

## چکیده

شریان‌های حیاتی یا همان زیرساخت‌ها جزء بنیان‌های اصلی و چارچوب‌های پایه‌ای هر جامعه به شمار می‌آیند که در برگیرنده‌ی تمامی تأسیسات، خدمات و تسهیلات مورد نیاز آن جامعه‌اند. در زندگی مدرن، با افزایش وابستگی سریع به این امکانات، این نیاز روزافزون شده است. شریان‌ها همواره دارای جذابیت خوبی برای حمله هستند؛ اولاً، طبق نظریه‌ی ۵ حلقه‌ی واردن، شریان‌ها مراکز ثقل یک کشور هستند که در صورت انهدام هر یک پیکره و کالبد کشور مورد تهاجم فلج می‌گردد و قادر به ادامه‌ی فعالیت و حیات نخواهد بود. دوماً، بر اساس طرح جنگ بی‌قاعده، از بین رفتن خدمت‌رسانی شریان‌ها منجر به کاهش رفاه اجتماعی و درانتها موجب سلب مشروعیت دولت مرکزی می‌شود. علاوه بر این، شناخت هرچه بیشتر شریان‌ها مسئله‌ی بسیار مهم‌تر وابستگی شبکه‌ها و تأثیرات متقابل آن‌ها در سوانح و حوادث را برجسته می‌نماید که مطالعه‌ی آن در حملات هدفمند موضوع این پژوهش است. برای تحلیل آسیب‌پذیری شریان‌های حیاتی، پس از معرفی هر یک از شریان‌های آب و برق در یک منطقه‌ی شهری، مدلی متشکل از دو مدل تئوری گراف و لئونتیف مورد استفاده قرار گرفته است. در این فرایند ابتدا دو شبکه‌ی مورد مطالعه به طور مجزا مدل شده است، سپس با استفاده از تئوری لئونتیف، برای سناریوهای مختلف، میزان شاخص سرویس‌دهی با در نظر گرفتن اثرهای وابستگی محاسبه گردیده و سناریوها بر اساس میزان آسیب وارد شده به شبکه اولویت‌بندی شده‌اند. همچنین می‌توان سناریوهای کاهش آسیب را نیز در این روش در نظر گرفت و میزان تأثیر هر کدام بر شاخص سرویس‌دهی را نیز محاسبه کرد. در نتیجه در محدوده‌ی مورد مطالعه، با در نظر گرفتن ۲۴۰ سناریو، مطالعات برای بدترین و بهترین سناریو انجام شده و میزان تأثیر هر کدام و نیز میزان تأثیر کاهش وابستگی سنجیده می‌شود و نهایتاً در نظرگیری اثر وابستگی در تعیین احتمال خرابی اجزای شبکه‌ی آب و برق، در برخی موارد دارای تأثیر کم و در برخی موارد زیاد است، اما در تمامی موارد تأثیر کاهشی در احتمال عملکرد و تأثیر افزایشی در احتمال خرابی اعضا دارند. با توجه به نتایج تحلیل، در بین سناریوهای تک شبکه‌ای، پس از آسیب‌پذیری ۱۰۰٪ در برابر حملات هدفمند، کمترین شاخص سرویس‌دهی به سناریوی ۱ (سناریوی انفجار در تصفیه‌خانه‌ی A) با شاخص سرویس‌دهی ۳۵/۷٪ و در بین سناریوهای ترکیبی، به سناریوی ۱۰ (سناریوی انفجار همزمان در هر دو تصفیه‌خانه‌ی A و B و پست برق الف با شاخص سرویس‌دهی ۱۱/۳٪ اختصاص دارد.

***واژه‌های کلیدی:*** *حملات هدفمند، شریان‌های حیاتی وابسته، تحلیل خسارت*

# Loss estimation of interdependent infrastructures in targeted attacks

## Case study: water and power networks in an urban area

**Mohammad Eskandari [1], Babak Omidvar*[2], Mohamad sadegh Tavakoli Sani[3]**

## Abstract

Lifelines and infrastructures are considered as basic foundations of modern society that are involved with all needed services and facilities by the society. In the modern life, the range of dependency to these infrastructures is increasing. Thus, they become an attractive target for enemies. First, based on Varden's five rings theory, lifelines are the center of gravity in every country that in case of any destruction, defeated country will be paralyzed and will not be able to continue its vital activities. Secondly, on the basis of irregular warfare, the loss of service of the infrastructures, leading to a reduction in social welfare and the central government would be delegitimized. In addition, in order to have a better understanding of the infrastructure systems, networks dependency and their interactions in the accidents are highlighted as very important issue. The study of the interaction between water and power networks as the targeted infrastructures is the objective of this paper. In order to analysis lifelines vulnerability, water and power networks in the district of Tehran as a case study were introduced. The proposed methodology module consists of two models, graph theory and Leontief model. In this process, first, two studied networks were separately modeled based on Graph theory and then with Leontief model, the Service Flow Reduction Index was calculated for each attack scenario. These scenarios were prioritized based on the amount of damage and the remained capacity of the studied networks. Moreover, the vulnerability reduction strategies were mentioned and the effects of each one on the index were calculated. As a result, 240 scenarios in the studied district were considered. Therefore, the study was conducted for identifying the worst and the best scenario and measuring the impact of each one with the effect of dependency reduction. Finally, by considering the effect of dependency in determining the failure probability of components in the water and power networks, it can be concluded that, in some cases the dependency effect could be neglected and in some cases the effect is considerable. But in all cases, these dependencies have an ascending impact on the performance probability, and descending impact on the failure probability. According to the results, among scenarios with one targeted component, 100% vulnerability to targeted attacks, scenario 1 (explosion in water treatment A) was achieved the least serviceability index as 7.35%. Also between scenarios with more than one targeted component, scenario 10 (explosion in both water treatment A and B and substation A) was achieved the least serviceability index as 3.11%.

**Key words:** *Targeted attracts, Dependent infrastructure, Loss estimatio.*

1 PhD Student in GIS (Geo Spatial Information System), Department of Civil Engineering Surveying, Malek ashtar University of Technology, Tehran, Iran.
2 Associate Professor, Department of Natural Disaster Management, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran; Email:bomidvar@ut.ac.ir
3 MSc. Graduated Disaster Management, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

## مقدمه

شریان‌های حیاتی شاهرگ‌های تعیین‌کننده‌ی بقای شهرنشینی در دنیای امروز هستند. این شریان‌ها برای تولید و توزیع کالاها و خدمات در واحدهای شهری به کار می‌روند و امکان زندگی در شهرها نیز بستگی به کیفیت و کمیت کارکرد این شریان‌ها دارد. در زندگی مدرن نیز با افزایش وابستگی سریع به این امکانات این نیاز افزون شده است. به عبارتی دیگر زیرساخت شبکه‌ای است مستقل، انسان‌ساز و بیشتر خصوصی که وظیفه‌ی آن مشارکت و همکاری در تولید و توزیع پیوسته‌ی خدمات و کالاهای اساسی است [۱] و همچنین، طبق تعریف سازمان امنیت اجتماعی و آمادگی شرایط اضطرار کانادا، زیر ساخت‌های حیاتی، شبکه‌ها، تأسیسات و سرویس‌های اطلاعاتی و فیزیکی مرتبط به یکدیگر هستند که اگر منقطع یا تخریب گردند، بر روی سلامتی، ایمنی، امنیت و اقتصاد جامعه تأثیر جدی خواهند گذاشت [۲].

عملکرد مناسب شبکه‌های زیرساختی در جوامع امروز، به صورت قطعی و اساسی، مورد نیاز است و هر گونه اختلالی در هر کدام از آن‌ها، به تنهایی، می‌تواند جان انسان‌های زیادی را تهدید کند. از آن جمله می‌توان به شبکه‌ی برق، آب آشامیدنی، نفت و گاز و سوخت‌رسانی، ارتباطات، مخابرات و اینترنت اشاره کرد. هر کدام از این شبکه‌ها ساختارهای مختص به خود دارند و برای خدمت‌رسانی و انتقال و توزیع خدماتشان از روش‌های مختلفی استفاده می‌کنند. همچنین در شرایط بحرانی نیز بر اساس تفاوت‌های ساختاری خود، واکنش‌های مختلفی برای جذب و بر طرف کردن اختلالات از خود نشان می‌دهند. بنابراین شناخت این شبکه‌ها و رفتارشان در شرایطی که هر روز نیز پیچیده‌تر می‌شوند، از اهمیت خاصی برخوردار است.

از طرف دیگر، خطرهای انسانی و طبیعی که هر روزه این تأسیسات را با تهدیداتی روزافزون مواجه می‌کند، بر اهمیت شناخت هر چه بیشتر این زیرساخت‌ها افزوده است. تهدیداتی مانند حملات تروریستی یا تحرکات نظامی در آن‌ها از جمله موانع موجود در راه توسعه و پیشرفت جوامع امروز است که حتی می‌تواند ادامه‌ی حیات آن جامعه را مورد تهدید قرار دهد. بنابراین شناخت صحیح از زیرساخت‌های حیاتی هر جامعه از پیش‌فرض‌های تعیین‌کننده‌ی بقای آن جامعه است.

