تاریخ دریافت: ۹۲/۴/۲۵
تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۲۱

مروری بر روشهای تحلیل اعتمادپذیری شبکه‌های درون شهری شریانهای حیاتی

محمدرضا سقراط، دانشجوی دکترا، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
مرتضی بسطامی (نویسنده مسؤول)، استادیار پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله،
E-mail: m.bastami@iiees.ac.ir

چکیده: *افزایش اعتمادپذیری شبکه‌ها می‌تواند خسارات وارده به سیستم‌ها و شبکه‌ها را پس از بروز حوادثی مانند زلزله کاهش دهد. شناخت شبکه‌ها و روشهای تحلیل اعتمادپذیری امری ضروری و از اهداف این مطالعه است. یکی از مشخصه‌های بارز شبکه‌ها که آنها را دارای ساختاری ممتاز می‌نماید ارتباط بین هر دو گره از شبکه است که می‌تواند با مسیرهای زیاد و مختلفی تأمین شود و این ارتباط را قابل اعتماد سازد. بدترین حالت زمانی است که با شکست مجموعه‌ای از مؤلفه‌های مشخص، شبکه دچار شکست می‌شود. در بسیاری از تحلیل‌های اعتمادپذیری و بهینه‌سازی مدل‌ها، دو حالته بودن (دایر و غیردایر) مؤلفه‌ها فرض می‌شود که در حالت واقعی چنین فرضی می‌تواند دور از واقعیت باشد. در این مقاله، ضمن معرفی گرافها و انواع سیستم‌ها، دیاگرام‌های تصمیم دودویی تشریح می‌شوند. همچنین شبکه‌های پیچیده مانند شبکه‌های تصادفی و آزاد مقیاس معرفی و تحلیل آنها مورد بحث قرار می‌گیرد. با توجه به گستردگی برخی شبکه‌ها باید از روشهایی استفاده کرد که ضمن دقت کافی، هزینه محاسباتی را نیز کاهش دهد. در این میان همان‌طور که در بخش تحلیل شبکه‌های پیچیده تشریح می‌گردد می‌توان به دو روش موسوم به گراف تصادفی و آزاد مقیاس اشاره نمود، اگرچه روش گراف تصادفی دارای محبوبیت بیشتری است.*

کلیدواژه‌ها: *زلزله، اعتمادپذیری شبکه، سیستم چندحالته، سیستم دودویی، شبکه‌های پیچیده*

۱– مقدمه

در دهه‌های گذشته به خاطر پیشرفتهای ایجاد شده در زمینه کامپیوتر، مخاطبان زیادی به مدل کردن سازه‌ها (که توسط بشر ساخته شده و یا در ساخت آنها نقش داشته است) به عنوان شبکه علاقمند شده‌اند.

افزایش پیچیدگی شبکه‌های واقعی نیاز به رویکرد تحلیلی قوی دارد تا بتواند عملکرد شبکه در مقیاسهای جدید را پیش‌بینی نماید. مشخصه خاص تشکیلات مدرن زندگی بشر، افزایش سطح ارتباطی* است. ساختارهای اجتماعی، اقتصادی و فنی، گرایش به افزایش در بُعد و در نهایت تشکیل سیستم-های مرتبط پیچیده را دارند. سیستم‌های مرتبط می‌تواند در فرم شبکه به صورت گره و خطوط ارتباطی بین این گره‌ها خلاصه شود به طوری که گره‌های تشکیل‌دهنده این سیستم‌ها و خطوط بین آنها بیانگر ارتباط نسبی و یا فیزیکی بین آنها می‌باشد. یکی از مشخصه‌های بارز شبکه‌ها، ارتباط بین هر دو گره از شبکه است که می‌تواند با مسیرهای زیاد و مختلفی تأمین شود و ارتباط را قابل اعتماد سازد. به همین دلیل، اعتمادپذیری شبکه‌ها از دیرباز بحث بسیار مهمی بوده است [۱-۲]. امروزه تحلیل اعتمادپذیری شبکه بحث مهمی در ایجاد و نگهداری بسیاری از سیستم‌های واقعی مانند شبکه‌های ارتباطات، کامپیوتر و برق می‌باشد. لازم به ذکر است که اعتمادپذیری توانایی یک شبکه برای ادامه خدمت‌رسانی با توجه به شکست برخی مؤلفه‌ها است، در حالی که ایمنی شناسایی محلها و مؤلفه‌های آسیب‌پذیر و کاهش سطح خطر به میزان قابل قبولی می‌باشد.

شبکه‌های شریانهای حیاتی مهمترین شبکه‌ها در

محیط‌های شهری هستند که اعتمادپذیری آنها پس از وقوع زلزله حائز اهمیت می‌باشد. در یک شهر شبکه‌های مختلفی از جمله شبکه‌های اجتماعی، اقتصادی، درمانی و ... وجود دارد. شریانهای حیاتی به شبکه‌هایی اطلاق می‌شود که در آن جریان وجود دارد و آن را می‌توان به سیستم‌های انرژی (شبکه گاز، نفت، برق و ...)، سیستم‌های آب و فاضلاب، سیستم‌های حمل و نقل (جاده‌ای، دریایی، ریلی و هوایی) و سیستم‌های اطلاعاتی (مخابرات، رادیو و تلویزیون، اینترنت و ...) تقسیم‌بندی نمود. عملکرد هر یک از این شبکه‌ها پس از وقوع زلزله بسیار مهم می‌باشد. آسیب هر یک از شبکه‌های فوق می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری را ایجاد نماید.

به عنوان مثال می‌توان به زلزله فروردین ماه سال ۱۳۹۲ شهرستان دشتی اشاره نمود که بلافاصله بعد از وقوع زلزله به علت قطع اتوماتیک پست خورموج شبکه برق از کار افتاد. اگرچه این پست دچار آسیب نشد، ولی به دلیل ارتعاشات کابلهای انتقال و نزدیکی فاصله آنها، از لحاظ عملکردی از مدار خارج گردید. شبکه برق متحمل خساراتی از جمله شکستگی و سقوط تیرهای برق، آسیب به اجزای ترانسهای هوایی و ... گردید [۳].

