

ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های چندوضعیتی تعمیرپذیر با در نظر گرفتن خرابی‌های وابسته به وسیله‌ی درخت خرابی پویا و شبکه‌های بیزی پویا

سید محمد مرتضوی* (کارشناسی ارشد)
گروه مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد
مهدی کرباسیان (دانشیار)
دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، تابستان ۱۳۹۸ (۱۳۹۸)
دربی ۱-۳۵، شماره ۱/۱، ص. ۱۰۳-۹۱

در مبحث قابلیت اطمینان انواع خرابی‌های وابسته وجود دارند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به علت مشترک خرابی و خرابی آبشاری اشاره کرد. در مطالعات متعددی علت مشترک خرابی بررسی شده است؛ در حالی که خرابی آبشاری نیز شدیداً قابلیت اطمینان سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به طوری که در برخی از سیستم‌ها کارکرد معیوب یک جزء باعث گسترش خرابی در دیگر اجزا می‌شود و برعکس. در این مقاله یک روش جدید به وسیله‌ی شبکه‌های بیزی پویا برای در نظر گرفتن خرابی آبشاری در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها با اجزای چندوضعیتی تعمیرپذیر معرفی می‌شود. به این منظور با اضافه کردن یک عملگر جدید به درخت خرابی پویا (عملگر آبشاری) و تبدیل آن به شبکه‌ی بیزی پویا تأثیر خرابی آبشاری در سیستم‌های چند وضعیت‌ی بررسی شده است. در پایان مطالعه‌ی موردی درباره‌ی سیستم پمپاژ آب فشار قوی ارائه می‌شود.

واژگان کلیدی: علت مشترک خرابی، خرابی آبشاری، چند وضعیت‌ی، درخت خرابی پویا، شبکه‌ی بیزی پویا.

seyedmohammadmortazavi@gmail.com
mkarbasi@mut-es.ac.ir

۱. مقدمه

ارزیابی قابلیت اطمینان به نوعی پیش‌بینی قابلیت اطمینان در زمان‌های آتی کارکرد سیستم است. این مشخصه در مراحل طراحی سیستم‌ها، اجرا و نصب، نگهداری - تعمیرات و ... می‌تواند مفید باشد و به طراحان سیستم کمک کند. از این رو ارزیابی دقیق آن همواره مورد توجه بوده است. منظور از ارزیابی دقیق قابلیت اطمینان این است که شرایط واقعی عملکرد سیستم در مدل‌های نظریه‌ی قابلیت اطمینان در نظر گرفته شوند تا نتایج به دست آمده از ارزیابی با شرایط واقعی سیستم همخوانی داشته باشند.^[۱] با پیچیده‌تر شدن سیستم‌ها اجزا به همدیگر وابسته می‌شوند؛ بدین معنی که خرابی آن‌ها بر یکدیگر تأثیر می‌گذارد (خرابی وابسته). در قابلیت اطمینان انواع خرابی‌های وابسته وجود دارند که به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان دقیق سیستم‌ها باید مورد توجه قرار گیرند. با توجه به تجاربی که از عملکرد سیستم‌های مختلف در صنایع مختلف وجود دارد، این خرابی‌های وابسته دسته‌بندی شده‌اند و برای در نظر گرفتن هر کدام از آن‌ها در ارزیابی قابلیت

اطمینان روش‌های مختلفی ارائه شده است.^[۲] نتیجه‌ی عدم توجه به خرابی‌های وابسته می‌تواند ارزیابی دقیق قابلیت اطمینان را حاصل نکند. این مسئله منجر به نتایج نادرست از قابلیت اطمینان می‌شود و در صورتی که این نتایج نادرست توسط مهندسان طراح سیستم مورد استفاده قرار گیرد، بدون شک طراحی سیستم با اشکالات عمده روبه رو خواهد شد. از طرف دیگر در صورتی که این نتایج نادقیق از ارزیابی قابلیت اطمینان، برای نگهداری - تعمیرات سیستم‌ها نیز استفاده شوند می‌توانند صدمات جدی را به سیستم‌ها وارد کنند. هر چه شرایط و مشخصه‌های مختلف سیستم‌ها در مدل‌های نظریه‌ی قابلیت اطمینان در نظر گرفته شوند، ارزیابی دقیق‌تری از قابلیت اطمینان حاصل می‌شود و نتایج حاصل از ارزیابی قابل اعتمادتر هستند.

۲. اهمیت و ضرورت پژوهش

یکی از مهم‌ترین انواع خرابی‌های وابسته علت مشترک خرابی^۱ است و در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در ۲۲ مارس ۱۹۷۵ میلادی پس از حادثه‌ی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۳/۹، اصلاحیه ۱۳۹۶/۷/۲۳، پذیرش ۱۳۹۶/۸/۱۷

DOI:10.24200/J65.2019.7176.1736

درجه‌ی وابستگی میان اجزاست. تلاش‌هایی برای توسعه‌ی روش ریشه‌ی دوم انجام شده است و این روش هنوز البته به ندرت مورد استفاده قرار می‌گیرد.^[۷] این روش یک روش ابتدایی است و توسط ادوارد^۴ و واتسون^۵ و هریس^[۹] توسعه داده شده است.