بر این اساس، این مقاله سعی در بررسی بیشتر این وابستگی‌ها دارد و بر چگونگی استقرار شبکه، الگوهای جریان در درون شبکه و عملکرد بهینه‌ی متقابل بین شبکه‌ها متمرکز شده است. برای این منظور ابتدا به پژوهش‌های مرتبط در این حوزه، ذکر حوادث تاریخی در اثر وقوع سوانح انسان‌ساخت بر شبکه‌ی آب و برق و ذکر سوابق تاریخی در اثر خرابی‌های وابسته بین شریان‌ها می‌پردازیم. سپس شبکه‌ی مورد مطالعه را معرفی می‌کنیم و در ادامه الگوریتمی جامع برای تحلیل اندرکنشی حملات هدفمند و انفجار ارائه می‌دهیم. در انتها نیز بخشی از نتایج تحقیق ارائه می‌گردد.

## پیشینه‌ی تحقیق

شریان‌های حیاتی شبکه‌هایی هستند که از شبکه‌های دربرگیرنده‌ی صنعت، سازمان‌ها، شهرها و مردم تشکیل می‌شوند و یک روند توزیع و انتقال جریان از تولید به مصرف‌کننده را ایجاد می‌کنند. در پی حملات تروریستی ۱۱ سپتامبر و همین‌طور زلزله‌هایی مثل بم و ازمیر ترکیه و طوفان‌های کاترینا و ریتا، بحث حفاظت از شریان‌های حیاتی وسعت گرفت و تأکید بیشتر محققان بر تکنولوژی اطلاعات و بهبود عملکرد شریان‌ها بود. البته گفتنی است که تمام مطالعاتی که تا پیش از سال ۲۰۰۶ صورت گرفته است، فقط روی یک شریان بحث کرده‌اند و وابستگی بین آن‌ها را در نظر نگرفته‌اند [۳].

## پژوهش‌های مرتبط

اگرچه بیشتر تحقیقات در زمینه‌ی اندرکنش جدید است، اما تعدادی تحقیق قدیمی‌تر هم وجود دارد؛ برای مثال جی و همکارانش یک مدل برنامه‌ریزی برای اندرکنش شبکه‌ها ارائه داده بودند و مدل آن‌ها بر اساس تئوری THOSS و متغیرهای ورودی و خروجی بود و خود این مدل شامل تعدادی مدل اساسی دیگر می‌شد: مدل ارزیابی برای فهم اندرکنش شریان‌های حیاتی، مدل برای درک تفاوت انواع وابستگی‌ها، مدل برای شناسایی و کمی‌سازی انواع مختلف وابستگی‌ها، مدل شبیه‌سازی و آنالیز حساسیت [۴].

در مطالعه‌ی دیگری نوجیما و کامدیا در سال ۹۰ روشی برای ارزیابی ریسک شریان‌های حیاتی در زلزله توسعه دادند و تأکید آن‌ها بیشتر روی فهم وابستگی بین دو شبکه‌ی زیرساخت و کمی‌سازی بر هم کنش بین شبکه‌ها بود. همچنین کرونین و همکارانش اثرهای سرمایه‌گذاری روی شریان‌های حیاتی (مخابرات، برق) و در دسترس بودن آن‌ها را ارزیابی کردند. کم‌کم مطالعات به این جهت رفت که آثار اقتصادی عرضه نکردن خدمات شریان‌ها بر اثر در دسترس نبودن شریان‌های دیگر را محاسبه کنند [۵].

بیشتر مطالعات در زمینه‌ی یاد شده، با وجود اهمیت خاص آن، به شناخت خصوصیات یک شبکه به‌طور مجزا و با استفاده از روش‌های آماری پرداخته‌اند و در سطوح بالاتر ارزیابی ریسک و مدل‌سازی هر کدام از این شبکه‌ها را در دستور کار خود قرار داده‌اند. اما، به علت بررسی انفرادی شبکه‌ها در این تحقیقات، پیش‌بینی عملکرد شبکه‌ها در ارتباط با دیگر شبکه‌ها در شرایط بحرانی غیرواقعی و غیرمحتمل می‌شود، زیرا اندرکنش متقابل این شبکه‌ها با دیگر شبکه‌ها در این تحقیقات در نظر گرفته نمی‌شود و این مطلب را مطالعات جدیدی که در باب اندرکنش شبکه‌های مختلف انجام شده، به اثبات رسانیده است [۶].

### مروری بر خسارت‌های واردشده بر شبکه‌ی آب و برق در اثر سوانح انسان‌ساخت

آب، به‌منزله‌ی مهم‌ترین عامل حیات، جزء موارد مصرف دائمی بشر محسوب می‌شود و زندگی بشر را همواره تحت تأثیر

**جدول ۱: مروری بر وقایع تاریخی حملات انسان‌ساخت بر منابع آبی**

| ردیف | تاریخ | شرح حادثه | میزان خسارت |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۱۶۷۲ هلند | در مقابل حمله‌ی فرانسه به هلند، هلندی‌ها با تخریب سدها، کشور را به مرز آبی غیرقابل نفوذ تبدیل کردند. | |
| ۲ | ۱۹۰۷-۱۹۱۳ لس‌آنجلس، امریکا | بمب‌گذاری لوله‌های روی رودخانه | جلوگیری از انتقال آب از دره‌های اوون[1] به لس‌آنجلس |
| ۳ | ۱۹۵۱ کره‌ی شمالی | کره‌ی شمالی دریچه‌های هواچون[2] را باز کرد و آب با فشار زیاد جاری شد. | خرابی پل‌های معلق |
| ۴ | ۱۹۸۸ آنگولا | درگیری نیروهای آنگولا و کوبا بر روی سد کالوگ[3] | آسیب به دیواره‌ی سد، قطع شدن قسمت تأمین برق سد، تخریب خطوط لوله‌ی آب اوامبولند[4] |
| ۵ | ۱۹۹۹، لوساکا، زامبیا | انفجار بمب در خطوط لوله‌ی اصلی آب | قطع آب شهر لوساکا با ۳ میلیون نفر |
| ۶ | ۳۰ مه ۲۰۰۳، گوامالیتو، کلمبیا | تروریست‌ها با حمله به بخشی از خطوط لوله‌ی نفت کورناس[5]، ۷۰۰۰ بشکه نفت خام را وارد رودخانه‌ی سیمیتار[6] کردند. | آلودگی محیطی، بی آب شدن حدود ۵۰۰۰ نفر |
| ۷ | ۲۰۰۳ بغداد | خرابکاری و بمب‌گذاری در خطوط لوله‌ی اصلی آب در بغداد | قطع آب و تخریب شبکه‌ی خطوط لوله |

قرار داده است. از آنجا که تأمین آب با کمیت و کیفیت خاصی مورد نیاز است، برای جلوگیری از عوامل تهدید از جمله حملات هوایی، حملات زمینی، موشکی و تروریستی به تأسیسات، لازم است تا اقدامات مناسب پیشگیرانه در نظر گرفته شود. در کشور ما بیشتر طرح‌ها بدون در نظر گرفتن مبانی پدافند غیرعامل طراحی و اجرا شده است. ازاین‌رو تأسیسات زیربنایی کشور در برابر بحران آسیب‌پذیر و سهل‌الوصول‌اند و اغلب اهداف مناسب و جذابی برای عملیات خرابکارانه به شمار می‌روند. در این میان، به علت برخی خصوصیات از قبیل فراگیر بودن و قابلیت دسترسی، تأسیسات آب‌رسانی از اهمیت و جذابیت بالایی برای دشمن برخوردار است [۷].

مراحل اصلی تولید آب و آب‌رسانی می‌تواند به ترتیب شامل منابع آب، ذخایر آب خام، ایستگاه پمپاژ، خط انتقال آب خام، تصفیه‌خانه‌ی آب، مخازن آب تصفیه‌شده و شبکه‌های توزیع باشد. چنانکه ملاحظه می‌شود، این اجزا از وسعت بالایی برخوردارند و احتمال مورد اصابت واقع شدن و آلودگی آن‌ها بسیار زیاد است.

تأسیسات برقی موجود در شهرها شامل خطوط انتقال برق، نیروگاه‌ها، پست‌های برق و شبکه‌ی توزیع است. نیروگاه‌ها و خطوط انتقال برق، معمولاً از جمله اهداف جذابی هستند که در ساعات اولیه‌ی جنگ مورد اصابت قرار می‌گیرند. از آنجا که تمام وسایل الکتریکی و الکترونیکی، ساختمان‌ها و برخی سایت‌ها (تلویزیون، رادیو، رایانه، شبکه‌ی مخابرات، فرودگاه‌ها، بیمارستان‌ها، سایت‌های نظامی و ...) با نیروی برق تغذیه می‌کنند، بنابراین، با از کار افتادن آن‌ها در اثر قطع برق، دشمن به بسیاری از موارد مورد نظر خود دست می‌یابد.

زیرساخت‌ها اعم از شبکه‌ی آب و برق، علاوه بر تأثیرپذیری در رخدادهای طبیعی، بر اثر سوانح انسان‌ساخت (همچون حملات هدفمند موشکی و تروریستی) نیز دچار خسارت و قطع سرویس‌دهی و استمرار فعالیت خود شده‌اند. دارایی‌های زیرساختی، اهداف بسیار نرم‌تری نسبت به تأسیسات دولتی هستند و جذابیت بیشتری برای تروریست‌ها دارند. علاوه بر این، پیامدهای اقتصادی و روانی ناشی از ضربه به هر یک از بخش‌های زیرساخت، مخرب‌تر و وسیع‌تر از تخریب یکی از تأسیسات نظامی است.

بیش از دو سوم حملات تروریستی معطوف به اهداف اقتصادی است و به غیر از مواردی است که جنبه‌ی انتقام‌جویانه و خاص دارد. گروه‌های تروریستی امروز توجه خود را به اهداف آسیب‌پذیر و حیاتی‌تری از جمله پل‌ها و تونل‌ها، شبکه‌های ارتباطی و رایانه‌ای، شبکه‌های ملی برق، سوخت و گاز، حمل و نقل و آب آشامیدنی معطوف کرده‌اند. در ادامه در جدول‌های ۱ و ۲ به ترتیب بر وقایع تاریخی حملات انسان‌ساخت بر منابع آبی و شبکه‌ی برق مرور شده است [۸].

