

ارائه‌ی مدل نوین برای تحلیل وابستگی دارایی‌های حیاتی در آسیب‌پذیری صنایع

فرشید عوض‌آبادیان* - پژوهشگر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر. F.evazabadi@ut.ac.ir

علی جمشیدی - پژوهشگر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.

آرمان رضایتی - پژوهشگر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر..

رسول مهدی‌زاده - پژوهشگر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.

تاریخ دریافت: ۹۲/۶/۳ | تاریخ پذیرش: ۹۳/۴/۲

چکیده

امروزه عملکرد دارایی‌های حیاتی در یک صنعت یا شهر، به‌طور چشمگیری، به نظام‌های شبکه‌ای وابسته است. اگر یک زیرساخت را متشکل از مجموعه‌ای از دارایی‌ها بدانیم، می‌توانیم بگوییم که حتی اساسی‌ترین عملکردهای روزمره مستلزم عمل متقابل با گروهی از نظام‌های دارایی‌های حیاتی است. این پژوهش به ارائه‌ی مدلی نوین برای تحلیل وابستگی سیستمی میان شبکه‌ای از دارایی‌ها در یک زیرساخت صنعتی می‌پردازد. معروف‌ترین مدل مطرح شده در زمینه‌ی محاسبه‌ی این وابستگی‌ها مدل لیونتیف است که دارای نواقصی چون در نظر نگرفتن تأثیر عدم عملکرد بر گره‌های واسط و انتقال‌دهنده است. در این تحقیق سعی شده تا، با برطرف کردن معایب مدل مذکور، به ارائه‌ی مدلی جدید اقدام شود. در این مدل دارایی‌ها به دو دسته‌ی منابع و تغذیه‌شونده‌ها تقسیم می‌شوند و اجزا به این طریق بر یکدیگر تأثیر دارند. این مدل برای محاسبه‌ی اهمیت اجزا بر یکدیگر از چارچوبی ابتکاری، بر پایه‌ی تحقیق در عملیات، استفاده می‌کند که در آن اهمیت نسبی هر یک از دارایی‌ها مشخص می‌شود تا بدین طریق معیاری برای تصمیم‌گیری در خصوص نحوه‌ی اثرگذاری دارایی‌ها، میزان وابستگی عملکرد هر یک از دارایی‌ها بر دیگر دارایی‌ها، همچنین میزان اهمیت هر دارایی در شبکه بر پایه‌ی مفهوم «مرکزیت»، ایجاد گردد؛ در پایان، مثالی برای تشریح مدل تبیین شده است.

واژه‌های کلیدی: شبکه، دارایی‌های حیاتی، مرکزیت، وابستگی سیستمی، شرایط اضطراری

Developing a new model for critical assets analysis in vulnerable Industries

Farshid Evazabadian^{*1}, Ali Jamshidi², Arman Rezayati³, Rasool Mehdizadeh⁴:

Abstract:

Nowadays, the performance of critical assets in the industrial and urban sites depends on network-based systems. With respect to this fact that an infrastructure (as a complex system) consists of several assets, it is clear that assets play a vital role in daily performance of the urban systems. This study developed a novel model to analyze the interdependency of critical assets in an industrial system. The most famous conventional method regarding the interdependency of the assets (Leontief) were considered, which suffer from some weaknesses. However, the new model was extended with new abilities. In the proposed model, the assets were classified into two states: resource and demander. The objective of this model is to estimate the interaction of assets using an innovative Operation Research (OR) framework in order to simulate the mechanism of dependency of assets. To obtain the criticality of assets, a new term entitled by "centrality" was introduced to select and to rank the assets. A notional example was provided to illustrate the application of the proposed model.

Key words: network, critical assets, centrality, interdependency

1 Researcher, Malek Ashtar University of Technology; Farshid.evazabadi@yahoo.com

2 Researcher, Malek Ashtar University of Technology.

3 Researcher, Malek Ashtar University of Technology.

4 Researcher, Malek Ashtar University of Technology.

مقدمه

در جهان توسعه‌یافته عملکرد دارایی‌های حیاتی در یک صنعت و یا شهر، به‌طور چشمگیری، به‌نظام‌های شبکه‌ای وابسته است. اگر یک زیرساخت را متشکل از مجموعه‌ای از دارایی‌ها بدانیم، می‌توانیم بگوییم که حتی اساسی‌ترین عملکردهای روزمره مستلزم عمل متقابل با گروهی از نظام‌های دارایی‌های حیاتی است [۱]. برای مثال میلیاردها نفر در جهان برای رفتن به محل کار، مدرسه یا بازارهای محلی از زیرساخت حمل و نقل استفاده می‌کنند. زیرساخت‌های ارتباطی برای ادامه‌ی ارتباط با خانواده و دوستان، فروشگاه یا معاملات مالی مورد استفاده قرار می‌گیرند. زیرساخت انرژی برای گرم کردن منازل، تأمین نیروی صنایع محلی و سوخت‌رسانی به اتومبیل‌ها استفاده می‌شود. اگرچه این فعالیت‌های اساسی به آسانی قابل درک هستند، اما اهمیت استفاده از زیرساخت‌ها کمتر آشکار است. برای مثال بیشتر از ۱۹ میلیارد تن از حمل و نقل به ارزش ۱۳ تریلیون دلار از طریق شبکه‌ی حمل و نقل مرکب و شبکه‌های وابسته در ایالات متحده در سال ۲۰۰۲ بوده است [۲]. در شبکه‌های مخابراتی حجم داده‌های مسیر ارتباطی اصلی انتقال داده‌ها در شبکه‌ی ایالات متحده متجاوز از ۱۰۰ مگابایت در هر ماه در سال ۲۰۰۲ بوده است [۳]. در حقیقت وابستگی می‌تواند بهره‌وری عملیاتی زیرساخت را افزایش دهد ولی وقایع جهانی اخیر مانند زلزله‌ی ۲۰۱۱ در ژاپن، وقوع سیل در سال ۲۰۰۷ در انگلستان و در سال ۲۰۱۰ در شیلی نشان دادند که وجود وابستگی آسیب‌پذیری شبکه را افزایش می‌دهد و آسیب‌دیدگی در یک زیرساخت حیاتی موجب خرابی آبشاری می‌شود؛ مثلاً وقوع خرابی و اختلال در شبکه‌ی برق در امریکا که به‌طور متوسط هر چهار ماه اتفاق می‌افتد، حدود یک میلیون نفر را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۴]. همچنین حادثه‌ی حمله به برج‌های دوقلو در مرکز تجارت جهانی منجر به خرابی و آسیب تعدادی از ساختمان‌های مجاور آن شد. طوفان فصلی در فلوریدا در سال ۲۰۰۴ نیز موجب تعدادی طوفان پشت سر هم در یک فاصله‌ی کوتاه دو ماهه شد [۵، ۶، ۷]. با توجه به سطح وابستگی جوامع صنعتی به شبکه‌ی زیرساخت‌های حیاتی، اهمیت زیرساخت‌های حیاتی را نباید دست‌کم گرفت. علاوه بر این بهره‌وری این شبکه‌ها می‌تواند به علت حوادث عمدی (عملیات تروریستی یا خرابکارانه) و تصادفی (زلزله) آسیب‌پذیر باشند که ضرورت درک چگونگی زیرساخت‌های حیاتی و عملکردشان را تثبیت می‌کند.