یکی دیگر از روش‌های در نظر گرفتن علت مشترک خرابی در ارزیابی قابلیت اطمینان مدل بتا فاکتور است. این مدل در سال ۱۹۷۴ میلادی توسط فلمینگ^۷ معرفی شد^[۱۰] و امروزه رایج‌ترین مدل مورد استفاده برای علت مشترک خرابی است. در این روش یک سیستم افزونه با n جزء یکسان و نرخ خرابی ثابت λ فرض می‌شود. خرابی به صورت ۲ نوع متفاوت می‌تواند در این اجزا اتفاق بیفتد: (۱) خرابی فقط وابسته به یک جزء باشد (خرابی مستقل)؛ (۲) خرابی در اثر رخداد های خارجی اتفاق بیافتد و همه‌ی اجزای سیستم به صورت هم‌زمان خراب شوند (علت مشترک خرابی). مدل C فاکتور توسط ایوانز^۸ و همکاران معرفی شد^[۱۱] و به طور کلی شبیه به مدل بتا فاکتور است. در این روش نرخ رخداد علت مشترک خرابی بخشی از نرخ خرابی مستقل فرض شده است.

در روش بتا فاکتور و C فاکتور یک فرض اساسی وجود دارد که با رخداد علت مشترک خرابی همه‌ی اجزای سیستم به صورت هم‌زمان خراب می‌شوند؛ اما این امکان وجود دارد که بعد از رخداد علت مشترک خرابی همه‌ی اجزای سیستم به صورت هم‌زمان دچار خرابی نشوند و فقط تعدادی از آن‌ها خراب شوند. به عبارت دیگر بعد از رخداد علت مشترک خرابی k جزء از n جزء یک سیستم افزونه نیز می‌توانند دچار شکست شوند. بکمن^[۱۲] به این نکته اذعان دارد که حساسیت رخداد علت مشترک خرابی در یک سیستم افزونه با ۳ جزء، خیلی بیشتر از حساسیت یک سیستم افزونه با ۲ جزء است. او هیچ توضیح رسمی و منطقی برای ادعای خود ندارد اما اطلاعات جمع‌آوری شده از خرابی‌های وابسته در صنایع مختلف گفته‌ی او را تأیید می‌کند. مدل بتا فاکتور چندگانه برای بهبود و توسعه‌ی مدل بتا فاکتور مطرح شده است.^[۱۳] در این روش که برای سیستم‌های افزونه با بیشتر از ۲ جزء مناسب است، ساختار سیستم به صورت k از n در نظر گرفته شده است (koon). این مدل بر دو فرض اصلی استوار است: (۱) احتمال خرابی تمام اجزا یکسان و ثابت در نظر گرفته شده است (مستقل از زمان است)؛ (۲) خراب شدن z جزء در سیستم افزونه هیچ تأثیری در خرابی $n - z$ جزء باقی‌مانده ندارد.

یکی دیگر از مهم‌ترین و رایج‌ترین مدل‌های کاربردی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های افزونه با بیشتر از ۲ جزء و علت مشترک خرابی، مدل آلفا فاکتور است.^[۱۴] این مدل به منظور در نظر گرفتن علت مشترک خرابی در سیستم افزونه‌ی k از n توسط پروفیسور علی مصلح^{۱۰} در سال ۱۹۹۸ ارائه داده شد. در این مدل فرض شده است که اجزای یکسان در سیستم به صورت موازی از هم قرار گرفته‌اند و علت مشترک خرابی به صورت دوتایی یا سه‌تایی یا بیشتر آنها را دچار خرابی می‌کند. دلیل اهمیت این مدل، کاربردی‌تر بودن آن نسبت به سایر مدل‌هاست.

در مطالعات انجام شده^[۱۵] یک مدل ابتکاری و کاربردی برای ساده‌سازی روش آلفا فاکتور ارائه شده است که ابتدا درخت خرابی روش آلفا فاکتور ترسیم و سپس کلیه‌ی پارامترهای روش آلفا فاکتور در یک پارامتر تعریف می‌شود و آنالیز خرابی سیستم به وسیله‌ی درخت خرابی پیشنهاد می‌شود. مدل MGL^[۱۶] نیز بعد از مدل آلفا فاکتور، یک مدل کاربردی به منظور در نظر گرفتن علت مشترک خرابی در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌هاست. تخمین پارامترهای این مدل نسبت به مدل آلفا فاکتور دشوارتر است و به اطلاعات دقیق‌تری نیاز دارد ولی با این حال این مدل در برخی از مطالعات مورد توجه قرار گرفته و توسعه داده شده است. در مرجع^[۱۷] با استفاده از مدل MGL و توسعه دادن این مدل، یک مدل ریاضی برای علت