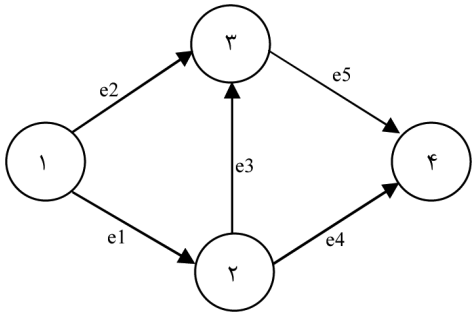
می‌توان به آسیبهای شبکه‌های آبرسانی در هنگام بروز زلزله به عنوان یکی از شریانهای حیاتی دارای اهمیت اشاره نمود که ممکن است مشکلات بسیاری را به وجود آورد. این شبکه‌ها در معرض گسلش، روانگرایی، تغییرشکلهای زمین و سایر خطرات لرزه‌ای هستند. وجود کهنگی و خوردگی لوله‌ها علاوه بر خطرات لرزه‌ای باعث افزایش آسیب‌دیدگی شبکه‌ها می‌شود. نبود آب می‌تواند بحرانهایی را از لحاظ بهداشتی، روحی و روانی و گسترش آتش‌سوزی را به همراه داشته باشد. پس می‌توان گفت اعتمادپذیری سیستم‌های پیچیده یک بحث بسیار مهم است چون یک حادثه ساده می‌تواند منجر به حوادث فاجعه‌باری شود. یعنی حوادث سیستم‌ها می‌تواند منجر به خسارات اقتصادی، محیطی و حتی انسانی شود.

در زمینه اعتمادپذیری شبکه‌های شریان حیاتی می‌توان به مطالعه بسطامی [۴] و پانوسیس [۵] اشاره داشت. در مطالعات قبلی در زمینه اعتمادپذیری این شبکه‌ها، تنها دو حالت شکست و عدم شکست را برای مؤلفه‌ها در نظر می‌گرفتند که بعداً با در نظر گرفتن حالات خسارات دیگر نظیر جزئی، متوسط، شدید و ویرانی بهبود نسبی یافت. سیستم‌های سری در شبکه‌های موازی* مورد مطالعه محققینی از جمله شینوزوکا و همکاران [۶]، گریگوریو [۷] و اُرورک و همکاران [۸] قرار گرفته است. در یک شبکه بزرگ تعداد زیادی از محاسبات برای یافتن مسیر بین دو نقطه باید انجام شود. مطالعات اشاره شده بیشتر در حالتی که شبکه کوچک مد نظر باشد کاربرد بهتری دارد. نودا و همکاران [۹] روشی را ارائه نمودند که در آن یک شبکه متشکل از زیرشبکه‌های کوچکتری می‌باشد. روشهای دیگری که مورد توجه بسیاری از محققین از جمله شینوزوکا [۱۰] و خاطر و همکاران [۱۱] بوده است، روش موسوم به شبیه‌سازی مونته کارلو می‌باشد.

لازم به ذکر است که تحلیل اعتمادپذیری وابسته به اعتمادپذیری مؤلفه‌ها و موقعیت شبکه می‌باشد. در بدترین حالت با شکست مجموعه‌ای از مؤلفه‌های مشخص، شبکه دچار شکست می‌شود. احتمال این که همه گره‌های (یا مجموعه‌ای از گره‌ها) گراف توسط حداقل یک مسیر از لینک‌های فعال، برقراری ارتباط داشته باشند، به عنوان اعتمادپذیری شبکه تعریف می‌شود. پس هدف از این مطالعه بررسی روشهای موجود اعتمادپذیری شبکه‌ها است که می‌تواند در تحلیل اعتمادپذیری شبکه‌های شریانی مانند آب، برق، گاز، فاضلاب و ... به کار رود.

۲- نمایش شبکه به صورت گرافیکی

یک روش بسیار رایج در شبکه، ترسیم گراف می‌باشد که مجموعه‌ای از گره‌ها و خطوط بین نقاط (یعنی لینک‌ها) است. یک شبکه می‌تواند در فرم یک گراف به صورت $G=(V,E)$ بیان شود که V بیانگر گره، E خطوط بین گره‌ها، N_V تعداد گره‌ها و N_E بیانگر تعداد لینک‌ها می‌باشد. یک شبکه می‌تواند به دو صورت هدایت شده و هدایت نشده باشد. اگر لینک‌ها در شبکه دارای جهت باشد شبکه هدایت شده، در غیر این صورت شبکه هدایت نشده معرفی می‌گردد. مثال ساده‌ای از یک گراف هدایت شده به صورت شکل (۱) نمایش داده شده است.



***شکل (۱)**: نمایش یک گراف.*

۳– تحلیل اعتمادپذیری شبکه

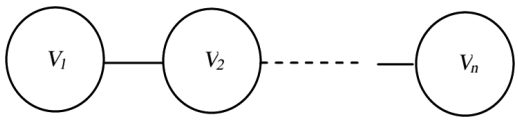
تحلیل اعتمادپذیری شبکه عمدتاً با ارزیابی عملکرد یک شبکه بر حسب توانایی آن برای مقاومت مؤلفه‌هایش در برابر شکست سر و کار دارد. یک شبکه می‌تواند به صورت گراف که مجموعه‌ای از گره و بردار است، مدل شود. شریانهای حیاتی، سیستم‌هایی هستند که به طور مکانی در طول ناحیه وسیعی برای حمل سرویسهای حیاتی قرار دارند. این سیستم‌ها می‌توانند زمانی که ظرفیتهای لینک و گره به صورت تصادفی و یا تعیینی انتخاب می‌شوند، به صورت شبکه‌های معادل مدل گردند. سیستم‌ها در برابر مخاطرات و یا عواملی که به وسیله بشر ساخته می‌شوند، دچار شکست می‌شوند. ارزیابی اعتمادپذیری شبکه‌های شریانی به تخمین خطر لرزه‌ای و تحلیل اعتمادپذیری شبکه نیاز دارد. در مدل‌های قدیمی، دو حالت (شکست یا عدم شکست) برای یک مؤلفه در نظر گرفته می‌شد. سپس این مدل‌ها به تدریج توسعه یافتند. روش مونته کارلو برای تحلیل شبکه محبوبیت زیادی داشته و مورد استفاده بسیاری از محققین بوده است. همچنین الگوریتم بازگشتی برای پیدا کردن کوتاهترین مسیر از یک چشمه به یک گره پایانی با استفاده از توابع بولی* پیشنهاد شده است. یک نکته مهم در شبکه شریان حیاتی این است که کوتاهترین مسیر، یک مسیر جریان است. منظور از مسیر جریان، مسیرهای متصل‌کننده نقاط ابتدایی و پایانی مشخص شده توسط کاربر می‌باشد.

بحث اصلی در طراحی شبکه، عملکرد مؤثر و کارای شبکه موردنظر با وجود شکست مؤلفه‌ها است. در مراجع، هدف از تحلیل اعتمادپذیری شبکه، معمولاً پاسخ به این است که ساختار شبکه مورد نظر چیست؟ چه چیزی سبب شکست مؤلفه‌ها می‌شود؟ و چه زمانی شبکه قابل استفاده لحاظ می‌گردد؟ [۱، ۱۲].