اجزای اصلی زیرساخت حیاتی اغلب به بخش‌هایی تقسیم می‌شوند که شامل موارد زیر است [۸]:

- ارتباطات دوربرد
- شبکه‌های برق قدرت
- ذخیره‌ی گاز و نفت
- حمل و نقل
- بانکداری و تأمین بودجه
- شبکه‌های منابع آب
- خدمات ضروری (پزشکی، پلیس، آتش‌نشانی و نجات)

همچنین گروهی از منابع حیاتی نظیر:

- آثار تاریخی و تندیس‌های ملی
- نیروگاه‌های هسته‌ای
- سدها
- تجهیزات دولتی
- منابع بازرگانی حیاتی

همچنین در دسته‌بندی دیگری زیرساخت‌های حیاتی به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند [۹]:

- مخابرات
- برق
- گاز طبیعی و سوخت
- بانک و مالی
- حمل و نقل
- آب
- خدمات اضطراری
- خدمات دولتی

بنابراین با توجه به وجود وابستگی عملکردی شبکه‌ی زیرساخت‌های اصلی و با توجه به اهمیت و تأثیر زیاد این شبکه‌ها بر زندگی روزمره بررسی وابستگی دارایی‌ها، در یک شبکه‌ی به‌هم پیوسته‌ی صنعتی، اساسی به نظر می‌رسد. در روش‌های مدل‌سازی زیرساخت‌های حیاتی نیز روش‌های مختلفی وجود دارد که می‌توان به تحقیق اسگلد و همکاران اشاره کرد که در آن انواع روش‌های تحلیل شبکه را دسته‌بندی کرده‌اند. اسگلد و همکاران روش‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی شبکه‌ی ارائه شده تا سال ۲۰۰۸ را به هشت گروه تقسیم کردند: شبیه‌سازی عامل مبنا، شبکه‌های دینامیکی، مدل‌سازی شبکه‌های مرکب، مدل‌های ورودی-خروجی، مدل‌سازی سلسله‌مراتبی، روش مسیر بحرانی، معماری سطح بالا و شبکه‌های پتری که هر دسته بر اساس ویژگی‌های مختلفی چون داده‌ی مورد نیاز، نوع رویدادها، نوع وابستگی‌ها و راهبردهای طراحی طبقه‌بندی می‌شوند [۹].

در سال ۱۹۷۳ واسلی لیونتیف^۱ مدل اقتصادی ورودی-خروجی را ارائه کرد. مدل مذکور مدلی ایستا^۲ و خطی بود که در آن تمام خرید و فروش بین بخش‌های یک نظام اقتصادی را بر پایه‌ی روابط تکنولوژیک تولیدی مدل می‌کرد. مدل اصلی لیونتیف ($I-O$) به شرح زیر است:

$$x = Ax + C \Leftrightarrow \{x_i = \sum_j a_{ij} x_j + c_i\} \forall i$$

که در آن x_i میزان کل تولید خروجی از صنعت i و a_{ij} ضرایب تکنیکی لیونتیف هستند که در واقع نسبت خروجی صنعت i به صنعت j است که در میزان تولیدی کل صنعت j تأثیرگذار است؛ و c_i بیانگر میزان خروجی کل صنعت i به‌منزله‌ی محصول نهایی از جانب مصرف‌کننده‌ی نهایی است. با به کار بردن معادلات فوق در زیرساخت‌های حیاتی و تفسیر خروجی‌های آن در واقع ریسک عدم کارکرد^۳، به صورت ناتوانی زیرساخت در انجام عملکردش تعریف می‌شود [۱۰، ۱۱].

اولین مدل عدم کارکرد ورودی-خروجی^۴ را هیمز و جیانگ ارائه کردند [۱۲]. در این مدل x_i ریسک کلی عدم کارکرد زیرساخت نام در اثر یک حمله‌ی خرابکارانه یا اختلال تصادفی بود. a_{ij} احتمال عدم کارکرد زیرساخت z ام متأثر از زیرساخت i ام با توجه به روابط داخلی آن‌ها و ci ریسک اضافی عدم کارکرد با توجه به ویژگی‌ها و پیچیدگی‌های زیرساخت i بود.

بر پایه‌ی ایده‌ی عدم کارکرد تعدادی مدل توسعه یافته از مدل‌های عدم کارکرد، بر پایه‌ی کاهش تقاضا^۵، در محصول نهایی یا خروجی ارائه شدند که به تحلیل میزان خروجی و میزان عدم کارکرد در هر یک از بخش‌های اقتصادی وابسته به هم می‌پرداختند [۱۳، ۱۴]. از جمله مدل‌های پویای عدم کارکرد که در آن توسعه‌ی خرابی و بازیابی موقت بخش‌های اقتصادی بعد از وقوع یک حمله یا یک بحران طبیعی را تحلیل می‌کردند [۱۵، ۱۶]. همچنین مدل‌های چندناحیه^۶ و چندبخشی برای مدل‌سازی وابستگی‌های اقتصادی، با استفاده از پایگاه داده‌ی جغرافیایی-فضایی، برای تخمین بهتر شیوع خرابی در چندین ناحیه و بخش‌های صنعتی ارائه گردیده است [۱۷، ۱۸].

همان‌طور که بحث شد در مدل لیونتیف مقادیر x نشان‌دهنده‌ی میزان محصول نهایی از دست رفته در شبکه، در اثر حذف گره‌های شبکه، است ولی در صورتی که تعدادی از گره‌ها در حکم واسط یا انتقال‌دهنده باشند، در این صورت این گره‌ها محصول نهایی مصرف نمی‌کنند و در واقع اثر حذف یک گره تنها بر گره‌هایی که مصرف‌کننده‌ی محصول هستند در نظر گرفته شده‌اند. در نتیجه ممکن است در عمل این اتفاق بیفتد که دو گره به گره‌های نهایی مشتری وصل باشند ولی یکی از طریق چندین گره‌ی واسط و دیگری مستقیماً به آن‌ها وصل باشد. در این صورت اثر یک گره‌ی مبدأ بر گره‌هایی که حکم واسط را دارند (که در بسیاری از شبکه‌ها، مانند پست‌های برق، وجود این گره‌ها متداول است) در نظر گرفته نشده است. در این تحقیق با ارائه‌ی مدلی جدید اثر یک گره بر عملکرد تمامی گره‌های شبکه محاسبه می‌شود و این موضوع به مثابه‌ی معیاری برای سنجش اهمیت یک گره در نظر گرفته می‌شود.