در طول دهه‌ی گذشته، کشورهای مختلف متحمل خسارات زیادی از سوانح و حوادث بزرگ‌مقیاس شده‌اند. در حالی که ممکن است آثار یک اغتشاش کوچک در شبکه، بدون به وجود آمدن هر گونه اختلالی، جذب شود؛ اما نمونه‌هایی نیز وجود دارند که

**جدول ۲: مروری بر وقایع تاریخی حملات انسان‌ساخت بر شبکه‌ی برق**

| ردیف | تاریخ | شرح حادثه | میزان خسارت |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۲ ژوئن ۲۰۰۴، آماریلو[۷]، آمریکا | بدون یافتن دلیلی خاص، برق در تأسیسات مهمات هسته‌ای آماریلو به مدت یک ساعت قطع گردید. | خاموشی تمام مرکز؛ گرچه برق پشتیبان خیلی زود فعال شد. |
| ۲ | ۱۷ ژوئن ۲۰۰۴، ویسکانسین[۸]، آمریکا | فردی به نام کونپکا[۹] معروف به دکتر آشفتگی، خرابکاری‌های زیادی از جمله خطوط انتقال برق و آسیب به رایانه‌ها وارد کرد. | قطع برق بیش از ۳۰۰۰ مصرف‌کننده، خسارت بالغ بر ۸۰۰ هزار دلار |
| ۳ | ۴ اوت، ۲۰۰۴، آتن یونان | انفجار بمب دست‌ساز در نزدیکی مرکز برقی در آتن | وارد کردن خرابی‌های بدون آسیب جانی، ایجاد رعب و وحشت با توجه به نزدیکی به المپیک آتن |
| ۴ | ۱۵ سپتامبر ۲۰۰۴، ایرون[۱۰]، اسپانیا | انفجار ۴ قطعه بر روی دکل برق | آسیب به پی دکل |
| ۵ | ۷ دسامبر ۲۰۰۴، کانادا | کار گذاشتن مواد منفجره در یک برج برق فشار قوی | این اتفاق همزمان با بازدید رئیس جمهور آمریکا (بوش) از کانادا بود. قطع سراسری برق مهار شد. |
| ۶ | ۲۸ دسامبر ۲۰۰۴، نواداء آمریکا | خرابکاری بر ۴ خط انتقال فشار قوی برق به ناحیه‌ی رنو[۱۱] | سقوط هر یک از دکل‌ها، سبب خرابی زنجیره‌ای سایر دکل‌ها می‌شود. |
| ۷ | ۲۰ مه ۲۰۰۶، ویزی[۱۲]، آمریکا | افرادی وارد نیروگاه هیدروالکتریک بانگور[۱۳] شدند و سیم‌های مسی را دزدیدند. | قطع برق برای حدود ۶ ساعت |
| ۸ | ۲۰ مه ۲۰۰۶، کلمبیا | حمله‌ی شورشی‌ها با نارنجک به شهر بوناونتورا[۱۴] | جراحت ۲۴ نفر و قطع کامل برق شهر |

همین وقایع پشت سر هم منجر به گسترش و انتشار خرابی‌های بزرگ و پی‌درپی شده‌اند و تا از کار انداختن کل و یا بخش مهمی از عملکرد یک شبکه پیش رفته‌اند. از جمله‌ی این وقایع می‌توان به زمین‌لرزه‌ی بندر کوبه‌ی ژاپن که منجر به قطع آب، برق و گاز به صورت اندرکنشی در این شهر [۹]، قطع باجه‌های خودپرداز و کارت‌های اعتباری پس از خرابی غیرمترقبه‌ی ماهواره‌ی مخابراتی Pan Am Sat Galaxy IV در ۱۹ مه سال ۱۹۹۸ [۱۰]، حمله‌ی تروریستی ۱۱ سپتامبر ۲۰۰۱ و قطع تمامی زیرساخت‌های واقع در حوزه‌ی جغرافیایی متأثر [۱۱] اشاره کرد.

موارد فراوان مشابه دیگری را نیز در این زمینه می‌توان یاد کرد. اما نتیجه‌ی روشن مشترک همه‌ی این موارد این است که اختلالات می‌توانند تا نقطه‌ی به خطر انداختن کل عملکرد شبکه‌ها گسترش یابند. این گسترش در حقیقت به‌وسیله‌ی ساختار زیربنایی بارز این شبکه‌ها که شبکه‌های کاملاً به هم پیوسته‌ای هستند، ایجاد شده است. هدف اساسی این مقاله تعیین میزان اثر همبستگی شبکه‌ها در واکنش آن‌ها به اختلالات است. در عین حال رشد بسیار سریع و مستقل شبکه‌ها، که عامل بسیار مهمی است، نیز باید در نظر گرفته شود.

## روش پژوهش

وابستگی اتصال یا ارتباط بین دو زیرساخت است که به واسطه‌ی آن کیفیت عملکرد یک زیرساخت بر چگونگی عملکرد زیرساخت دیگر تأثیرگذار است [۶]. ازاین‌رو مفاهیم وابستگی بسیار متنوع هستند و هر کدام از آن‌ها خصوصیات خاص خود را دارند و آثار خاص خود را بر اجزای زیرساخت می‌گذارند. به طور خلاصه می‌توان انواع وابستگی را در چهار کلاس اصلی وابستگی یعنی فیزیکی، سایبری[۱۵]، جغرافیایی و منطقی[۱۶] تعریف و بررسی کرد [۱۲، ۱۳].

مدلی که در این تحقیق برای مدل‌سازی آثار وابستگی شریان‌های حیاتی در اثر رخداد انفجار و حملات هدفمند استفاده شده است، بر پایه‌ی مدل ورودی - خروجی[۱۷] لئونتیف[۱۸] است. این مدل در حقیقت چارچوبی برای مطالعه‌ی رفتارهای تعادلی در اقتصاد است [۱۴، ۱۵]. شبکه‌های مطالعه‌شده با این مدل شامل چندین بخش، زیربخش یا بخش اقتصادی و صنعتی مجزا هستند. میلر و بلیر معرفی جامعی از این مدل به همراه تعداد زیادی از کارکردهای آن ارائه کرده‌اند [۱۶]. مدل پایه‌ای I-O لئونتیف در اقتصاد می‌تواند در علوم دیگری مانند علم شبکه و برای مدل I-O شریان‌های حیاتی بر پایه‌ی مدل لئونتیف به کار گرفته شود [۱۷].

مدل I-O لئونتیف اقتصادی را که در آن n نوع کالا به‌منزله‌ی خروجی با استفاده از منابع اولیه در حکم ورودی تولید می‌شود، تحلیل می‌کند. برای مدل پیشنهادی، n زیرساخت با ارتباطات درونی و بیرونی پیچیده را در نظر می‌گیریم. همچنین خروجی ریسک عدم عملکرد موجود آن‌ها که می‌تواند به خاطر یک یا چندین خرابی به سبب پیچیدگی آن‌ها، حوادث یا عملیات

تروریستی شروع شده باشد، نیز در نظر گرفته می‌شود. ورودی سیستم نیز می‌تواند خرابی به سبب سوانح بلایای طبیعی و یا حملات هدفمند باشد.

فرض کنید $xj$ برای $j=1, 2,..., n$، کل ریسک $j$امین زیرساخت دارای ارتباطات درونی و بیرونی پیچیده باشد که می‌تواند با یک یا چندین خرابی به سبب تصادف یا خرابکاری هدف قرار گرفته شود. زمانی که واحد پولی برای مدل اقتصادی لئونتیف به کار برده شود، ریسک عدم عملکرد استفاده شده در مدل، شاخصی از درجه و احتمال عدم عملکرد خواهد بود. همچنین $x_{kj}$، درجه‌ی عدم عملکرد هدف قرار گرفته با یک یا چند خرابی، به سبب تصادف یا خرابکاری، است که زیرساخت $j$ام به سبب ارتباطات درونی و بیرونی با زیرساخت $k$ام متحمل می‌شود.

با فرض اینکه $a_{kj}$، احتمال عدم عملکردی که j امین زیرساخت به سبب پیچیدگی‌های ارتباط بین آن‌ها در $k$ امین زیرساخت به وجود می‌آورد، باشد. این ضرایب احتمالی با مدل اقتصادی لئونتیف در ارتباط است. با توجه به اینکه آن‌ها، غیر منفی و ثابت است، می‌توان گفت روابط موجود برای تولید کالاها یا خدمات، خطی فرض شده‌اند. به این معنی که در مدل، می‌توان گفت که $a_{kj}$ توصیف‌کننده‌ی درجه‌ی وابستگی k امین زیرساخت به j امین آن‌هاست. برای مثال اگر $a_{kj}=1$ باشد، خرابی کامل در $j$ امین زیرساخت منجر به خرابی کامل در $k$ امین زیرساخت خواهد شد. با این تعریف باید در ماتریس وابستگی‌ها، $A$، اعضای روی قطر اصلی، $a_{kk}$، در نظر گرفته شوند. تا این مرحله هنوز اثرهایی که به وسیله‌ی خود زیرساخت ایجاد می‌شود وارد نشده است.