در ادامه، ضمن معرفی سیستم‌های سری، موازی و یا ترکیبی از آنها و همچنین توابع ساختار مربوطه، به سختی-های موجود در استفاده از روش شمارش حالات کامل اشاره می‌گردد. همچنین دیاگرام‌های تصمیم دودویی بیان شده و تأکید می‌گردد که ترتیب انتخاب متغیرها تا چه میزان بر هزینه محاسباتی مؤثر می‌باشد. لازم به ذکر است شبکه‌های چند حالته وزنی احتمالاتی مورد بررسی قرار گرفته و بیان می‌شود که در این شبکه‌ها تنها دو مود شکست و یا عدم شکست لحاظ نمی‌گردد. ضمن معرفی شبکه‌های پیچیده، روشهای مربوط به تحلیل آنها نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳–۱– سیستم‌ها

سیستم‌ها را می‌توان به صورت سری، موازی و یا ترکیبی از آنها و یا هیچ کدام در نظر گرفت. سیستم‌های سری به گونه‌ای هستند که اگر یکی از مؤلفه‌های سیستم از کار بیفتد، کل سیستم از کار خواهد افتاد. سیستم سری ضعیف‌تر از ضعیف‌ترین لینک می‌باشد. شکل (۲) یک توصیف شماتیک از این سیستم را نشان می‌دهد.



***شکل (۲)**: نمایش گرافیکی سیستم‌های سری.*

تابع ساختار سیستم سری به شرح ذیل است:

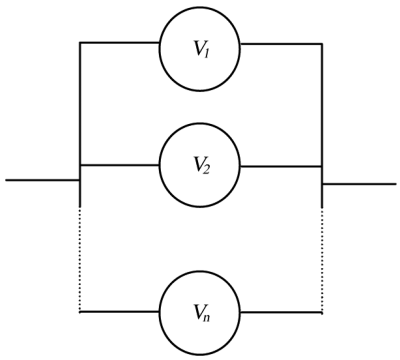
$$y = \varphi(x_1, x_2, \ldots, x_n) = x_1.x_2....x_n = \prod_{i=1}^{n} x_i \qquad (۱)$$

این سیستم‌ها تنها در شرایطی کار می‌کنند که همه مؤلفه‌های سیستم به طور موفق عمل نمایند:

$$\begin{aligned} &(\forall i, x_i = 1) \Rightarrow (y = 1) \\ &(\exists i, x_i = 0) \Rightarrow (y = 0) \end{aligned} \qquad (۲)$$

در یک سیستم موازی به شرط آنکه تمام مؤلفه‌های سیستم از کار نیفتد، سیستم به صورت موفق کار می‌کند. اعتمادپذیری کل سیستم بالاتر از مؤلفه‌های تکی سیستم

می‌باشد. به صورت شماتیک یک سیستم موازی در شکل (۳) نمایش داده شده است.



***شکل (۳)**: نمایش گرافیکی سیستم‌های موازی.*

تابع ساختار یک سیستم موازی برابر است با:

$$y = \varphi(x_1, x_2, ..., x_n) = 1 - (1 - x_1)....(1 - x_n) \qquad (۳)$$

این توابع ساختار تنها در شرایطی که حداقل یکی از مؤلفه‌های سیستم کار کند، به طور موفق عمل می‌نماید:

$$\begin{aligned} &(\exists\, i, x_i = 1) \Rightarrow (y = 1) \\ &(\forall i, x_i = 0) \Rightarrow (y = 0) \end{aligned} \qquad (۴)$$

منظور از سیستم سری- موازی سیستمی است که از n زیرسیستم به صورت سری که زیرسیستم i از m المان به صورت موازی تشکیل شده است ($i = 1, 2, ..., n$). اگر همه زیر سیستم‌ها به طور موفق عمل نماید سیستم به طور موفق کار می‌کند. همچنین هر زیرسیستم به طور موفق کار می‌کند اگر حداقل یکی از المانهایش به طور موفق عمل نماید. منظور از سیستم موازی- سری سیستمی است که از m زیرسیستم به صورت موازی تشکیل شده که هر زیرسیستم نیز از n_j المان به صورت سری تشکیل شده است ($j = 1, 2, ..., m$). اگر تنها یک زیرسیستم به طور موفق عمل نماید سیستم به‌طور موفق کار می‌کند. همچنین هر زیرسیستم نیز به طور موفق کار می‌کند در صورتی که همه المانهایش به طور موفق عمل نماید. وقتی سیستم مورد مطالعه شامل هیچ یک از سیستم‌های سری، موازی و یا ترکیبی از آنها نباشد، از روشهایی مانند شمارش کامل حالات*، کمینه مسیر و کمینه بریدگی*، روش فاکتورگیری* و روش دربرداری- حذف* استفاده می‌شود. در این مقاله فقط روش شمارش کامل حالات تشریح شده است.

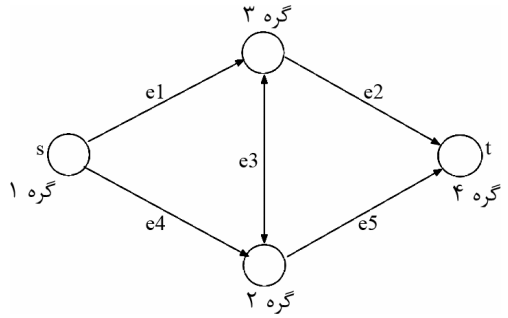
شمارش کامل حالات یک راه‌حل برای تعیین همه حالات قابل‌استفاده و یا غیرقابل استفاده سیستم و مجموع احتمال هر حالت می‌باشد. اگر حالات قابل‌استفاده در نظر گرفته شود اعتمادپذیری سیستم به دست می‌آید. در غیر این صورت اگر حالات غیرقابل استفاده به کار روند، نتایج بیانگر عدم اعتمادپذیری سیستم است. حالتی از شبکه $G = (V, E)$، زیر مجموعه‌ای از $S \subseteq E$ است که S لینک‌های قابل استفاده می‌باشد. با فرض PS به عنوان مجموعه‌ای از همه حالات قابل استفاده (مجموعه مسیرها) داریم:

$$R(G) = \sum_{S \in PS} \prod_{e \in S} p_e \prod_{e \notin S} (1 - p_e) \qquad (۵)$$

با توسعه همه حالات و تعیین این که کدام قابل استفاده است، می‌توان به سادگی (اما نه به طور مؤثر) اعتمادپذیری را محاسبه نمود. متغیر بولی برابر با ۱ ($x_i = 1$) بیانگر قابل استفاده بودن مؤلفه i است و وقتی برابر صفر باشد یعنی مؤلفه دچار شکست شده و غیرقابل استفاده می‌باشد. بنابراین حالت یک سیستم می‌تواند به صورت $\langle x_1, x_2, ..., x_n \rangle$ نشان داده شود. احتمال هر حالت برابر با $\prod_{i=1}^{n} k_i$ می‌باشد که k_i احتمال p_i است اگر مؤلفه i کار کند ($x_i = 1$) که در غیر این صورت k_i برابر با $q_i = 1 - p_i$ است. اگر مؤلفه i کار نکند ($x_i = 0$) و یا می‌تواند به صورت رابطه (۶) بیان شود:

$$k_i = \begin{cases} x_i = 1; \;\; P_r = p_i \\ x_i = 0; \;\; P_r = q_i = 1 - p_i \end{cases} \qquad (۶)$$

در شکل (۴)، یک شبکه فرضی نمایش داده شده که دارای چهار گره و پنج لینک است.