در ادامه، پس از بررسی روش تحقیق به کار رفته و توصیف مسئله‌ی تحقیق، مدلی نوین در قالب یک مطالعه‌ی موردی فرضی ارائه و نتایج آن تشریح شده است. در انتها نیز نتیجه‌گیری و ایده‌هایی برای تحقیق‌های آتی ارائه گردیده است.

توصیف مسئله

در این تحقیق فرض می‌شود که عملکرد یک گره (یک دارایی در شبکه) متأثر از سه عامل اصلی است:

۱. سالم بودن خود گره؛
۲. سالم بودن گره‌های تأثیرگذار بر گره‌ی مذکور؛
۳. سالم بودن منابع تغذیه‌کننده‌ی گره‌ی مذکور.

بنابراین زمانی عملکرد یک گره برابر ۱۰۰ درصد خواهد بود که تمامی گره‌های تأثیرگذار بر آن گره، تمامی منابع تغذیه‌کننده‌ی گره و خود گره سالم باشند.

برای محاسبه‌ی مقدار تأثیر یک گره بر گره‌ی دیگر در شبکه ابتدا تعاریف زیر را در نظر می‌گیریم:

شبکه‌ی دارایی‌ها

برای در نظر گرفتن وابستگی دارایی‌ها در یک شبکه یک مدل یکپارچه، با استفاده از نظریه‌ی گراف، ارائه می‌شود. بدین ترتیب که دارایی‌ها به منزله‌ی گره‌های یک شبکه‌ی گراف هستند و در صورت وجود وابستگی عملکردی بین دو گره، گره‌ها با یال جهت‌دار به یکدیگر متصل می‌شوند (ارتباط بین دو گره با یال جهت‌دار نمایش داده می‌شود). با این توضیحات همواره وابستگی میان دارایی‌ها به صورت یک شبکه‌ی گراف جهت‌دار است.

موضوع مهم دیگری که باید در نظر گرفته شود، میزان تأثیر عملکرد یک گره‌ی خاص بر عملکرد گره‌ی دیگر است. با این مضمون که در صورت آسیب‌دیدگی مثلاً گره‌ی i عملکرد گره‌ی j چه میزان تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. بدین منظور برای هر یالی که گره‌ی i را به گره‌ی j متصل می‌کند، یک وزن در نظر گرفته می‌شود که میزان تأثیر عملکرد گره‌ی i بر گره‌ی j را نشان می‌دهد. به این ترتیب برای مدل‌سازی شبکه‌ای دارایی‌ها به یک شبکه‌ی گراف وزن‌دار نیاز است.

انواع گره‌ها در یک شبکه‌ی دارایی‌ها

در یک شبکه‌ی دارایی‌ها بسته به وزنی که یال بین دو گره دارد (W_{ij}) چند حالت مختلف ممکن است رخ دهد:

۱. وزن یال برابر صفر باشد؛
۲. وزن یال عددی بین صفر و یک باشد؛
۳. وزن یال برابر یک باشد.

حالت اول زمانی اتفاق می‌افتد که عملکرد گره‌ی i مستقل از عملکرد گره‌ی j باشد. به عبارت دیگر زمانی که ارتباط فرایندی و یا سازمانی بین دو دارایی وجود ندارد، وزن W_{ij} برابر صفر خواهد بود. حالت دوم زمانی رخ می‌دهد که عملکرد گره‌ی i متأثر از عملکرد گره‌ی j باشد؛ هر چه مقدار W_{ij} بزرگ‌تر باشد، میزان تأثیر عملکرد گره‌ی i بر گره‌ی j بیشتر است.

معنای حالت سوم زمانی رخ می‌دهد که عملکرد گره‌ی i صد تحت تأثیر عملکرد گره‌ی j باشد. با این توضیح که در صورتی که گره‌ی i از بین برود، مستقل از سایر وابستگی‌ها، عملکرد گره‌ی j برابر صفر می‌گردد. به عبارت دیگر وابستگی ذاتی میان این دو گره (دارایی) وجود دارد. در حالت سوم وابستگی عملکرد یک کارگاه صنعتی به یک منبع تولیدکننده‌ی برق به گونه‌ای است که اگر تولیدکننده‌ی برق دچار آسیب گردد کارگاه مورد نظر به طور کامل از کار می‌افتد.

محاسبه‌ی میزان تأثیر عملکرد گره‌ها بر هم

فرض کنید عملکرد گره‌ی i متأثر از گره‌های $1, 2, \dots, n$ باشد. وزن آن‌ها نیز به ترتیب $W_{1j}, W_{2j}, \dots, W_{nj}$ است و مقادیر وزن‌ها همگی بین ۰ و ۱ است. ساده‌ترین نوع وابستگی در تصویر ۱ قابل مشاهده است.

همچنین فرض کنید میزان تأثیر گره‌ی i بر عملکرد گره‌ی j به گونه‌ای باشد که اگر میزان عملکرد گره‌ی i به اندازه‌ی f_i تغییر کند، عملکرد گره‌ی j به اندازه‌ی w_{ij} کاهش پیدا می‌کند. بنابراین داریم:

رابطه‌ی ۱:

$$\delta_j = w_{ij}\delta_i$$

رابطه‌ی ۲:

$$p_j = 1 - \delta_j$$

با در نظر گرفتن دو رابطه‌ی فوق رابطه‌ی ۳ عبارت است از:

رابطه‌ی ۳:

$$p_j = 1 - w_{ij}\delta_i$$

با این فرض که داریم:

$$p_j: \text{سطح عملکرد گره‌ی } j$$

δ_i : میزان کاهش عملکرد در گره‌ی i (به علل خارجی)

δ_j : میزان کاهش عملکرد در گره‌ی j به علت کاهش عملکرد

در گره‌ی i

از این رو با در نظر گرفتن پیش فرض‌های ارائه شده در روابط ۱، ۲ و ۳ به محاسبه‌ی میزان عملکرد گره‌ها در شبکه‌ای از دارایی‌ها پرداخته می‌شود. در این صورت اگر مانند بالا گره‌های ۱، ۲، ...، n به گره‌ی j وصل باشند (عملکرد گره‌ی j متأثر از عملکرد آن‌ها باشد)، عملکرد گره‌ی j به صورت زیر محاسبه می‌شود:

رابطه‌ی ۴:

$$p_j = 1 - \sum_{i=1}^n w_{ij}\delta_i$$

تمامی محاسبات فوق در صورتی بود که منبعی موجود نباشد (منظور از منبع وجود گره‌ای است که وابستگی میان آن‌ها ۱۰۰ درصد باشد)؛ بنابراین محاسبات در صورت وجود منبع متفاوت خواهد بود که در ادامه توضیح داده می‌شود.