$c_k$، ریسک اضافی عدم عملکردی $k$ امین زیرساخت که دارای پیچیدگی‌های ذاتی (مانند ارتباطات درون سیستمی و بین سیستمی) است فرض شده و نیز می‌تواند به وسیله‌ی رویدادهای تصادفی، سوانح طبیعی و عملیات تروریستی ایجاد شده باشد. به خاطر دشواری زیاد تعیین احتمالی که تروریستی زیرساخت خاصی را بر پایه‌ی ارتباطات بینابینی آن با دیگر زیرساخت‌ها انتخاب کند، و یا پیچیدگی ذاتی این احتمال، شاخص ریسک، $c_k$، به دو عامل احتمال و درجه‌ی عدم عملکرد تجزیه می‌شود. با برقرار شدن فرض تناسب روابط زیر به دست می‌آیند [۱۸]:

رابطه‌ی ۱: $x_{kj} = a_{kj}\, x_j \,,j,\ k= 1, 2, \ldots, n$

رابطه‌ی ۲: $X_K = \Sigma\, X_{KJ} + C_K \qquad ,k= 2\ ,1, \ldots, n$

بنابراین رابطه‌ی ۲ کلیدی برای توسعه‌های بعدی معادله بر پایه‌ی لئونتیف است. ترکیب این معادله با معادله‌ی تناسب به معادله‌ای بر پایه‌ی لئونتیف برای مدل‌سازی زیرساخت‌ها منتهی می‌شود:

رابطه‌ی ۳: $X_K = \Sigma\, (a_{KJ} * X_J) + C_K \qquad ,k= 2\ ,1, \ldots, n,$

برای نوشتن رابطه‌ی بالا بر اساس نشانه‌گذاری‌های ماتریسی پارامترهای موجود را به صورت زیر تعریف می‌کنیم (تمام این پارامترها غیرمنفی هستند):

$X = [x_1, x_2, \ldots, x_n]^T \quad for \quad 0 \le x_i \le 1$

$C = [C_1, C_2, \ldots, C_n]^T \quad A = [a_{KJ}]_{nxn} \quad ; \quad I = [\text{ماتریس واحد}]_{nxn}$

با این تعاریف رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

رابطه‌ی ۴: $X = A * X + C$

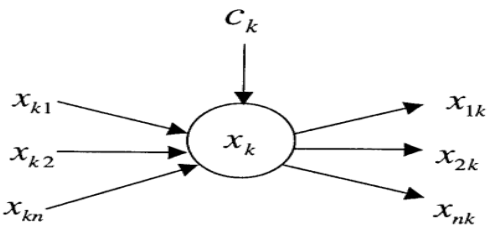
که می‌توان آن را به شکل زیر نیز نوشت:

$X = (1-A)^{-1}C$

با فرض غیر صفر بودن $(I - A)$، معادله‌ی لئونتیف می‌تواند برای تمام ریسک عدم عملکرد زیرساخت‌ها به صورت زیر حل گردد:

رابطه‌ی ۵: $X= (I-A)^{-1}\, C$

در این چارچوب، روابط ورودی - خروجی می‌توانند به صورت تصویر ۱ به صورت ساده شده نمایش داده شوند. $\{x_{KJ}\}$ و $c_k$، ورودی و $\{x_{JK}\}$ خروجی زیرساخت $k$ ام را تشکیل می‌دهند. ماتریس $A = \{a_{KJ}\}$ نقش محوری را در تعریف مسئله بازی می‌کند. وقتی که سیستم در شرایط عالی، و یا شرایطی که تمام اجزا به صورت بی‌نقص در آن ایفای نقش می‌کنند، باشد، $x_K=0$ برای تمام $k$ها و $\sum_K X_K=0$ . است که این حالت، حالت پایه خوانده می‌شود.



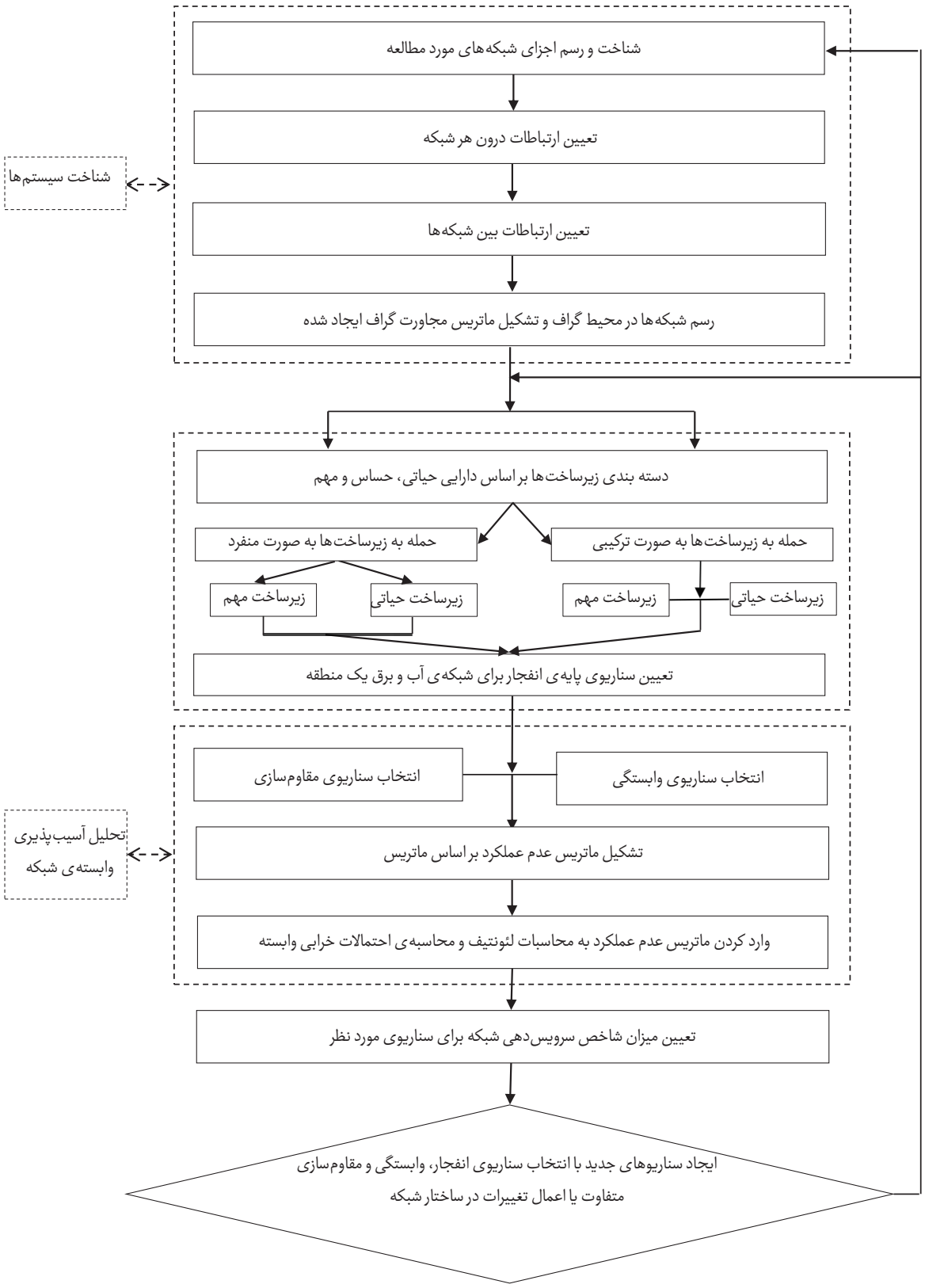

**تصویر۱: روابط ورودی - خروجی**

با توجه به موارد ذکر شده در بالا، در این تحقیق، پس از ایجاد ماتریس مجاورت شبکه‌ها و مدل کردن آن‌ها بدین طریق در تئوری گراف، بر اساس تعاریف بالا ماتریس عدم عملکرد برای هر دو شبکه ایجاد می‌گردد. از ترکیب و کنار هم قرار گرفتن این دو ماتریس، ماتریس عدم عملکرد برای اندرکنش این دو شبکه نیز ایجاد می‌شود.

## شناخت شبکه و آماده‌سازی لایه‌ها

شبکه‌های آب و برق در منطقه‌ی منتخب مجموعاً دارای ۳۵ عضو (۲۵ عضو شبکه‌ی آب و ۱۰ عضو شبکه‌ی برق) است. عمده‌ی آب منطقه‌ی منتخب با دو تصفیه‌خانه‌ی A و تصفیه‌خانه‌ی B تأمین می‌گردد. این دو تصفیه‌خانه در مجموع ۳۵٪ آب شرب مصرفی منطقه‌ی منتخب را تصفیه می‌کند. ۲ مجموعه چاه، ۱۳ مخزن ذخیره و توزیع آب و همچنین ۸ ایستگاه پمپاژ، دیگر اعضای شبکه‌ی آب منطقه را تشکیل می‌دهند. از نظر رده‌بندی اعضا برای به دست آوردن میزان آسیب‌پذیری آن‌ها، تصفیه‌خانه‌های منطقه در رده‌ی تصفیه‌خانه‌های بزرگ قرار می‌گیرند.

شبکه‌ی برق منطقه‌ی منتخب در سطح مورد مطالعه دارای ۱۰ پست ۶۳/۲۰ کیلو ولت است. از لحاظ تقسیم‌بندی‌های




**تصویر ۲: مراحل شکل‌دهنده‌ی الگوریتم مدل برای تحلیل اندرکنشی شریان آب و برق در اثر انفجار**

استفاده شده در بررسی آسیب‌پذیری شبکه‌ی برق منطقه، این پست‌ها در رده‌ی پست‌های ولتاژ پایین قرار می‌گیرند.