***شکل (۴)**: گراف مربوط به یک شبکه فرضی.*

جدول (۱) شمارش حالات کامل قابل‌استفاده شبکه فرضی در شکل (۴) را نشان می‌دهد. به عنوان مثال اگر لینک‌های $< e_1, e_2 >$ کار نماید ولی لینک‌های $< e_3, e_4, e_5 >$ کار نکند، احتمال به صورت $p_1 p_2 q_3 q_4 q_5$ محاسبه می‌گردد.

همان‌طور که در جدول (۱) نشان داده شده از اشکالات این روش می‌توان به پیچیدگی محاسباتی اشاره نمود. شمارش حالات کامل نیاز به بسط همه 2^n حالات سیستم دارد که n تعداد مؤلفه‌ها می‌باشد.

جدول (۱): *حالات عملکردی گراف مربوط به شکل (۴).*

$< e_1, e_2, e_3, e_4, e_5 >$	احتمال
<1, 1, 0, 0, 0>	$p_1\ p_2\ p_3,\ p_4\ p_5$
<0, 0, 0, 1, 1>	$q_1\ q_2\ q_3,\ p_4\ p_5$
<1, 1, 1, 0, 0>	$p_1\ p_2\ p_3,\ q_4\ q_5$
<1, 1, 0, 1, 0>	$p_1\ p_2\ p_3,\ p_4\ q_5$
<1, 1, 0, 0, 1>	$p_1\ p_2\ q_3,\ q_4\ p_5$
<1, 0, 1, 0, 1>	$p_1\ q_2\ p_3,\ q_4\ p_5$
<1, 0, 0, 1, 1>	$p_1\ q_2\ q_3,\ p_4\ p_5$
<0, 1, 1, 1, 0>	$q_1\ p_2\ p_3,\ p_4\ q_5$
<0, 1, 0, 1, 1>	$q_1\ p_2\ q_3,\ p_4\ p_5$
<0, 0, 1, 1, 1>	$q_1\ q_2\ p_3,\ p_4\ p_5$
<1, 1, 1, 1, 0>	$p_1\ p_2\ p_3,\ p_4\ q_5$
<1, 1, 1, 0, 1>	$p_1\ p_2\ p_3,\ q_4\ p_5$
<1, 1, 0, 1, 1>	$p_1\ p_2\ q_3,\ p_4\ p_5$
<1, 0, 1, 1, 1>	$p_1\ q_2\ p_3,\ p_4\ p_5$
<0, 1, 1, 1, 1>	$q_1\ p_2\ p_3,\ p_4\ p_5$
<1, 1, 1, 1, 1>	$p_1\ p_2\ p_3,\ p_4\ p_5$

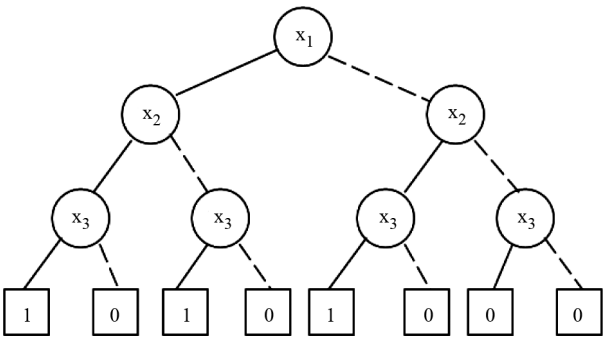
۳-۲- دیاگرام‌های تصمیم دودویی*

ترتیب تجزیه* می‌تواند به صورت گرافیکی با استفاده از درخت دودویی بیان شود [۱]. هر گره پایانی با متغیر بولین v یعنی با دو لینک خروجی با شماره ۱ (اگر باشد) و صفر (اگر نباشد) بیان می‌شود. یک *BDD* ساده نشده اساساً یک درخت تصمیم دودویی می‌باشد که شامل $2^n - 1$ گره‌های غیرپایانی است. برای مثال، تابع $f(x_1, x_2, x_3)$ با جدول (۲) می‌تواند به صورت شکل (۵) نیز بیان شود.

با شروع از گره اصلی و عبور از درخت، اگر شاخه که بیانگر مقدار متغیر است، دنبال شود به گره ترمینال صفر و یا ۱ می‌رسد. ترتیب متغیر در طول مسیر یکی است. در شکل (۵)، درخت متغیرها را به ترتیب $x_1 \prec x_2 \prec x_3$ لحاظ شده و $x_i \prec x_j$ بیان می‌کند که درون درخت، متغیر x_i نسبت به x_j نزدیکتر به گره اصلی می‌باشد.

جدول (۲): *جدول صحت تابع سه متغیره.*

x_1	x_2	x_3	f
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1



شکل (۵): *درخت تصمیم دودویی.*

اگرچه *BDD*ها بیان فشرده‌ای برای بسیاری از توابع دارند، می‌توانند بر حسب تعداد ورودی برخی از توابع به اندازه نمایی برسند. یکی از دلایل، انتخاب ترتیب نامناسب متغیرها هنگام ساخت *BDD* است. اندازه به دست آمده از یک *BDD* به شدت تحت تأثیر ترتیب انتخابی متغیر می‌باشد، اگرچه پیدا کردن بهترین ترتیب متغیر در طول ساخت *BDD*، بسیار سخت است ولی ترتیب‌گذاری ضعیف می‌تواند علاوه بر اندازه *BDD*، زمان تحلیل اعتمادپذیری برای سیستم‌های بزرگ را به طور مؤثری تحت تأثیر قرار دهد.

۳-۳- شبکه وزنی احتمالاتی

در مطالعات مرسوم بر روی اعتمادپذیری شبکه‌ها فرض بر این است که گره‌ها و لینک‌ها به صورت دودویی* هستند (یا کار می‌کنند و یا نمی‌کنند). همچنین اعتمادپذیری گره به گره به عنوان احتمال این که حداقل یک مسیر بین دو گره از لینک‌های کارا وجود دارد، محاسبه می‌شود. در بسیاری از موارد، وقتی که برخی ویژگیهای مربوطه به

لینک‌ها مانند ظرفیت، هزینه و طول بر عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارند، به بیان قویتری نیاز است. برای مثال، مقدار ترافیک که ارتباط را در سیستم‌های حمل و نقل و یا ارتباطی، یا فاصله بین گره‌ها در یک شبکه بزرگراهی، یا مقاومت شاخه‌ها (انشعابات) در شبکه برق توصیف می‌کند، پارامترهای اساسی برای یک توصیف کامل از این سیستم‌ها می‌باشند.