وجود منبع

همان‌طور که بحث شد منابع تأثیر مستقیمی روی عملکرد گره‌ها دارند. به خصوص زمانی که منبع به طور کامل از بین می‌رود، عملکرد گره‌ی مذکور برابر صفر می‌گردد (تصویر ۲). فرض کنید عملکرد گره‌ی j متأثر از گره‌ی i و منبع k باشد و شکل آن به صورت تصویر ۲ باشد:

فرض کنید گره‌ی i به اندازه‌ی $i\delta$ و منبع k به اندازه‌ی Δk درصد آسیب ببیند. در این صورت بر پایه‌ی محاسبات پیش فرض ارائه شده، در صورتی که منبعی وجود نداشته باشد، عملکرد گره‌ی j چنین خواهد بود:

رابطه‌ی ۵:

$$p_j = 1 - w_{ij}\delta_i$$

با توجه به اینکه عملکرد یک گره به منبع یا منابع تغذیه‌کننده‌ی آن وابسته است، به ارائه‌ی مدل می‌پردازیم. به این مفهوم که در صورتی که حتی اگر گره‌ی i نیز دچار آسیب دیدگی نشود و کاملاً سالم باشد ($\delta_i=0$) ولی در عین حال منبع k آسیب Δk ببیند، در این صورت عملکرد گره‌ی j به اندازه‌ی Δk کاهش

خواهد یافت. پس، با این توضیح، رابطه‌ی استخراج شده به صورت زیر است:

$$p_j = (1 - w_{ij}\delta_i) \times (1 - \Delta_k) \quad \text{رابطه‌ی ۶:}$$

با این ملاحظه که عملکرد گره‌ی j متأثر از یک منبع مانند k و یک گره مانند i است.

در صورتی که بیش از یک منبع وجود داشته باشد، باید دید که رابطه به چه صورت خواهد بود. حال با این فرض که تعداد n منبع وجود دارد که بر عملکرد گره‌ی j تأثیرگذار هستند و همچنین با وجود گره‌ی i که عملکرد آن نیز بر عملکرد گره‌ی j تأثیر می‌گذارد، در این صورت رابطه‌ی عملکردی استخراج می‌شود. پس با فرض وجود n منبع ($1, 2, \dots, n$) و یک گره‌ی i که عملکرد آن‌ها بر عملکرد گره‌ی j تأثیرگذار است، می‌توان تصویر ۳ را بررسی کرد.

همان‌طور که بحث شد هر منبع تأثیر مستقیمی بر عملکرد گره‌ی j دارد. پس همان‌طور که کاهش عملکرد گره‌ی $k=1$ موجب کاهش عملکردی Δk گره‌ی j می‌شود، کاهش عملکرد گره‌ی $k=2$ نیز موجب کاهش عملکردی Δk می‌شود. به این ترتیب رابطه‌ی ۷ می‌تواند بیان‌کننده‌ی ارتباط بین منابع باشد.

$$p_j = (1 - w_{ij}\delta_i) \times \prod_{k=1}^n (1 - \Delta_k) \quad \text{رابطه‌ی ۷:}$$

به این ترتیب می‌توان رابطه‌ی میان دارایی‌ها و مراکز تغذیه را در صورت وجود منبع و گره‌ی i به دست آورد. همچنین رابطه‌ی ۷ بیانگر این موضوع است که در صورت آسیب دیدگی Δk در منبع k ، در صورت سالم بودن سایر منابع، عملکرد گره‌ی j به اندازه‌ی Δk کاهش می‌یابد. با این تفسیر در حالت کلی؛ یعنی در صورتی که عملکرد گره‌ی j متأثر از n منبع $1, \dots, n$ و m گره $1, i_1, i_2, \dots, i_m$ باشد، ساختار شبکه همانند تصویر ۴ می‌شود.

در این صورت داریم:

$$p_j = \sum_{i=1}^m (1 - w_{ij}\delta_i) \times \prod_{r=1}^n (1 - \Delta_r) \quad \text{رابطه‌ی ۸:}$$

تأثیر سالم بودن یک گره بر عملکرد آن گره

همان‌طور که گفته شد عملکرد یک گره متأثر از عملکرد گره‌های وابسته به آن و نیز عملکرد منابعی است که بر روی آن گره تأثیرگذارند. حال این موضوع مطرح می‌شود که اگر یک گره آسیب دیده باشد، عملکرد آن گره نیز کاهش می‌یابد (نسبت به حالتی که گره سالم است). تفسیر این گزاره این است که حتی اگر تمامی گره‌هایی که بر عملکرد یک گره تأثیر دارند سالم و تمامی منابع تغذیه‌کننده‌ی آن نیز سالم باشند، در صورتی که خود گره آسیب دیده باشد، عملکرد آن برابر یک نخواهد بود. بنابراین لازم است که این اثر بر عملکرد گره‌ها در نظر گرفته شود. از این رو اگر فرض شود گره‌ی j به اندازه‌ی μ درصد آسیب دیده باشد و عملکرد آن متأثر از گره‌ی i و منبع k باشد، بنابراین در صورتی که گره‌ی j سالم باشد، عملکرد آن از رابطه‌ی ۹ به دست می‌آید:

$$p_j = (1 - w_{ij}\delta_i) \times (1 - \Delta_k) \quad \text{رابطه‌ی ۹:}$$

حال مشخص است اگر گرهی j زیه اندازه‌ی μ_j درصد آسیب دیده باشد، این موضوع تأثیر مستقیم و مستقلاً از سایر گره‌ها بر عملکرد آن گره دارد. پس می‌توان رابطه‌ی ۹ را به رابطه‌ی ۱۰ تعمیم داد:

$$p_j = (1 - w_{ij}\delta_i) \times (1 - \Delta_k) \times (1 - \mu_j) \quad \text{رابطه‌ی ۱۰}$$

در رابطه‌ی ۱۰ اگر گره سالم باشد ($\mu_j=0$) در این صورت عملکرد گرهی j تنها متأثر از عملکرد گره‌های وابسته‌ی آن و منبع تغذیه‌کننده‌ی آن خواهد بود و در صورتی که تمامی گره‌ها ثابت باشند و منابع تغذیه‌کننده نیز سالم باشند، عملکرد آن، در صورت وجود آسیب‌دیدگی در خود گره، کاهش می‌یابد.