در تصویر ۱ طرح کلی ارتباطات شبکه‌ی آب و برق منطقه‌ی مورد مطالعه نشان داده شده است. در این تصویر شبکه‌ی آب به رنگ آبی، شبکه‌ی برق به رنگ سبز و ارتباطات بین آن‌ها به رنگ قرمز نشان داده شده است. مخازن دارای ایستگاه پمپاژ به صورت مکعب مستطیل و مخازن بدون ایستگاه پمپاژ با مقطع دایره نشان داده شده است.

## الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم انتخابی بر اساس تلفیقی از روش تئوری گراف و ماتریس مجاورت لئونتیف است. مدول‌های ایجادکننده‌ی الگوریتم شامل آماده‌سازی لایه‌ها، سناریوی انفجار، آسیب‌پذیری، لئونتیف و شبیه‌سازی مونت‌کارلو و تحلیل شبکه است. فرایند الگوریتم پیشنهادی شامل مراحل زیر می‌شود (تصویر ۲):

- **گام اول**

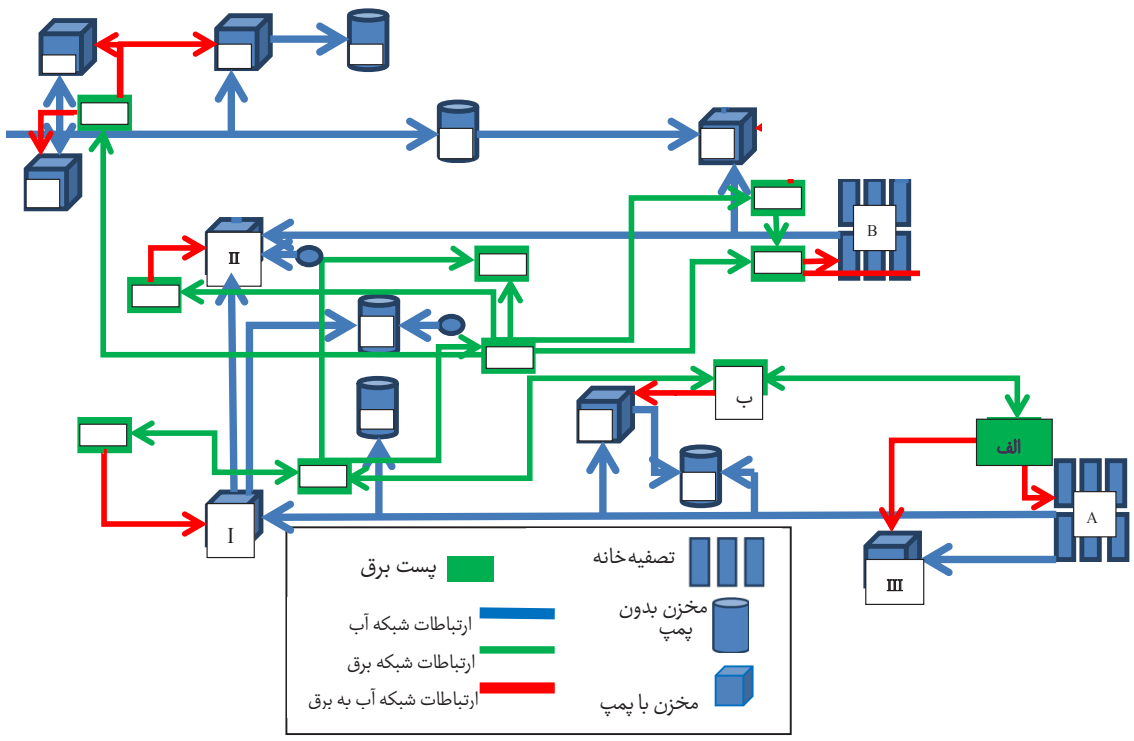
آماده‌سازی لایه‌ها: در ابتدا باید شبکه‌های موجود و مورد بررسی به صورت گراف مدل شود و اتصالات موجود بین اعضا، اعم از اتصالات درون شبکه‌ای و اتصالات بین شبکه‌ای، در مدل مشخص شود. شبکه با ارتباطات داخلی به صورت طرح کلی در تصویر ۳ به نمایش درآمد.

- **گام دوم**

رسم ماتریس مجاورت: در این مرحله، بر اساس گراف ایجادشده، ماتریس مجاورت شبکه‌های مورد مطالعه استخراج می‌گردد. دقت در استخراج این ماتریس تضمین‌کننده‌ی صحت بقیه‌ی مراحل و محاسبات است، زیرا به خاطر کثرت اعضای مورد بررسی ماتریس‌های بزرگ و پر درایه‌ای ایجاد می‌گردد. ماتریس مجاورت گراف شبکه‌ها، ماتریسی منحصر به فرد و مربعی است که نحوه‌ی متصل شدن اعضا به یکدیگر در یک شبکه را نشان می‌دهد. خصوصیات توپولوژیک شبکه، اولین برداشتی است که می‌توان از این ماتریس داشت. در گراف‌های ساده، این ماتریس از ۰ و ۱ هایی تشکیل شده که نسبت به قطر اصلی قرینه هستند. در حالی که برای گراف‌های جهت‌داری مانند شبکه‌های زیرساختی که در آن‌ها جریان‌هایی از کالاها و خدمات جاری است، درایه‌های این ماتریس دیگر لزوماً ۰ و ۱ و متقارن نیستند و هر آرایشی را نسبت به نوع شبکه‌ی مورد بررسی می‌توانند به خود بگیرند. این ماتریس از چهار بخش تشکیل شده است. این ۴ بخش عبارتند از ارتباطات درون شبکه‌ی آب یا اندرکنش‌های درون شبکه‌ای برای شبکه‌ی آب، ارتباطات درون شبکه‌ی برق، ارتباطات بین شبکه‌های برق با آب، ارتباطات بین شبکه‌های آب با برق.

- **گام سوم**

انتخاب سناریوی پایه برای حملات هدفمند: در این مرحله باید سناریوهای انفجارهای قابل پیش‌بینی در این منطقه را در نظر گرفت. بر این اساس اجزای حیاتی و مهم شبکه‌ها در منطقه برای تولید سناریو مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سناریوها به دو شکل ایجاد می‌شوند. در سناریوهای نوع اول اعضا به صورت انفرادی مورد حمله قرار می‌گیرند، در مقابل برای سناریوهای نوع دوم ترکیبی از اعضای مورد حمله واقع شده، تحلیل می‌شود. همچنین در دسته‌بندی دیگری برای سناریوهای انفجار می‌توان




**تصویر ۳: طرح کلی ارتباطات شبکه‌ی آب و برق منطقه‌ی مورد مطالعه**

به سناریوهای انفجار تنها در شبکه‌ی آب و همچنین سناریوهای انفجار در شبکه‌ی آب و برق اشاره کرد. در این مطالعه ۱۰ سناریو برای پیش‌بینی شرایط شبکه‌ی آب در حملات تروریستی و حملات هدفمند به اعضای مهم و حیاتی (شبکه دارای ۲ عضو مهم و ۳ عضو حیاتی است) شبکه‌های منطقه تولید شده است.

اعضای با اهمیت بالا در این منطقه‌ی منتخب شامل تصفیه‌خانه‌ی A و تصفیه‌خانه‌ی B است. در کنار این دو عضو سه عضو دیگر که در شبکه‌های آب و برق منطقه حیاتی هستند، شامل پست برق الف و همچنین مخازن I و II در نظر گرفته شده‌اند. بر این اساس دارای ۵ سناریو شامل انفجار انفرادی اجزا خواهیم بود که به ترتیب شامل موارد زیر است:

۱. سناریوی حمله به تصفیه‌خانه‌ی A
۲. سناریوی حمله به تصفیه‌خانه‌ی B
۳. سناریوی حمله به مخزن I
۴. سناریوی حمله به مخزن II
۵. سناریوی حمله به پست برق الف

در کنار سناریوهای بالا ۵ سناریو از ترکیب حملات به اعضای معرفی‌شده نیز ایجاد شد تا بیشترین دامنه‌ی احتمالات این‌گونه حملات در این منطقه پوشش داده شود. بر این اساس سناریوهای زیر نیز به ترتیب ایجاد شدند:

۱. ۱. سناریوی حمله‌ی همزمان به تصفیه‌خانه‌ی A و پست برق الف
۲. سناریوی حمله‌ی همزمان به تصفیه‌خانه‌ی B و پست برق الف
۳. سناریوی حمله‌ی همزمان به تصفیه‌خانه‌ی A و B
۴. سناریوی حمله همزمان به مخازن I و II
۵. سناریوی حمله‌ی همزمان به تصفیه‌خانه‌ی A و B و پست برق الف

در سناریوهای ایجادشده، ۶ سناریو، مستقل از شبکه‌ی برق است و تنها در شبکه‌ی آب اتفاق می‌افتند و ۴ سناریوی باقی‌مانده در هر دو شبکه یا تنها در شبکه‌ی برق اتفاق افتاده و بنابراین تأثیر کاهش وابستگی بین شبکه‌ای نیز در آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

**• گام چهارم**

احتمال خرابی مستقل: بعد از تعیین سناریوهای انفجار در اعضای شبکه‌های مورد بررسی، باید احتمال خرابی مستقل آن‌ها نیز در نظر گرفته شود. در این مرحله، علاوه بر سناریوهای فوق، چهار سناریو برای تحلیل مقاوم‌سازی و کاهش آسیب‌پذیری اعضا در مقابل این‌گونه حملات نیز شکل می‌گیرد:

۱. مقاوم‌سازی نکردن در عضو و آسیب‌پذیری ۱۰۰٪ در برابر حملات (وضعیت موجود): در این حالت برای تعیین ماتریس احتمال خرابی مستقل C={Ck} در رابطه‌ی ۵، برای سناریوی ۱، احتمال خرابی تصفیه‌خانه‌ی A و پست برق الف برابر با ۱۰۰٪ در ماتریس مربوط قرار داده می‌شود و برای باقی‌مانده‌ی اجزا، چون خرابی برای آن‌ها پیش‌بینی نشده است، صفر در نظر گرفته می‌شود.
۲. مقاوم‌سازی در عضو و آسیب‌پذیری ۷۵٪ در برابر حملات: در این حالت برای تعیین ماتریس احتمال خرابی مستقل C={Ck} در رابطه‌ی ۵، برای سناریوی ۳، احتمال خرابی تصفیه‌خانه‌ی A و B برابر با ۷۵٪ در ماتریس مربوط قرار داده می‌شود و برای باقی‌مانده‌ی اجزا، چون خرابی برای آن‌ها پیش‌بینی نشده است صفر در نظر گرفته می‌شود.
۳. مقاوم‌سازی در عضو و آسیب‌پذیری ۵۰٪ در برابر حملات
۴. مقاوم‌سازی در عضو و آسیب‌پذیری ۲۵٪ در برابر حملات

**• گام پنجم**

تعیین ماتریس عدم عملکرد: ماتریس عدم عملکرد بر اساس ماتریس مجاورت شبکه‌های مدل شده ایجاد می‌گردد. به گونه‌ای که پس از تشکیل ماتریس مجاورت برای شبکه‌های مورد بررسی، در مرحله‌ی بعد باید از تئوری لئونتیف استفاده شود. تئوری لئونتیف یک تئوری اقتصادی است که در آن با در نظر گرفتن ارتباطات میان بخش‌های مختلف یک اقتصاد می‌توان به بررسی تأثیر تغییرات در این روابط یا ورود عوامل خارجی به حوزه‌ی اقتصادی پرداخت. بر اساس این تئوری و با ایجاد ماتریس عدم عملکرد برای شبکه، از روی ماتریس مجاورت، می‌توان وارد مرحله‌ی انجام تحلیل اندرکنش‌ها شد.

این ماتریس برای سناریوهای وابستگی متفاوتی که در دست بررسی است آماده می‌شود. در این مقاله، برای سناریوهای با احتمال خرابی بین هر دو شبکه، سناریوهای وابستگی کامل شبکه‌ی آب به برق (۱۰۰٪) و وابستگی‌های کمتر از آن (۸۰٪، ۶۰٪، ۴۰٪ و ۲۰٪) و همچنین شبکه‌ی آب مستقل از شبکه‌ی برق و تنها دارای وابستگی‌های درون شبکه‌ای، مورد مطالعه قرار می‌گیرند و مجموعاً ۶ سناریوی وابستگی به ترتیب زیر را تشکیل می‌دهند:

۱. احتمال خرابی اجزای شبکه‌ی آب مستقل از شبکه‌ی برق
۲. احتمال خرابی اجزای شبکه‌ی آب با وابستگی ۲۰٪ شبکه‌ی برق
۳. احتمال خرابی اجزای شبکه‌ی آب با وابستگی ۴۰٪ شبکه‌ی برق
۴. احتمال خرابی اجزای شبکه‌ی آب با وابستگی ۶۰٪ شبکه‌ی برق
۵. احتمال خرابی اجزای شبکه‌ی آب با وابستگی ۸۰٪ شبکه‌ی برق
۶. احتمال خرابی اجزای شبکه‌ی آب با وابستگی ۱۰۰٪ شبکه‌ی برق: این مسئله به این معنی است که پس از تهیه‌ی ماتریس مجاورت بین هر کدام از دو عضو شبکه به صورت تک‌تک (برای مثال تصفیه‌خانه‌ی A با تمامی اجزا باید پایش شود و اگر ارتباطی وجود دارد باید در ماتریس مجاورت عدد ۱ و در غیر این صورت عدد صفر قرار داده شود)، ماتریس عدم عملکرد یعنی جابه‌جایی سطر با ستون ماتریس مجاورت و اعمال برخی اصلاحات (یعنی چنانچه پس از جابه‌جایی سطر و ستون زمانی که

مشاهده شد پمپ (الف) با مخزن III، تصفیه‌خانه‌ی A و پست برق ب، ارتباط دارد و چون اندرکنش شبکه‌ی آب با برق ۱۰۰٪ فرض شده است، پس عدم عملکرد می‌تواند ۵۰٪ به علت خرابی در شبکه‌ی آب و ۵۰٪ در اثر شبکه‌ی برق باشد؛ ازاین‌رو چون شبکه‌ی آب از ۲ جزء (هم تصفیه‌خانه A و هم مخزن III) آب به مدار می‌آورد، پس سهم عدم عملکرد هر یک در ماتریس ۲۵٪ قرار داده می‌شود و چون برق از یک پست (ب) فقط وارد می‌شود، سهم عدم عملکرد آن، همان ٪۵۰ باقی می‌ماند. از این رو این ماتریس برای سایر اعضا عدد صفر و برای تصفیه‌خانه‌ی A و مخزن III عدد ۰/۲۵ و برای پست (ب) عدد ۰/۵ قرار داده می‌شود که مجموع اعداد آن سطر برابر ۱ است. این روند برای تمامی اجزا به دقت صورت می‌پذیرد.

**• گام ششم**

تعیین احتمال خرابی وابسته: با وارد کردن این ماتریس‌ها و احتمالات خرابی مستقل اعضا در روابط لئونتیف و رابطه‌ی ۵، احتمالات خرابی وابسته برای هر سناریوی انفجار و هر سناریوی وابستگی به دست خواهد آمد. بدین ترتیب ۱۰ سناریوی انفجار خواهیم داشت که از ترکیب آن‌ها با ۴ سناریوی مقام‌سازی معرفی‌شده ۴۰ سناریو تولید خواهد شد. پس از آن نیز برای هر کدام از سناریوی خرابی که در آن‌ها دو شبکه‌ی مرتبط آب و برق با هم و به طور همزمان متأثر می‌شوند، ۶ سناریوی وابستگی نیز لحاظ خواهد شد. بنابراین مجموعاً ۲۴۰ سناریوی انفجار وارد این مرحله می‌شود.

**• گام هفتم**

تحلیل شاخص عملکرد شبکه: شاخص عملکرد شبکه، خروجی این فرایند است. در این مرحله مسیرهای جریان درون شبکه مشخص می‌شود و سهم هر مسیر نیز تعیین می‌گردد. حال بر اساس احتمالات خرابی وابسته‌ی مختلف، برای هر کدام از این سناریوها، شاخص عملکرد شبکه به دست می‌آید.

## نتایج و بحث

با توجه به نتایج تحلیل، در بین سناریوهای منفرد (تک شبکه‌ای)، سناریوی انفجار در تصفیه‌خانه‌ی A و سناریوی انفجار همزمان در تصفیه‌خانه‌ی A و B در بین سناریوهای ترکیبی (دو شبکه‌ای) سناریوی انفجار همزمان در هر دو تصفیه‌خانه‌ی A و B و پست برق الف، آسیب‌پذیرترین سناریوها هستند. با توجه به نتایج موجود سناریوی حمله به تصفیه‌خانه برای دشمنان جذاب‌تر است، زیرا شاخص جریان شبکه کمتر است. به گونه‌ای که در سناریوی ۱ در اثر حمله به تصفیه‌خانه‌ی A میزان شاخص جریان در حالت بدون مقاوم‌سازی ۳۵/۷٪ است، در حالی‌که شاخص سرویس‌دهی شبکه در سناریوی ۳ یعنی حمله به مخزن I، ۱۰۰٪ است. دلیل این امر این است که چنانچه اعضایی تنها از یک مسیر جریان به آن‌ها برسد، احتمال خرابی آن‌ها، در جریان تحلیل، به شدت سریع افزایش می‌یابد. در مقابل، اعضایی که جریان از چندین مسیر به آن‌ها می‌رسد، به خاطر وجود مسیرهای جایگزین، با افزایش میزان وابستگی، دارای نرخ افزایش احتمال خرابی کمتر هستند. بنابراین وجود مسیرهای موازی و افزایش افزونگی می‌تواند سبب کاهش احتمالات خرابی در شبکه و افزایش قابل توجه شاخص‌های عملکرد شبکه گردد.

با توجه به نتایج تحلیل، جذابیت تصفیه‌خانه‌ی A از B برای دشمن بیشتر است، زیرا میزان شاخص جریان تصفیه‌خانه‌ی A در حالت عدم مقاوم‌سازی، در حدود ۵۵٪ کمتر از سناریوی حمله به تصفیه‌خانه‌ی B است. ازاین‌رو بدترین سناریو برای فقط شبکه‌ی آب، سناریوی ۵، یعنی حمله‌ی همزمان به تصفیه‌خانه‌ی A و B است، که شاخص جریان آن در حالت نابودی کامل ۱۱/۳٪ است. البته در حالت ترکیبی نیز بدترین سناریوی موجود، سناریوی ۱۰، یعنی حمله‌ی همزمان به تصفیه‌خانه‌ی A و B و پست برق الف است. نتایج حاصل انتظارات را مبنی بر تأثیر قابل توجه اندرکنش، چه درون شبکه و بین اعضای یک شبکه و چه بین شبکه‌ای به اثبات رسانیدند. سناریوهای احتمال خرابی اجزای شبکه‌ی آب مستقل از شبکه‌ی برق، این اعضا را به صورت مجموعه‌ای منظم شده و دارای روابط قانونمند بینابین در نظر گرفته که این روابط سبب تأثیر بر واقعیت رویدادهای مورد انتظار به صورت غیرمستقیم می‌شود.