یک شبکه تصادفی وزنی یک سه جمله‌ای به صورت $N=(G,P,W)$ است که $G = (V, E)$ بیانگر یک گراف با N_V گره و N_E لینک می‌باشد. P تابع احتمال است که به هر لینک $e(u,v)$ (که $u,v\in V$ می‌باشد) یک احتمال برابر با $p(u,v)$ برای حالت up بودن (و برابر $1-p(u,v)$ برای حالت $down$) را نسبت می‌دهد. همچنین W یک تابع وزنی می‌باشد که به هر لینک $e(u,v)$ یک وزن واقعی $w(u,v)$ اختصاص می‌دهد.

۳-۴- شبکه‌های چند حالته وزنی احتمالاتی*

بیشترین کارها در تئوری اعتمادپذیری بر اساس مفهوم دودویی مرسوم مدل‌های اعتمادپذیری می‌باشد که تنها دو حالت ممکن را برای یک سیستم و مؤلفه‌هایش اجازه می‌دهد. اکثر سیستم‌های موجود از مؤلفه‌های چندحالته با سطوح عملکرد مختلف و همچنین چندین مود شکست با اثرات مختلف بر روی عملکرد کلی سیستم‌ها تشکیل شده که سیستم‌های چندحالته نامیده می‌شود [۱، ۱۳]. بنابراین، مقایسه تحلیل اعتمادپذیری برای MSS با سیستم‌های دودویی پیچیده‌تر خواهد بود. تئوری اعتمادپذیری سیستم-ها فرض می‌کند که سیستم و مؤلفه‌هایش اجازه دارند در دو حالت ممکن قرار گیرند: یا کار می‌کند و یا دچار شکست می‌شود. تئوری سیستم‌های چند حالته به سیستم‌ها و مؤلفه‌هایش اجازه می‌دهد بیشتر از دو حالت ممکن را تجربه کنند. در حالت اول، مؤلفه یا سیستم ممکن است به وسیله یک عدد صحیح غیرمنفی برای مدل‌های گسسته و یا به وسیله متغیر پیوسته که مقداری بین صفر و ۱ (مدل‌های پیوسته) است، بیان شود. در بسیاری از شرایط واقعی مدل‌های چند حالته، توصیف واقع‌گرایانه‌تری از سیستم‌های واقعی را بیان می‌کند.

ارزیابی سرویس بین s (نقطه آغازین) و t (نقطه پایانی) زمانی ممکن می‌باشد که یک شبکه وزنی $N=(G,P,W)$ و $G=(N,E)$ و یک مجموعه از M حالت $S=\{S_1,S_2,...,S_M\}$ ، برای مؤلفه‌های سیستم و جفت گره‌های $s-t$ مشخص باشد. برای شبکه‌های وزنی دو حالت در نظر گرفته می‌شود:

- هزینه به عنوان عامل وزن: احتمال این که اتصال بتواند کمتر از یک هزینه مشخص دایر شود، محاسبه می‌گردد. لازم به ذکر است که متناسب با کاهش قابلیت، مقدار هزینه مؤلفه افزایش می‌یابد.
- جریان به عنوان عامل وزن: احتمال این که جریان بزرگتر از حد آستانه کمینه است، محاسبه می‌شود. در این مورد حالتی که نشان دهد مؤلفه به خوبی کار می‌کند بیشترین مقدار را به خود می‌گیرد.

۳-۵- شبکه‌های پیچیده

ادبیات وسیعی در خصوص تحلیل سیستم شبکه‌های پیچیده وجود دارد که ویژگیهای ساختاری گرافها و قوانین حاکم بر انبوه یا اجتماع گره‌ها را با هدفی برای پیش‌بینی رفتار سیستم‌های شبکه‌ای بررسی می‌کند [۱، ۱۴]. دو رده توپولوژی برای بیان واقعی، شبکه‌های گراف تصادفی* و شبکه‌های آزاد مقیاس* است. در حقیقت بسیاری از رویکردها که در شبکه‌های با مقیاس کوچک به کار رفته و سؤالات زیادی که پاسخ داده شده در بیشتر شبکه‌های بزرگتر، غیرعملی هستند. در سالهای اخیر حرکت جدید اساسی در تحقیق شبکه با تمرکز بر سوق دادن تحلیل گرافهای کوچک به ویژگیهای آماری گراف با مقیاس بزرگ و قابل‌توجه شروع شده است. هدف پیش‌بینی رفتار سیستم‌های با شبکه پیچیده بر اساس ویژگیهای ساختاری و قوانین موضعی حاکم بر گره‌های تنها (تکی) است. سیستم‌های بسیاری که روزانه با آنها مواجه می‌شویم (مانند اینترنت، حمل و نقل، اجتماعی، ارتباطات و ...) میلیونها و یا حتی بیلیونها گره دارند که برای تشریح و تحلیل بسیار سخت هستند و حتی می‌توان گفت که نشان دادن و یا

ترسیم آنها کاملاً غیرممکن می‌باشد. بنابراین، برای تشریح برخی ویژگیهای این شبکه‌ها اندازه‌های مختلفی تعریف شده است که می‌تواند با اشغال حافظه‌ای در حد معقول و زمان پردازش آنها حتی برای گرافهایی با میلیونها گره محاسبه شود. چهار مورد از این اندازه‌ها عبارتند از:

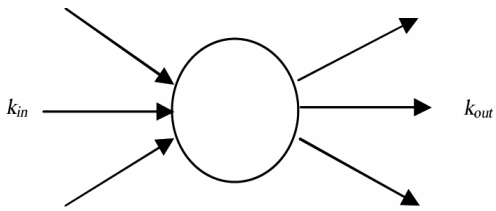
۱- توزیع درجه*: تنها به وسیله تعداد لینک‌های متصل شده به هر گره تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

۲- ضریب خوشه‌بندی*: با توجه به اولین همسایگی یک گره و نحوه اتصال آنها حاصل می‌شود.

۳- طول کوتاهترین مسیر*: کوتاهترین طول مسیر متصل‌کننده بین دو گره در یک شبکه را جستجو می‌کند.

۴- درجه بینابینی (درجه مرکزیت)*: درصد کوتاهترین مسیر طی شده از گره‌ای مشخص را محاسبه می‌کند.

در یک شبکه مشخص، تعداد کل اتصالات یک گره درجه k آن نامیده می‌شود. در یک شبکه هدایت شده، در هر گره n، نیاز است درجه ورودی k_{in} و درجه خروجی k_{out} مشخص شود. بنابراین $k = k_{in} + k_{out}$، شکل (۶).