با در نظر گرفتن این موضوع می‌توان رابطه را به صورت رابطه‌ی ۱۱ گسترش داد که در آن تعدادی منبع و تعدادی گره وجود دارد و میزان آسیب‌دیدگی گره برابر μ_j است. اگر فرض شود گره‌های i_1, i_2, \dots, i_n بر عملکرد گرهی j تأثیر داشته است و منابع r_1, r_2, \dots, r_m وجود داشته باشند، در این صورت عملکرد گرهی j از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

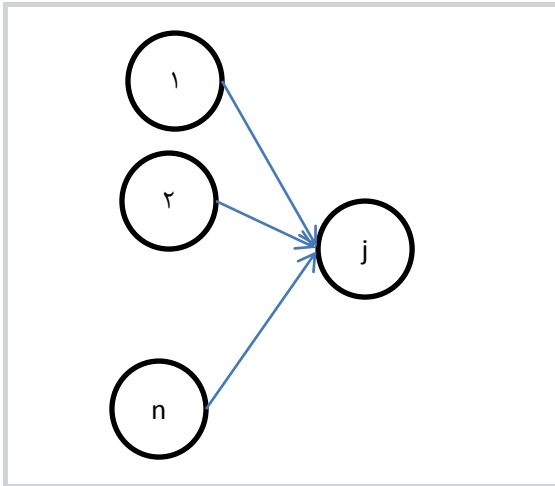
رابطه‌ی ۱۱:

$$p_j = \sum_{i=i_1}^{i_m} (1 - w_{ij}\delta_i) \times \prod_{r=r_1}^{r_n} (1 - \Delta_r) \times (1 - \mu_j)$$

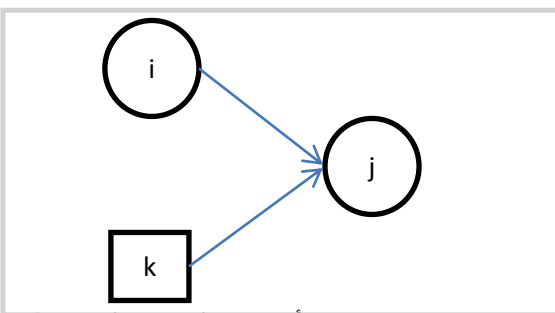
رابطه‌ی ۱۱ را می‌توان تعمیم تمامی روابط پیشین دانست. همان‌طور که مشاهده می‌شود، رابطه‌ی ۱۱ در قیاس با رابطه‌ی لیونتیف^۷ مزایایی دارد: با توجه به در نظرگیری عواملی همچون سالم بودن خود گره و تأثیر خطی منابع، نسبت به مدل لیونتیف کامل‌تر است و می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد.

تعیین ارزش گره‌ها در شبکه

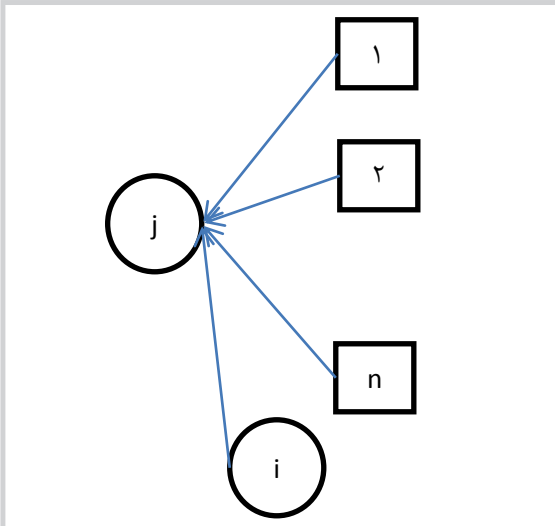
در بسیاری از موارد لازم است برای اقدامات پیشگیرانه بدانیم که کدام گره اثر بیشتری بر شبکه دارد. در بسیاری از تحقیقات معیارهای مختلفی برای ارزش یک گره در شبکه ارائه شده است که جمع درجه‌ی یال‌های خروجی از یک گره و میزان تفاوت جمع درجه‌ی خروجی و ورودی یک گره از آن جمله است. در این تحقیق برای ارزش‌گذاری گره‌ها معیاری جدید، برای اولین بار، در نظر گرفته می‌شود و آن تأثیری است که حذف گرهی مذکور بر تمامی گره‌های شبکه می‌گذارد؛ بنابراین مشخص است که حذف هر گره در شبکه سبب کاهش عملکرد تعدادی از گره‌های شبکه می‌شود و با جمع این مقادیر گره‌ای که اثر بیشتری بر کل شبکه می‌گذارد، مشخص می‌شود. بنابراین معیار جدید برای ارزش‌گذاری گره‌ها در شبکه میزان کاهش عملکردی است که حذف گرهی مذکور بر کل شبکه می‌گذارد و این معیار در تحقیق با نام «مرکزیت»^۸ تعریف می‌شود. از این رو هدف آن است که دارایی‌های حیاتی در یک شبکه‌ی دارایی‌ها مشخص شود. بنابراین برای تعیین مرکزیت هر گره کاهش عملکرد سایر گره‌ها به ازای حذف گرهی مذکور محاسبه می‌شود.



تصویر ۱: یک وابستگی ساده بین n دارایی با دارایی i



تصویر ۲: شکل ساده‌ی تأثیر دارایی زاز دارایی i و منبع k



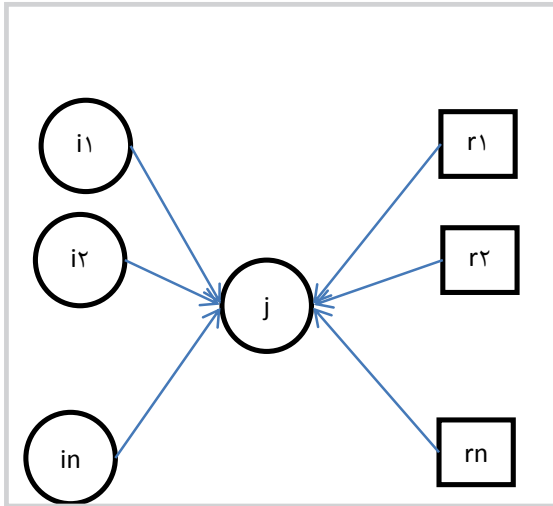
تصویر ۳: تغذیه‌ی گرهی زاز گرهی i و منبع j