شاخص عملکرد شبکه برای تمامی سناریوها به دست آمد؛ به گونه‌ای که به صورت نمونه در جدول ۳، شاخص سرویس‌دهی شبکه در ۶ سناریوی منفرد شبکه‌ی آب (سناریوهای ۱ و ۲ و ۳ و ۴ و ۸ و ۹) تهیه شده است و همچنین برای باقی‌مانده‌ی ۴ سناریو یعنی سناریوهای ۵ (سناریوی حمله به پست برق الف)، ۶ (سناریوی حمله‌ی همزمان به تصفیه‌خانه‌ی A و پست برق الف، ۷ (سناریوی حمله‌ی همزمان به تصفیه‌خانه‌ی B و پست برق (الف)) و ۱۰ (حمله‌ی همزمان به تصفیه‌خانه‌ی A و B و پست برق الف، نمودار وضعیت سناریوهای مقاوم‌سازی و وابستگی در تصویر ۴ قابل مشاهده است. تفاوت در شدت انفجار یا همان میزان آسیب‌پذیری و یا میزان مقاوم‌سازی در برابر این‌گونه حملات، سبب ایجاد تفاوت در رفتار شبکه نیز شده است. از بین سناریوهای مقاوم‌سازی، می‌توان گفت که مقاوم‌سازی هر چه بیشتر و آسیب‌پذیری هر چه کمتر شبکه، بالاترین تأثیر در افزایش شاخص سرویس‌دهی را داراست. از سوی دیگر و در بین سناریوهای دارای وابستگی بین شبکه‌ای، کاهش میزان این وابستگی می‌تواند سبب افزایش میزان شاخص آسیب‌پذیری شود و مشخصاً هر چه میزان این آسیب بیشتر باشد، تفاوت ایجاد شده در این بخش نیز بیشتر می‌شود.

مطابق نتایج تحلیل، اعضایی که تنها از یک مسیر جریان به آن‌ها می‌رسد، در جریان تحلیل، احتمال خرابی آن‌ها به شدت سریع افزایش می‌یابد. در مقابل، اعضایی که جریان از چندین مسیر به آن‌ها می‌رسد، به خاطر وجود مسیرهای جایگزین، با

افزایش میزان وابستگی، دارای نرخ افزایش احتمال خرابی کمتر هستند. بنابراین وجود مسیرهای موازی و افزایش افزونگی می‌تواند سبب کاهش احتمالات خرابی در شبکه و افزایش قابل توجه شاخص‌های عملکرد شبکه گردد.

**جدول۳: شاخص سرویس‌دهی شبکه برای ۶ سناریوی نوع اول (سناریوهای ۱ و ۲ و ۳ و ۴ و ۸ و ۹)**

| سناریوی مقاوم‌سازی | سناریوی اجزا | شاخص سرویس‌دهی |
|---|---|---|
| عدم‌مقاوم‌سازی در عضو و آسیب‌پذیری ۱۰۰٪ در برابر حملات (وضعیت موجود) | سناریوی حمله به تصفیه‌خانه‌ی A | ۳۵/۷ |
| | سناریوی حمله به تصفیه‌خانه‌ی B | ۸۹/۵ |
| | سناریوی حمله به مخزن I | ۱۰۰ |
| | سناریوی حمله به مخزن II | ۱۰۰ |
| | ۸. سناریوی حمله‌ی همزمان به تصفیه‌خانه‌ی A و B | ۱۱/۳ |
| | ۹. سناریوی حمله‌ی همزمان به مخازن I و II | ۱۰۰ |
| مقاوم‌سازی در عضو آسیب پذیری ۷۵٪ در برابر حملات | سناریوی حمله به تصفیه‌خانه‌ی A | ۷۵/۷ |
| | سناریوی حمله به تصفیه‌خانه‌ی B | ۹۵/۱ |
| | سناریوی حمله به مخزن I | ۱۰۰ |
| | سناریوی حمله به مخزن II | ۱۰۰ |
| | ۸. سناریوی حمله‌ی همزمان به تصفیه‌خانه‌ی A و B | ۶۹/۴ |
| | ۹. سناریوی حمله‌ی همزمان به مخازن I و II | ۱۰۰ |
| مقاوم‌سازی در عضو و آسیب‌پذیری ۵۰٪ در برابر حملات | سناریوی حمله به تصفیه‌خانه‌ی A | ۹۲/۷ |
| | سناریوی حمله به تصفیه‌خانه‌ی B | ۹۸/۹ |
| | سناریوی حمله به مخزن I | ۱۰۰ |
| | سناریوی حمله به مخزن II | ۱۰۰ |
| | ۸. سناریوی حمله‌ی همزمان به تصفیه‌خانه‌ی A و B | ۹۱/۲ |
| | ۹. سناریوی حمله‌ی همزمان به مخازن I و II | ۱۰۰ |
| مقاوم‌سازی در عضو و آسیب‌پذیری ۲۵٪ در برابر حملات | سناریوی حمله به تصفیه‌خانه‌ی A | ۹۸/۶ |
| | سناریوی حمله به تصفیه‌خانه‌ی B | ۹۹/۹ |
| | سناریوی حمله به مخزن I | ۱۰۰ |
| | سناریوی حمله به مخزن II | ۱۰۰ |
| | ۸. سناریوی حمله‌ی همزمان به تصفیه‌خانه‌ی A و B | ۹۸/۵ |
| | ۹. سناریوی حمله‌ی همزمان به مخازن I و II | ۱۰۰ |

## نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر به علت پیشرفت‌های چشم‌گیری که در تولید تسلیحات مدرن، هوشمند و پیشرفته با دقت و برد بالا صورت گرفته است، الگو و ماهیت جنگ دچار تغییر و تحول بسیاری شده است و جنگ‌ها ماهیت تأثیرمحور و مخرب‌تری به خود گرفته‌اند. در جنگ‌های نسل جدید (نسل ششم)، انگیزه‌ی دشمنان حمله به مراکز ثقل و شریان‌های حیاتی در کل محیط جغرافیایی کشور است. دشمن تلاش دارد، در یک حمله‌ی کاملاً هوشمندانه، به زیرساخت‌های کشور بیشترین خسارات را وارد نماید و برای تأثیر روانی و ایجاد اختلال، سبب توقف فعالیت مراکز یا ایجاد اختلال در آن‌ها گردد.

در این مقاله اثر اختلال در عملکرد شبکه‌ها، پس از یافتن قوانین حاکم بر شبکه‌ها و ایجاد ارتباط بین آن‌ها، بر اساس قوانین مدل انتخابی برای شبیه‌سازی در محیط گراف و مدل‌سازی اندرکنش‌ها صورت پذیرفت. این مدل‌سازی در منطقه‌ی مورد مطالعه برای حملات تروریستی هدفمند (بمب‌گذاری) یا غیرهدفمند (حملات هوایی و موشکی) بررسی و تحلیل شد. نتایج این تحلیل‌ها برای حالت وضعیت موجود (یعنی عدم مقاوم‌سازی و وابستگی کامل شبکه‌ی آب به برق) بر حسب بیشترین آسیب‌پذیری و کمترین شاخص سرویس‌دهی شبکه‌ها به ترتیب به صورت زیر است:

۱. بدترین سناریو، سناریوی ۱۰ است. این سناریو یعنی، چنانچه دشمن بخواهد بیشترین هزینه و عدم سرویس‌دهی را به شبکه وارد کند بهتر است به‌طور همزمان به تصفیه‌خانه‌ی A و B و پست برق الف حمله‌ور شود و چنانچه شبکه در حالت عادی یعنی وابستگی کامل شبکه‌ی آب به برق باشد و از حالت عدم مقاوم‌سازی لرزه‌ای برخوردار باشد؛ شاخص سرویس‌دهی شبکه به حدود ۱۱٪ کاهش می‌یابد.

۲. سناریوی ۸: حمله‌ی همزمان به تصفیه‌خانه‌ی A و B با شاخص سرویس‌دهی ۱۱/۳۳٪

۳. سناریوی ۱: حمله به تصفیه‌خانه‌ی A با شاخص سرویس‌دهی ۳۵/۷۰٪ و سناریوی ۶: حمله‌ی همزمان به تصفیه‌خانه‌ی A و پست برق الف با شاخص سرویس‌دهی ۳۵/۷۰٪

۴. سناریوی ۷: حمله‌ی همزمان به تصفیه‌خانه‌ی B و پست برق الف با شاخص سرویس‌دهی ۸۸/۲۹٪