شکل (۶): درجه یک گره در یک شبکه هدایت شده.

اگر در گرافی هر گره دارای درجه یکسان باشد، گراف منظم نامیده می‌شود. این درجه بهترین پارامتر برای استفاده است زیرا توزیع آن به راحتی ساختار یک شبکه را مشخص می‌نماید. برای هر گره می‌توان توزیع درجه $p_x(k)$ را محاسبه نمود که بیانگر این احتمال است که گره x دارای k اتصال باشد. توزیع درجه کلی می‌تواند به طور ساده با شروع از توزیع درجه از هر گره محاسبه شود.

$$P(k) = \frac{1}{N}\sum_{x=1}^{N} p_x(k) \qquad (۷)$$

که $P(k)$ درصد گره‌های موجود با درجه k را بیان می‌کند. حتی اگر درجه یک ویژگی محلی (موضعی) گره باشد، با این وجود توزیع $P(k)$ اطلاعات اساسی درباره ساختار کلی شبکه را تهیه می‌کند.

ضریب خوشه‌بندی C_i یک اندازه مرتبط با تک گره i است و این ضریب یک اندازه محلی می‌باشد. اگر گره i دارای درجه k_i باشد، زیرگراف G_i دارای k_i گره و حداکثر دارای $k_i(k_i-1)/2$ لینک می‌باشد. ضریب خوشه‌بندی C_i تعداد لینک‌هایی که واقعاً وجود دارد در زیرگراف G_i بر حسب همه لینک‌های ممکن اندازه‌گیری می‌کند. بنابراین این ضریب به عنوان عدد مثبت بین صفر و ۱ تعریف می‌شود. یک مقدار C_i نزدیک به مقدار ۱، به این منظور است که همه همسایه‌های i متصل به یکدیگر هستند. ضریب خوشه‌بندی C، متوسط مقدار C_i مربوط به همه گره‌هاست.

با دو گره مشخص i و j، d_{ij} کوتاهترین مسیر بین دو گره را نشان می‌دهد؛ به عبارتی نشان دهنده تعداد کمینه لینک‌ها است که باید برای رسیدن از j به i طی کند. این توزیع کوتاهترین طول مسیر بین زوج گره‌های یک شبکه و متوسط طول کوتاهترین مسیر L از یک شبکه قابل معرفی می‌باشد. اغلب L نشان دهنده قطر یا طول مشخصه از یک شبکه است. اگر در یک شبکه همه N گره متصل به $N-1$ گره باقیمانده باشند؛ مطمئناً $L=1$ (یعنی طول کوتاه‌ترین مسیر برابر با یک لینک می‌باشد)، تعداد کل لینک‌ها برابر با $N(N-1)/2$ و درجه ثابت و معادل با $k=(N-1)/2$ است.

در شبکه‌های پیچیده بزرگ، همه گره‌ها مساوی نیستند و اثر حذف آنها بر روی ویژگیهای پیوستگی شبکه اهمیت دارد. اهمیت گره‌ها در یک شبکه بسیار جالب و مهم است؛ چون می‌تواند در مقاومت و امنیت شبکه مهم باشد. اندازه‌های مختلفی به منظور کیفیت دادن به مفهوم اهمیت و مرکزیت یک گره پیشنهاد شده است. شاید بتوان گفت که درجه پیوستگی گزینه‌ای مناسب به عنوان میزان مرکزیت است. اما ممکن است یک گره با درجه خیلی پایین بتواند به وسیله همه مسیرهایی که دو زیرگراف را متصل می‌کند، طی شود. به این دلیل که پیوستگی یک کمیت محلی است و در خصوص اهمیت گره در شبکه هیچ اطلاعاتی نمی‌دهد.

یک اندازه خوب از مرکزیت گره باید اطلاعات کلی‌تری از نقش خود در وجود مسیرهای بین دو گره مشخص در شبکه را لحاظ کند. این اندازه، درجه بینابینی (درجه مرکزیت) نامیده می‌شود و به عنوان جزئی از کوتاهترین مسیر که از گره‌ای مشخص می‌گذرد تعریف می‌شود. بنابراین:

$$B(i) = \sum_{s \neq i \neq t} \frac{\sigma_{st}(i)}{\sigma_{st}} \qquad (۸)$$

که i یک گره عمومی، σ_{st} تعداد کوتاهترین مسیرها از گره s به گره t و $\sigma_{st}(i)$ تعداد کوتاهترین مسیرها از گره s به گره t با شرط عبور از گره i، می‌باشد. مقادیر بالای درجه مرکزیت بیانگر اینست که گرهی می‌تواند به دیگر گره‌ها از روی کوتاهترین مسیرها برسد و یا این که این گره بر روی کوتاهترین مسیرهای زیادی قرار دارد. اگر یگ گره با مرکزیت بالا حذف شود، بسیاری از مسیرهای بین جفت گره‌ها افزایش طول یافته یا باعث ناپیوستگی در شبکه می‌گردد.

۳-۵-۱- شبکه تصادفی

گراف تصادفی (یا RG) متشکل از N گره که با n لینک به هم متصل شده‌اند، طوری بیان می‌شوند که به صورت تصادفی از $N(N-1)/2$ لینک ممکن انتخاب می‌گردند [۱، ۱۵، ۱۶]. به طور کلی $\binom{n}{N(N-1)/2}$ گرافهای متفاوت با N گره و n لینک وجود دارد. راه جایگزینی به منظور به دست آوردن یک RG، شروع با N گره می‌باشد و هر جفت گره را با احتمال p متصل می‌کند. تعداد کل لینک‌ها یک متغیر تصادفی با مقدار انتظار $E(n) = p.\frac{N(N-1)}{2}$ است. در شبکه‌های RG، توزیع درجه $P(k)$ از توزیع پواسونی پیروی می‌کند.

$$P(k) \approx e^{-pN}\frac{(pN)^k}{k!} = e^{-<k>}\frac{<k>^k}{k!} \qquad (۹)$$

درجه شبکه با مقدار متوسط $<k>$ و یک انحراف معیار مشخص، معلوم می‌شود. لازم به ذکر است که $\approx$ به معنی تقریباً می‌باشد.

۳-۵-۲- شبکه مقیاس آزاد

در شبکه مقیاس آزاد، توزیع درجه $P(k)$ از قانون توانی تبعیت می‌نماید [۱، ۱۷]:

$$P(k) \sim k^{-\gamma} \qquad (۱۰)$$

که γ یک ثابت حقیقی مثبت و $\sim$ به معنی وجود تناسب می‌باشد. شبکه‌های SF وقتی گره‌ها خیلی نامساوی هستند، مناسب است. شبکه‌های SF نتیجه حضور همزمان تعداد کمی از گره‌ها با اتصال زیاد که به تعداد زیادی از گره‌ها با اتصال کم پیوند شده، می‌باشد.