فرموله‌سازی مرکزیت

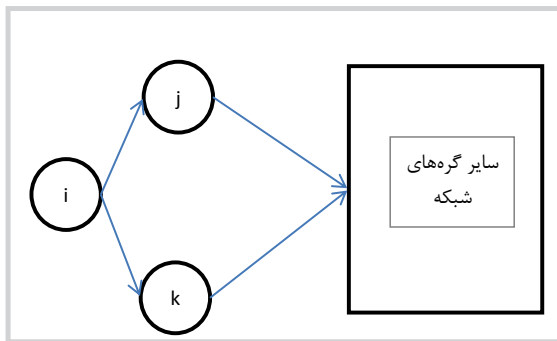
اگر فرض شود که گرهی i (تنها) به گره‌های z و k با وزن‌های به ترتیب w_{ij} و w_{ik} متصل است، در این صورت میزان کاهش کارایی شبکه در صورت آسیب‌دیدگی گرهی i به صورت زیر دسته‌بندی می‌شود:

$$J, k, 1$$

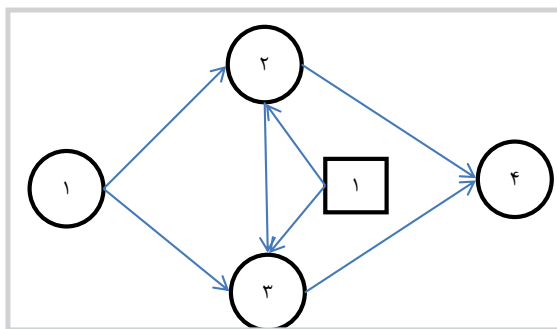
۲. سایر گره‌ها



تصویر ۴: ساختار شبکه‌ای بین منابع و دارایی‌ها



تصویر ۵: تأثیر گرهی از شبکه



تصویر ۶: چگونگی وابستگی دارایی‌ها در شبکه‌ی مفروض

که در آن δ_i برابر $I - p_i$ است. مشاهده می‌شود که δ_i و p_i با اعمال آثار گره‌های گذشته بر آن‌ها تغییر می‌کنند. برای محاسبه‌ی عملکرد گرهی ۴ نیاز به محاسبه‌ی عملکرد گرهی ۲ و ۳ است و برای محاسبه‌ی گرهی ۳ نیاز به محاسبه‌ی عملکرد گرهی ۱ و ۲ است و عملکرد گرهی ۲ با عملکرد گرهی ۱ تخمین زده می‌شود. بنابراین در مورد گرهی ۱ داریم:

$$p_1 = (1 - \mu_1)$$

رابطه‌ی ۱۹:

مشخص است که تأثیر کاهش عملکرد گرهی i بر دو گرهی z و k ، به ترتیب، برابر است با w_{ij} و w_{ik} .

اما اثر کاهش عملکرد گرهی i بر سایر گره‌های شبکه مشخص است که از طریق گره‌های z و k انتقال می‌یابد. بنابراین اگر تأثیر گرهی z بر سایر گره‌های شبکه برابر مرکزیت گرهی z باشد، در این صورت تأثیر گرهی i بر سایر گره‌های شبکه برابر w_{ij} (تأثیر گرهی i بر گرهی z) ضربدر مرکزیت گرهی z است. بنابراین تأثیر گرهی i بر سایر گره‌های شبکه برابر خواهد بود با:

رابطه‌ی ۱۲:

$$cen_i = w_{ij} + w_{ik} + w_{ij} \times cen_j + w_{ik} \times cen_k = w_{ij}(1 + cen_j) + w_{ik}(1 + cen_k)$$

به طور کلی برای هر گرهی i رابطه‌ی زیر بیان‌کننده‌ی مقدار مرکزیت گره در شبکه خواهد بود.

رابطه‌ی ۱۳:

$$cen_i = \sum_j (1 + cen_j) w_{ij}$$

همان‌طور که مشخص است، مجموعه‌ی معادلات پیشین تشکیل یک دستگاه معادلات به صورت زیر می‌دهند:

$$(I - W)cen = WW$$

رابطه‌ی ۱۴:

که در آن ماتریس WW ماتریسی ستونی است که هر یک از درایه‌های آن مجموع درایه‌های سطری ماتریس W است. برای حل دستگاه فوق می‌توان از نرم‌افزار MATLAB استفاده کرد.

مطالعه‌ی موردی

فرض کنید یک صنعت متشکل از ۴ دارایی و یک منبع برق وجود دارد. فرض می‌شود که دارایی ۱، ۳۰ درصد آسیب دیده باشد؛ دارایی ۲، ۲۰ درصد آسیب دیده باشد؛ دارایی ۳ سالم و دارایی ۴، ۱۰ درصد آسیب دیده باشد. همچنین فرض می‌شود که منبع ۱ نیز ۲۰ درصد دچار آسیب‌دیدگی شده است. نحوه‌ی وابستگی دارایی‌ها به هم به صورت شبکه‌ای است که در تصویر ۶ آمده است. میزان تأثیر گره‌ها بر یکدیگر نیز مطابق جدول ۱ خواهد بود.

نتایج عددی

برای مطالعه‌ی موردی ارائه‌شده ابتدا اثر خرابی را به وسیله‌ی رابطه‌ی ۱۱ محاسبه می‌کنیم تا ارزش هر گره با توجه به معیار مرکزیت به دست آید.

برای شبکه‌ی ارائه‌شده با توجه به رابطه‌ی ۱۱ و تصویر ۶ روابط زیر موجود است:

رابطه‌ی ۱۵:

$$p_1 = (1 - \mu_1)$$

رابطه‌ی ۱۶:

$$p_2 = (1 - w_{12}\delta_1) \times (1 - \Delta_1) \times (1 - \mu_2)$$

رابطه‌ی ۱۷:

$$p_3 = (1 - w_{13}\delta_1 - w_{23}\delta_2) \times (1 - \Delta_1) \times (1 - \mu_3)$$

رابطه‌ی ۱۸:

$$p_4 = (1 - w_{24}\delta_2 - w_{23}\delta_3) \times (1 - \mu_3)$$

جدول ۱: وزن تأثیر گره‌ها بر یکدیگر

$W_{i,j}$	۱	۲	۳	۴
۱	۰	۰/۳	۰/۳	۰
۲	۰	۰	۰/۱	۰/۲
۳	۰	۰	۰	۰/۶
۴	۰	۰	۰	۰

زیرا عملکرد گره ۱ نه به عملکرد گره‌ی دیگری وابسته است و نه از منبعی تغذیه می‌کند. پس عملکرد آن تنها وابسته به سطح آسیب‌دیدگی ظاهری و فیزیکی آن است؛ بنابراین داریم:

$$p_1 = (1 - \mu_1) = 1 - 0/3 = 0/7 \quad \text{رابطه‌ی ۲۰}$$

و مقدار δI برابر خواهد بود با:

$$\delta_1 = (1 - p_1) = 1 - 0/7 = 0/3 \quad \text{رابطه‌ی ۲۱}$$

به همین ترتیب برای گره‌ی ۲ داریم:

$$p_2 = (1 - w_{12}\delta_1) \times (1 - \Delta_1) \times (1 - \mu_2) \quad \text{رابطه‌ی ۲۲}$$