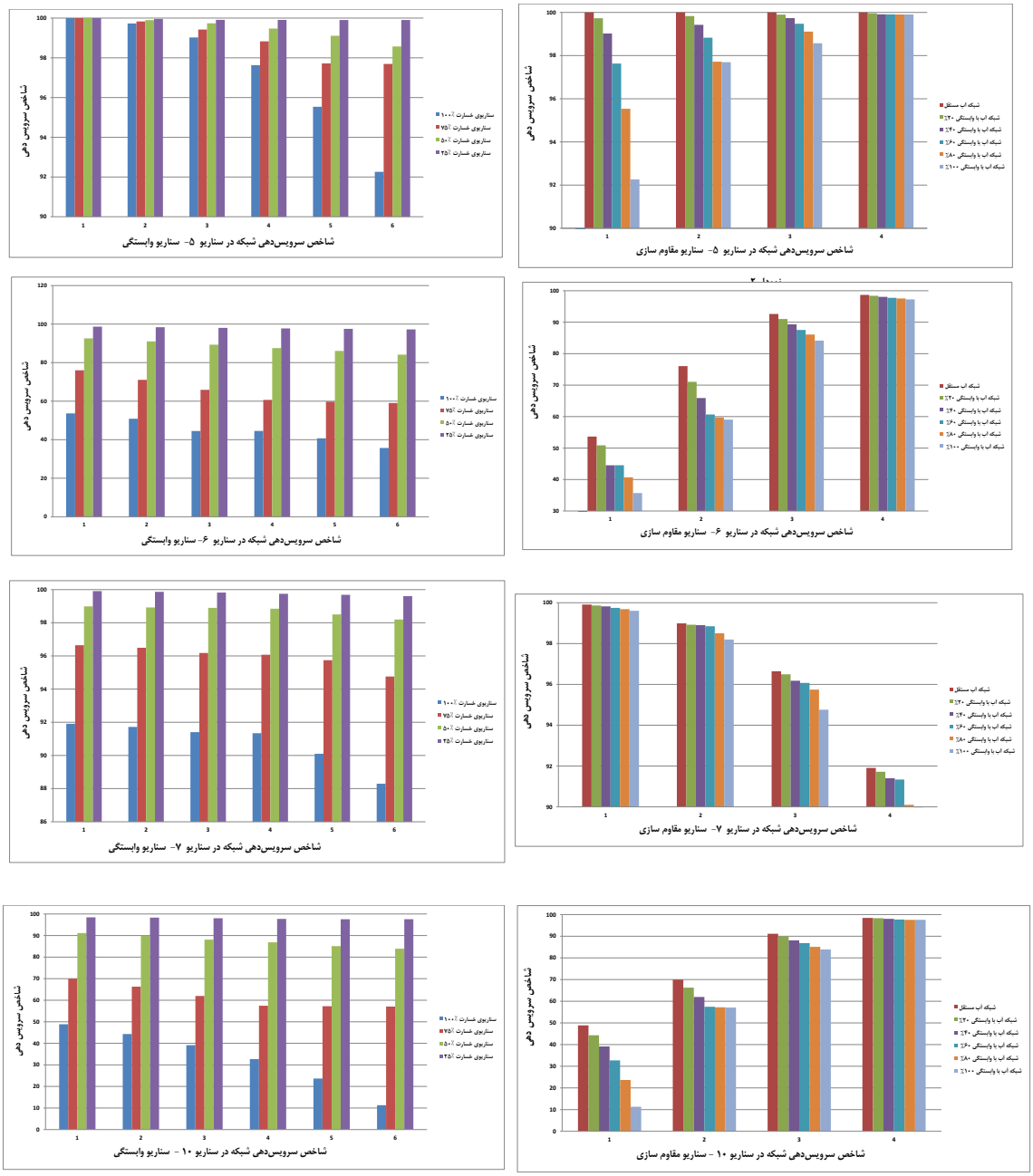
۵. سناریوی ۲: حمله به تصفیه‌خانه‌ی B با شاخص سرویس‌دهی ۸۹/۵۸٪

۶. سناریوی ۵: حمله به پست برق الف با شاخص سرویس‌دهی ۹۲/۲۶٪

۷. سناریوی ۳: حمله به مخزن I، سناریوی ۴: حمله به مخزن II و سناریوی ۹: حمله‌ی همزمان به مخازن I و II با شاخص سرویس‌دهی ۱۰۰٪

سایر نتایج تحلیل عبارتند از:

در نظرگیری اثر وابستگی در تعیین احتمال خرابی اجزای شبکه‌ی آب و برق در برخی موارد دارای تأثیر کم و در برخی موارد زیاد است، اما در تمامی موارد تأثیر کاهشی در احتمال عملکرد و افزایشی در احتمال خرابی اعضا دارند، جز در مواردی که عضو دارای هیچ وابستگی، چه درون شبکه‌ای و چه بین شبکه‌ای، نباشد. بنابراین اعضای مستقل‌تر از وضعیت بهتری در عملکرد برخوردارند




**تصویر ۴: نمودارهای شاخص سرویس‌دهی شبکه برای سناریوهای وابستگی و مقاوم‌سازی در ۴ سناریوی ۵، ۶، ۷ و ۱۰**

به نحوی که در تمامی سناریوها میزان شاخص سرویس‌دهی‌ها در حالت مستقل نسبت به حالت وابستگی، افزایش محسوسی داشته است. برای مثال میزان شاخص سرویس‌دهی شبکه در حالت بدون مقاوم‌سازی در سناریوی ۵ از ۹۲٪ به ۱۰۰٪؛ در سناریوی ۶ از ۳۵٪ به ۵۳٪؛ در سناریوی ۷ از ۸۸٪ به ۹۱٪ و در سناریوی۱۰ از ۱۱٪ به ۴۸٪ ارتقا می‌یابد. پس اولین و بهترین راهکار توسعه‌ی شبکه‌های برق پشتیبان برای شبکه‌ی آب است.

استفاده از برق پست‌های ولتاژ پایین و اتصال به تنها یکی از آن‌ها، از دلایل بالا بودن میزان وابستگی شبکه‌ی آب به برق و تأثیر بسیار زیاد خرابی اعضای شبکه‌ی برق برای از کار افتادن اعضای شبکه‌ی آب در یک منطقه‌ی شهری است. برای مثال در سناریوی ۶، در حالت وابستگی ۲۰٪ شبکه‌ی آب به برق نسبت به حالت وابستگی کامل، میزان شاخص سرویس‌دهی شبکه از ۳۵٪ به ۵۰٪ ارتقا می‌یابد. برای مقابله با این امر و مدیریت آن، پیشنهاد می‌گردد که به جای اتصال به یک پست، اتصال به دو یا چند پست صورت پذیرد.

## پی نوشت

1. Owens
2. Hwachon
3. Calueque
4. Owamboland
5. Courenas
6. Cimittar
7. Amarillo
8. Wisconsin
9. Konopka
10. Irun
11. Reno
12. Veazie
13. Bangor
14. Buenaventura
15. Cyber
16. Logical
17. Input-Output
18. Leontief

## منابع


1. PCCIP. (1997). Critical Foundation: Protecting America's Infrastructures.

2. PSEPC. (2005). Modernization of the Emergency Preparedness Act.

3. Dueñas-Osorio, Leonardo, James I. Craig and Barry G. Goodno (2006). Seismic response of critical interdependent networks. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, (In press).

4. North American Electric Reliability Council (NERC) (2004). Gas/Electricity Interdependencies and Recommendations. Prinston, NJ: North American Electric Reliability Council.

5. Stephen D. Wolthusen (2007). Analysis and Statistical Properties of Critical Infrastructure Interdependency Multiflow Models Nils K. Svendsen, United States Military Academy, West Point, NY 20-22 June 2007.

6. Dueñas-Osorio Leonardo, Craig James I. and Goodno Barry G. (2005). Optimal flow approach to quantify performance of networked systems. Manuscript to be sent to Physical Review E.

۷. جلیلی قاضی‌زاده، علیرضا؛ جلیلی قاضی‌زاده، محمدرضا (اردیبهشت ۱۳۸۷). *کاربرد ریسک در مطالعات پدافند غیرعامل. دومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برقابی.*

8. Sullivant, J. (2007). *Strategies for Protecting National Critical Infrastructure Assets:A Focus on Problem-Solving,* Wiley & Sons, Inc.

9. Shinozuka, M; Cheng, Tsen-Chung; Feng, Maria Q. and Mau, Sheng-Taur (1999). Seismic Performance Analysis of Electric Power Systems. MCEER Research Progress and Accomplishments 1997-1999, 61-69.

10. Little, Richard G. (2002). Controlling cascading failures: understanding the vulnerabilities of interconnected infrastructures. *Journal of Urban Technology,* 9(1),109-123.

11. Kondrasuk, Jack N. (2004). The effects of 9-11 and terrorism on human resource management: recovery, reconsideration and renewal. Employee Responsibilities and Rights Journal.

12. Lee E. E., Mitchell J. E., and Wallace W. A. (2007). Restoration of Services in Interdependent Infrastructure Systems: A Network Flow Approach, in IEEE Transaction on Systems Magazine, vol. 37, pp. 1303-1318.

13. Rinaldi, Steven M.; Peerenboom, James P. and Kelly, Terrence K. (2001). Identifying, understanding, and analyzing critical infrasrtfure interdependencies. IEEE Control Systems Magazine. December: 11-25.

14. Leontief, W. W. (1951a). Input/output economics. Sci. Am., 185(4).

15. Leontief, W. W. (1951b). The structure of the American economy, 1919– 1939, 2nd Ed., Oxford University Press, New York.

16. Miller, R. E., and Blair, P. D. (1985). Input-output analysis: Foundations and extensions, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

17. Haimes, Yacov Y. and Pu Jiang (2001). Leontief-based model of risk in complex interconnected infrastructures. *Journal of Infrastructure Systems*,7(1): 1-12.

۱۸. امیدوار، بابک؛ توکلی ثانی، محمدصادق؛ اسکندری، محمد؛ نعیمی، مهرداد (اردیبهشت ۱۳۹۲) ارزیابی ریسک زیرساخت‌ها با در نظر گرفتن وابستگی آن‌ها-مدل لئون تیف. *چهارمین کنفرانس ملی زلزله و سازه*، جهاد دانشگاهی استان کرمان.