شبکه RG می‌تواند به عنوان نتیجه‌ای از فرآیندهای رشد بدون نظارت فرض شود. همچنین در جایی که گره‌های جدید به طور تصادفی به گره‌های موجود می‌چسبند، می‌تواند به وسیله یک مکانسیم رشد تولید شود. از طرف دیگر، شبکه SF تحت عمل تعدادی انتخاب رشد کرده که تعیین می‌کند به احتمال زیاد یک گره جدید به گره موجود با پیوستگی بالا می‌چسبد. این مدل رشد، که به عنوان چسبیدن ترجیحی شناخته می‌شود، به وسیله فرض احتمال $P_i(n+1)$ از $(n+1)$ امین گره توسعه یافته چسبیده به گره i که به طور خطی با درجه i افزایش می‌یابد، محقق می‌شود. درجات بالاتر علاقه احتمال چسبیدن بالاتری را دارند. $P_i(n+1)$ از قانون زیر تبعیت می‌کند:

$$P_i(n+1) \sim \frac{k_i}{\sum_{j=1}^{n} k_j} \qquad (۱۱)$$

برای موردی که مطالعات اعتمادپذیری بر روی شبکه‌ها اهمیت دارد، مناسب‌ترین بحث ساختار شبکه است که بر روی اعتمادپذیری تأثیر می‌گذارد. شبکه‌های SF نسبت به حذف تصادفی گره و یا لینک قویتر از شبکه‌های RG هستند؛ اما هنگامی که گره‌ها با بالاترین درجات ابتدا حذف می‌شوند بیشتر در معرض آسیب می‌باشند.

۳-۵-۳- تحلیل شبکه پیچیده

قابلیت اعتماد و اطمینان سیستم در شبکه‌ها بحث بسیار مهمی در تحلیل آن‌ها است، زیرا یکی از ویژگی‌های اصلی شبکه‌ها این است که معمولاً افزونگی مسیرها بین هر دو جفت گره متصل وجود دارد. به منظور مطالعه قابلیت اطمینان، احتمال این که المان‌های شبکه به طور درست در حال کار هستند باید به عنوان پارامتر ورودی

شناخته شوند. فرض می‌شود لینک‌ها می‌توانند به صورت دودویی مدل شوند در این صورت شکست یک اختلال کامل لینک را بیان کرده و سرویس قابلیت حمل جریان را برهم می‌زند. در یک شبکه احتمالاتی با دو گره مشخص s (نقطه مرجع) و t (نقطه مقصد)، اعتمادپذیری مسیر جریان $s-t$ به عنوان احتمال این که دو گره به وسیله حداقل یک مسیر در حال کار متصل هستند، تعریف می‌شود. برای شبکه‌های کوچک یک تحلیل جامع ممکن است همه مسیرهای ممکن بین s و t را جستجو کند و به طور دقیق و تحلیلی احتمال این که حداقل یک مسیر کارا باشد، محاسبه شود.

اگر ابعاد شبکه از ظرفیت الگوریتم دقیق فراتر رود، راه‌حل ممکن رجوع به شبیه‌سازی است [۱، ۱۸]. شبیه‌سازی ابزار مهم تحقیقاتی برای شبکه‌های پیچیده به شمار می‌رود. روش مونته کارلو برای پیش‌بینی اعتمادپذیری در زمانی که پیچیدگی سیستم، فرمولاسیون مدل‌های دقیق را غیرممکن می‌سازد، مفید است.

به خاطر اینکه اعتمادپذیری هر مؤلفه بر اساس توزیع احتمالاتی است، این اعتمادپذیری در سیستم، به وسیله مجموعه‌ای از اعداد تصادفی می‌تواند مدل شود. با تولید اعداد تصادفی، شبیه‌سازی حالت هر مؤلفه ممکن می‌شود. سپس این حالات مؤلفه می‌تواند با استفاده از تابع ساختار برای تعیین کردن حالت سیستم ترکیب شوند. الگوریتم می‌تواند برای محاسبه نقطه به نقطه اعتمادپذیری بر حسب شبیه‌سازی به صورت مراحل زیر تجزیه شود:

۱- داده‌های شبکه احتمالاتی یعنی $G=(V,E,P)$ و مشخص کردن یک گره مرجع s و یک گره تقاضا t؛

۲- تعریف یک شمارنده کلی از تعداد اجراها v_g و یک شمارنده برای اجرایی که نتیجه دلخواه v_f تهیه می‌کند؛

۳- برای هر اجرا و برای هر لینک i از گراف، یک عدد تصادفی r بین صفر و ۱ استخراج و این عدد با احتمال p_i مقایسه شود. اگر $r \le p_i$، لینک i به صورت up در غیر این صورت $down$ فرض می‌شود.

۴- در حالی که این تخصیص کامل می‌شود، اگر s و t متصل باشند به وسیله لینک‌های up باقیمانده تأیید و یک واحد شمارنده v_f افزایش داده می‌شود.

۵- یک واحد شمارنده v_g افزایش داده می‌شود.

الف) اعتمادپذیری به عنوان تابعی از تعداد اجرا v_g به وسیله تخمین زننده $R_{v_g}=v_f/v_g$ ارزیابی می‌شود.

ب) خطای تخمین به عنوان تابعی از مقدار فعلی v_g و R_{v_g} محاسبه می‌شود.

۶- یک اجرای جدید با تکرار از گام ۳ شروع می‌شود. برای پایان فرآیند، معیاری بر اساس تعداد کلی آزمایشات یا بر اساس تخمین خطا پذیرفته می‌شود.

ارزیابی دقت و صحت تخمین‌ها دارای اهمیت بسیار زیادی است. فرض می‌شود مقدار دقیق (نامعلوم) اعتمادپذیری (نامعلوم) R باشد که از شبیه‌سازی تخمینی برابر با R_{v_g} (گام ۵- الف) برای اعتمادپذیری حاصل می‌شود. البته تا زمانی که اعداد تصادفی باشد، R_{v_g} نیز یک متغیر تصادفی می‌باشد. اگر هیچ ایده‌ای برای نزدیکی مقدار R_{v_g} به R نباشد، به دست آوردن مقدار مشخص برای R_{v_g} دارای اهمیت نیست.

اندازه احتمالاتی از فاصله بین R_{v_g} و R از رابطه زیر نتیجه‌گیری می‌شود:

$$P(|R-R_{v_g}|<\sigma)\ge\alpha, 0\le\alpha\le 1 \qquad (۱۲)$$

بازه $(R_{v_g}-\sigma, R_{v_g}+\sigma)$، بازه اطمینان برای R نامیده می‌شود و احتمال α سطح اطمینان است.