زیرا عملکرد گره‌ی ۲ وابسته به عملکرد گره‌ی ۱ و منبع ۱ است. از آنجا که سطح آسیب‌دیدگی منبع ۱ برابر ۰/۲ است و سطح آسیب‌دیدگی فیزیکی خود گره برابر ۰/۲ است، داریم:

$$\mu_2 = 0/2 \quad \text{رابطه‌ی ۲۳}$$

$$\Delta_2 = 0/2 \quad \text{رابطه‌ی ۲۴}$$

$$w_{12} = 0/3 \quad \text{رابطه‌ی ۲۵}$$

$$p_2 = (1 - 0/3 \times 0/3) \times (1 - 0/2) \times (1 - 0/2) = 0/58 \quad \text{رابطه‌ی ۲۶}$$

$$\delta_2 = 1 - p_2 = 1 - 0/58 = 0/42 \quad \text{رابطه‌ی ۲۷}$$

به همین ترتیب برای گره‌ی ۳ داریم:

$$p_3 = (1 - 0/3 \times 0/3 - 0/1 \times 0/42) \times (1 - 0/2) = 0/69 \quad \text{رابطه‌ی ۲۸}$$

$$\delta_3 = 1 - 0/69 = 0/31 \quad \text{رابطه‌ی ۲۹}$$

و برای گره‌ی ۴ داریم:

رابطه‌ی ۳۰:

$$p_4 = (1 - 0/2 \times 0/42 - 0/6 \times 0/31) \times (1 - 0/1) = 0/65$$

رابطه‌ی ۳۱:

$$\delta_4 = 1 - 0/65 = 0/35$$

با این توضیحات وابستگی‌های دارای‌ها در یک شبکه‌ی ساده محاسبه می‌شود.

میزان کل کاهش عملکرد در شبکه برابر جمع میزان کاهش عملکردهای تک‌تک گره‌ها است. بنابراین میزان کاهش عملکرد در این مثال برابر است با:

$$\sum_i \delta_i = 1/38 \quad \text{رابطه‌ی ۳۲}$$

برای تبیین وابستگی اجزا در مثال ارائه شده و فرق آن با آسیب‌دیدگی بدون اثر سیستمی، توجه شود که بدون در نظر گرفتن آثار وابستگی سیستمی (یعنی بدون در نظر گرفتن تأثیرات متقابل در یک شبکه) میزان کاهش عملکرد در شبکه برابر جمع میزان آسیب‌دیدگی اولیه‌ی گره‌ها بود. به عبارت دیگر برابر بود با: ۰/۳. آسیب‌دیدگی در گره‌ی ۱ به علاوه‌ی ۰/۲. آسیب‌دیدگی در گره‌ی ۲ به علاوه‌ی صفر درصد آسیب‌دیدگی در گره‌ی ۳ به علاوه‌ی ۰/۱. آسیب‌دیدگی در گره‌ی ۴. ملاحظه می‌شود که آسیب‌دیدگی کل در این حالت برابر است با مجموع آسیب‌دیدگی‌ها که ۰/۶ است. اما مشاهده می‌شود که آسیب‌دیدگی به دست آمده در محاسبه‌ی فوق برابر ۱/۳۸ است. دلیل این تفاوت در نظر گرفتن تأثیرات متقابل بین اجزا است. در واقع، در صورت نبود تأثیرات بین اجزا، میزان آسیب‌دیدگی گره‌ها برابر جمع آسیب‌دیدگی تک‌تک اجزا بود ولی، در صورت وجود تأثیرات متقابل، این اثر بزرگ‌تر از اثر آسیب‌دیدگی تک‌تک اجزا است. در این مثال اثر وابستگی سیستمی اجزا برابر است با:

رابطه‌ی ۳۳:

$$1/38 - 0/6 = 0/78$$

بنابراین تمایز میان اثرها در حالت بدون وجود وابستگی عملکردی میان اجزا و در حالت وجود وابستگی میان اجزا شرح داده شد.

محاسبه‌ی ارزش گره‌ها در شبکه

برای محاسبه‌ی مرکزیت شبکه‌ی مذکور از گره‌ی ۴ محاسبات شروع می‌شود. برای گره‌ی ۴ داریم:

$$cen_4 = 0 \quad \text{رابطه‌ی ۳۴}$$

از آنجا که گره‌ی ۴ بر گره‌ی دیگری در شبکه تأثیر ندارد، بنابراین مقدار مرکزیت آن برابر صفر است. برای گره‌ی ۳ داریم:

رابطه‌ی ۳۵:

$$cen_3 = (1 + cen_4)w_{34} = (1 + 0)0/6 = 0/6$$

و برای گره ۲ داریم:
رابطه ۳۶:

$$cen_2 = (1 + cen_3)w_{23} + (1 + cen_4)w_{24} = \left(1 + \frac{0}{6}\right)0/1 + (1 + 0)0/2 = 0/16 + 0/2 = 0/36$$

و برای گره ۱ داریم:
رابطه ۳۷:

$$cen_1 = (1 + cen_2)w_{12} + (1 + cen_3)w_{13} = \left(1 + \frac{0}{36}\right)0/3 + \left(1 + \frac{0}{6}\right)0/3 = 0/888$$

همان طور که مشاهده می شود، ارزش گره ۱ در شبکه از بقیه ی گره ها بیشتر است و سپس ارزش گره ۳ از بقیه ی گره ها بیشتر است و بعد از گره ۳ گره ۲ با اهمیت است و در نهایت گره ۴ دارای کمترین اهمیت از نظر تأثیرگذاری بر شبکه است. بنابراین رتبه بندی دارایی ها به صورت زیر خواهد بود:

$$1 > 3 > 2 > 4$$

با این توصیف چنانچه لازم باشد اقدامات پیشگیرانه ای نظیر تصمیم گیری برای احداث دارایی جایگزین، یا اقدامات محافظتی برای کاهش پیامد و آسیب پذیری صورت بگیرد، بهتر است اولویت را به دارایی ۱ و سپس به گره های ۳ و ۲ و ۴ دهیم.

گفتنی است که برای یک شبکه شاخص های دیگری مانند نزدیکی^۹، میانی^{۱۰} وجود دارند [۱۹] که در آن ها وضعیت یک گره از نظر فاصله با سایر گره های شبکه بررسی می شود که هر یک معیارهای مهمی هستند ولی در بررسی و تحلیل ریسک شبکه ها کاربرد وسیعی ندارد و نیاز به ارائه ی معیاری برای سنجش اثر عملکرد یک گره بر سایر گره ها وجود دارد که در این تحقیق این معیار برای تحلیل ریسک ارائه گردید.

برای مثال معیار نزدیکی به صورت زیر تعریف می گردد:

رابطه ۳۸:

$$c_i = \frac{n-1}{\sum_j d_{ij}}$$

در رابطه ی ۳۸، n تعداد گره های شبکه و d_{ij} برابر فاصله (کوتاه ترین فاصله) بین دو گره ی i و j است [۱۹]. بنابراین هر چه فاصله ی یک گره با سایر گره ها کمتر باشد، مقدار نزدیکی گره بیشتر خواهد بود و این موضوع در شبکه های راه مورد اهمیت است ولی طبق آنچه گفته شد در شبکه ی زیرساخت دیگر کاربرد چندانی ندارد.