با فرض اینکه هر پردازش شبیه‌سازی یک تخمین مستقل R_{v_g} را تهیه می‌کند، می‌توان مقدار متوسط اعتمادپذیری و مقدار واریانس را به صورت رابطه (۱۳) محاسبه کرد:

$$p=R_{v_g}=\frac{v_f}{v_g};\qquad \sigma_{R_{v_g}}=\sqrt{\frac{p(1-p)}{v_g}}=\sqrt{\frac{R_{v_g}(1-R_{v_g})}{v_g}} \qquad (۱۳)$$

بنابراین، با فرض یک تخمین نرمال برای n بزرگ، رابطه به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$R=R_{v_g}\pm z_{\alpha/2}\sqrt{\frac{R_{v_g}(1-R_{v_g})}{v_g}} \qquad (۱۴)$$

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ضمن معرفی سیستم‌ها، دیاگرام‌های تصمیم دودویی، شبکه‌های وزنی احتمالاتی، شبکه‌های چندحالته وزنی احتمالاتی و شبکه‌های پیچیده مورد بررسی قرار گرفت. اهم نتایج حاصل از این تحقیق در بررسی روشهای مختلف تحلیل اعتمادپذیری عبارتند از:

۱- در دیاگرام‌های تصمیم دو دودیی ترتیب متغیرها دارای اهمیت است. در صورتی که شبکه دارای ابعاد بزرگی باشد، انتخاب ترتیب متغیرها امری دشوار است.

۲- در تحلیل شبکه چندحالته وزنی احتمالاتی علاوه بر تخصیص وزن به گره و لینک می‌توان حالات دیگری را به مؤلفه‌ها غیر از دو حالت دایر و غیردایر نسبت داد.

۳- با توجه به گستردگی شبکه‌ها باید از روشهایی استفاده کرد که ضمن دقت کافی، هزینه محاسباتی را نیز کاهش دهد. در این میان می‌توان به دو روش موسوم به گراف تصادفی و آزاد مقیاس اشاره نمود.

۴- به شرط آن که در ابتدا گره‌ها با بالاترین درجات حذف نگردند، شبکه‌های آزاد مقیاس نسبت به حذف تصادفی گره و یا لینک عملکرد بهتری را نسبت به شبکه‌های تصادفی دارا هستند.

۵- مراجع

1. Terrugia, R. (2010). Reliability analysis of probabilistic networks, Ph.D. Thesis, Torino University.
2. Agrawal, A. and Barlow, R.E. (1984). A survey of network reliability and domination theory, *Operations Research*, **32**(3), 478-492.

۳. بسطامی، مرتضی؛ پارسی‌زاده، فرخ؛ تاتار، محمد؛ داوودی، محمد و یمینی‌فرد، فرزام (۱۳۹۲). گزارش مقدماتی زلزله ۶/۳ ریشتری ۹۲/۱/۲۰ شهرستان دشتی استان بوشهر دی ماه ۱۳۸۲، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

4. Bastami, M. (2007). Seismic reliability of power supply system based on probabilistic approach, Ph.D. Thesis, Kobe University, Japan.
5. Panoussis, G. (1974). Seismic reliability of life-line networks, SDDA, Report No. 15, MIT, Dept. Civil Eng. Report, R74-57, Cambridge, USA.
6. Shinuzuka, M. Takadaand, S., and Kawakami, H. (1977). Risk analysis of underground lifeline systems, U.S. Southeast Asia Symposium on Engineering for Natural Hazards Protection, Manila, Philippines.
7. Grigoriu, M. (1985). Reliability analysis of underground lifeline, *Proceedings of the 4th ICASP in Soil and Structural Engineering*, University of Florence, Italy, Pitagora Editrice.
8. O'Rourke, T.D., Grigoriu, M.D., and Khater, M.M. (1985). Seismic response of buried pipes, pressure vessel and piping technology - a decade of progress, Sundararajan, C., Ed., *American Society of Mechanical Engineers*, New York, NY, 281-323.
9. Noda, S., Yamada, Y., Iemura, H. and Ogasawara, Y. (1981). A decomposition method for lifeline risk analysis, *Proceedings of the ASCE Specialty Conference on Lifeline Earthquake Engineering*, Oakland, California.
10. Shinozuka, M. (2006). Resilience of electric power systems, *Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, USA.
11. Khater, M.M., Grigoriu, M.D., and O'Rourke, T.D. (1989). Serviceability measures and sensitivity factors for estimating seismic performance of water supply systems, *Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, Japan, **VII**, 123-128.
12. Rauzy, A. (1996). A brief introduction to binary decision diagrams, *Journal Europ´een des Syst`emes Automatis´es (RAIRO-APII-JESA)*, **30**(8), 1033-1051.
13. Bobbio, A. and Terruggia, R. (2009). Reliability and quality of service in weighted probabilistic networks using algebraic decision diagrams. In Proceedings IEEE-RAMS, Volume Reliability and Maintainability Symposium, RAMS 2009, Annual, 19-24.

14. Erd¨os, P. and R´enyi, A. (1959). On random graphs, **I**, Publicationes Mathematicae.

15. Newman, M.E. (2003). The structure and function of complex networks, *SIAMReview*, **45**, 167-256.

16. Newman, M.E. (2005). Power laws, Pareto distributions and Zipfs laws, *Contemporary Physics*, **46**, 323-351.

17. Crucitti, P., Latora, V., Marchiori, M., and Rapisarda, A. (2003). Efficiency of scale free networks: error and attack tolerance, *Physica A*, **320**, 622-642.

18. Ciardo, G., Luttgen, G., and Miner, A.S. (2007). Exploiting interleaving semantics in symbolic state-space generation, *Formal Methods in System Design*, **31**, 63-100.

۶- واژگان تخصصی

سطح ارتباطی:	Interconnectivity
سیستم‌های سری در شبکه‌های موازی:	Series system in parallel network (SSP)
توابع بولی:	Boolean function
شمارش کامل حالات:	Complete state enumeration
کمینه مسیر و کمینه بریدگی:	Minpaths and Mincuts
روش فاکتورگیری:	Factoring method
روش دربرداری- حذف:	The Inclusion-Exclusion Method
دیاگرام‌های تصمیم دودویی:	Binary decision diagram (BDD)
ترتیب تجزیه:	Sequence of decompositions
دودویی:	Binary
شبکه‌های گراف تصادفی:	Random Graph (RG) networks
شبکه‌های آزاد مقیاس:	Scale Free (SF) networks
توزیع درجه:	Degree distribution
ضریب خوشه‌بندی:	Clustering coefficient
طول کوتاهترین مسیر:	Length of the shortest path
مرکزیت بینابین:	Betweenness centrality
شبکه‌های چندحالته وزنی احتمالاتی:	Multi-state systems (MSS)