نتیجه گیری

در این تحقیق بیان شد که مدل لیونتیف با توجه به در نظر نگرفتن اثر متفاوت منابع و در نظر نگرفتن آسیب دیدگی خود گره بر عملکرد آن کاربرد دقیقی ندارد و نیاز است که مدلی جدید برای محاسبه ی اثر سیستمی ارائه شود. برای این موضوع مفهومی به نام مرکزیت برای اولین بار ارائه شد که در آن مرکزیت برابر اثر حذف یک گره بر سایر گره های شبکه بود. در واقع معیارهای مختلفی می توان برای در نظرگیری ارزش یک دارایی در شبکه

ارائه داد؛ مانند درجه ی رأس آن دارایی در گراف شبکه و غیره که دارای ارزش عملکردی نیستند و ارزش تأثیر دقیق حذف یک گره را بر شبکه نشان نمی دهند. استفاده ی اصلی شاخص مرکزیت در تعیین دارایی بحرانی است و معیاری است برای تصمیم گیری در چگونگی تخصیص منابع دفاعی؛ همچنین در اقدام برای کاهش و مهار آسیب پذیری به کار می آید. از آنجا که معادلات مربوط به مرکزیت گره ها تشکیل یک دستگاه می دهند، بنابراین به وسیله ی نرم افزارهای موجود در بازار، که دستگاه های خطی را حل می کنند، می توان مرکزیت را در یک شبکه از دارایی ها محاسبه کرد.

برای تحقیق های بعدی توصیه می شود که مفهوم مرکزیت تعمیم یابد؛ به طوری که در آن معیارهایی چون ارزش عملکردی دارایی، زمان احیای دارایی بعد از آسیب دیدن و ارزش ریالی دارایی اضافه شود و مفهومی جامع برای ارزش دارایی در شبکه تعیین گردد. همچنین در نظرگیری عدم قطعیت با استفاده از منطق فازی یا سایر روش های مدل سازی عدم قطعیت ها، مانند احتمالات زمانی که برای مقادیر وزن تأثیر دارایی ها بر یکدیگر اطمینان نداریم، توصیه می گردد. همچنین ارائه ی مدلی برای اصلاح شبکه در زمانی که مرکزیت یک گره در شبکه بالا است و موجب آسیب پذیر بودن شبکه می شود نیز توصیه می گردد.

پی نوشت

1. Wasily Leontief
2. Static
3. Inoperability Risk
4. Input -Output inoperability Model(IIM)
5. Demand reduction
6. Multi-regional
7. Leontief
8. Centrality
9. Closeness
10. Betweenness

منابع

1. Talukdar, S. N., J. Apt, M. Ilic, L. B. Lave, M. G. Morgan (2003). Cascading Failures: Survival versus Prevention. *The Electricity Journal*. November, 25 - 31.
2. USDOT (United States Department of Transportation). Freight in America. URL: http://www.bts.dot.gov/publications/freight_in_america/.
3. SVBJ (Silicon Valley Business Journal) (2002). U.S. Internet Traffic Tops 100 Petabytes. URL: <http://sanjose.bizjournals.com/sanjose/stories/2002/05/06/daily40.html>.
4. Lave LB., Apt J., Farrell A., Morgan M.G. (2005). Increasing the security and reliability of the USA electricity system. In: Richardson HW, Gordon P, Moore II JE, editors. *The economic impacts of terrorist attacks*, Cheltenham: Edward Elga Publishing, Inc, 57 - 70.
5. Mendonca, D., William, AW. (2006). Impacts of the

(MRIIM) for spatial explicitness in preparedness of interdependent regions. *Systems Engineering*, 13(1), 28 – 46 .

18. Cutter, SL., Burton, CG., Emrich, CT. (2010). Disaster resilience indicators for bench-marking baseline conditions. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 7(1).
19. Wasserman, S., Faust, K. (1994). *Social Network Analysis*. Press syndicate University of Cambridge .
- 2001 world trade center attack on New York City critical infrastructures. *Journal of Infrastructure System*, 12(4), 260 – 70.
6. O'Rourke, TD., Lembo, AJ., Nozick, LK. (2003). Lessons learned from the world trade center disaster about critical utility systems. In: Monday JL, editor. Beyond September 11th: an account of post-disaster research. *Boulder, CO: Natural Hazards Research and Applications Information Center*, 269 – 290.
7. National Climactic Data Center (NCDC). Climate of Atlantic hurricane season 2004. NCDC, Asheville, N.C., www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/2004/hurricanes04.html#impacts. Feb.1, 2006,2005.
8. White House (2003). The National Strategy for the Physical Protection of Critical Infrastructures and Key Assets. *URL: http://www.whitehouse.gov/pcipb/physical_strategy.pdf*
9. Eusgeld I, Henzi D, Kroger W. Comparative evaluation of modeling and simulation techniques for interdependent critical infrastructures. ETH Zurich: Scientific report, 50.
10. Leontief, WW (1951). Input – output economics. *Scientific American*, 185, 15 – 21.
11. Rose A, Miernyk W.(1989). Input – output analysis: the first fifty years. *Economic Systems Research*, 1,229 – 71 .
12. Haimes, YY., Jiang, P.(2001). Leonief-based model of risk in complex interconnected infrastructures. *Journal of Infrastructure Systems*, 7(1), 1 – 12.
13. Haimes, YY., Horowitz, BM., Lambert, JH., Santos, JR., Lian, C., Crowther, KG. (2005). Inoperability input – output model for interdependent infrastructure sectors. I: theory and methodology. *Journal of Infrastructure Systems*, 11(2),67– 79.
14. Santos, JR., Haimes, YY. (2004). Modeling the demand reduction input – output (I – O) inoperability due to terrorism of interconnected infrastructures. *Risk Analysis*, 24(6):1437 – 51.
15. Lian, CY. , Haimes, YY. (2006). Managing the risk of terrorism to interdependent infrastructure systems through the dynamic inoperability input – output model. *Systems Engineering*, 9(3):241 – 58.
16. Xu, W., Hong, L., He, L., Wang, S., Chen, X. (2011). A supply dynamic inoperability input –output price model for interdependent infrastructure systems. *Journal of Infrastructure Systems*, 17(4), 151 – 62 .
17. Crowther, KG., Haimes, YY.(2010). Development of the multiregional inoperability input – output model

۵۵

شماره پنجم

بهار و تابستان
۱۳۹۳

دوفصلنامه
علمی و پژوهشی



ارائه‌ی مدل نوین برای تحلیل وابستگی دارایی‌های حیاتی
در آسیب پذیری صنایع