آتش‌سوزی در نیروگاه هسته‌ی ایالت آلاباما در آمریکا، به علت مشترک خرابی توجه ویژه شد.^[۳] در این حادثه خطای انسانی باعث آتش‌سوزی در این نیروگاه هسته‌ی شد؛ به طوری که نقص فنی در یکی از راکتورها کاربر این راکتور را بر آن داشت که به بازرسی این راکتور پردازد. این کاربر برای بررسی و بازرسی از نور یک شمع استفاده کرد. راکتورهای هسته‌ی دارای فشار کمتری نسبت به محیط عادی هستند (فشار منفی) همین عامل باعث شد تا آتش شمع به سمت راکتور هسته‌ی کشیده شود و گاز متان داخل راکتور دچار حریق شود. در طی این حریق تمام کابل‌های تجهیزات ایمنی و کابل‌های مربوط به ولوهای آب که از یک مکان مشترک عبور می‌کردند، دچار حریق شدند. آتش‌سوزی عامل اصلی خرابی و مکان مشترک کابل‌ها به عنوان عامل اشتراک^۲ هر دو، مشخصه‌ی علت مشترک خرابی را ایجاد کردند و این عامل باعث شد که تمام سیستم اطفای حریق نیروگاه دچار مشکل شود و در شرایط بحران عمل نکند. این حادثه توجه طراحان سیستم را به خود جلب کرد و از آن به بعد مدل‌های مختلفی برای در نظر گرفتن علت مشترک خرابی در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها ارائه شد.

در اکثر روش‌های برآورد قابلیت اطمینان فرض بر این است که خرابی اجزا به صورت مستقل اتفاق می‌افتد، در حالی که در اکثر موارد خرابی اجزا بر روی همدیگر تأثیر می‌گذارد و باعث افزایش نرخ خرابی دیگر اجزا می‌شود. در برخی موارد نیز یک عامل خارجی مانند خطای انسانی یا جزء خارجی باعث می‌شود تا سیستم‌ها و اجزای آن‌ها به سرعت دچار خرابی شوند. همان‌طور که پیش‌تر به آن اشاره شد، اگر تأثیر خرابی‌های وابسته در برآورد و ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها در نظر گرفته نشود، قابلیت اطمینان به طور دقیق برآورد نمی‌شود و می‌تواند باعث ایجاد خسارت و خطا در طراحی سیستم‌ها شود. خرابی‌های وابسته انواع مختلف دارند که ضمن شناسایی آن‌ها در سیستم، باید از مدل‌های مختلف به جهت در نظر گرفتن آن‌ها در ارزیابی قابلیت اطمینان بهره جست. از جمله فراوان‌ترین خرابی‌های وابسته می‌توان به خرابی آبشاری^۳ و علت مشترک خرابی اشاره کرد. خرابی آبشاری که در سیستم‌های سری و موازی ایجاد می‌شود، به شدت قابلیت اطمینان سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ در این نوع از خرابی، خرابی یک جزء خرابی را در دیگر اجزا نیز گسترش می‌دهد. علت مشترک خرابی در سیستم‌های افزونه اتفاق می‌افتد. در این نوع از خرابی وابسته، بیش از دو جزء در سیستم به صورت هم‌زمان یا در یک بازه‌ی زمانی کوتاه دچار خرابی می‌شوند.^[۵] در صورتی که بتوان احتمال رخداد هر کدام از این خرابی‌های وابسته را در سیستم کاهش داد، قابلیت اطمینان سیستم به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد.

۳. پیشینه‌ی مطالعات در باره‌ی علت مشترک خرابی

یکی از ساده‌ترین و ابتدایی‌ترین مدل‌ها برای در نظر گرفتن علت مشترک خرابی در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها مدل ریشه‌ی دوم است که برای ارزیابی ایمنی راکتورها در صنایع هسته‌ی استفاده می‌شود.^[۶] این روش یک روش پایه‌ی اصلی است که در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های افزونه کاربرد دارد. در این روش از میانگین هندسی به منظور یکپارچه‌سازی خرابی مستقل و علت مشترک خرابی استفاده شده است. هیچ پایه و اساسی مبنی بر نظریه‌ی مناسب برای انتخاب میانگین هندسی در این روش ذکر نشده است. نقطه‌ی ضعف دیگر این روش عدم توجه به

از سیستم‌های افزونه‌ی مکانیکی و الکترونیکی اشتراک بار وجود دارد. برخی از این سیستم‌ها عبارت‌اند از ریزپردازنده‌ها، مولدهای الکتریکی، پل‌های کابلی، والوها، پمپ‌های آب، پمپ‌های هیدرولیکی و ...

مدل‌های اشتراک بار طیف‌گسترده‌یی از فعالیت‌های مهندسی را شامل می‌شوند. کاربرد وسیع این مدل‌ها در صنایع نساجی نمونه‌یی از کاربرد آنهاست. در سال ۱۹۴۵ میلادی دنیل^[۲۲] یک مدل اشتراک بار را برای بررسی فشارهای وارده به دسته‌یی از الیاف استفاده کرد. او دسته‌ی الیاف را به صورت یک سیستم موازی فرض کرد و فشارهای وارده بر الیاف را در صورتی که تعدادی از الیاف دچار پارگی شوند، بررسی کرد. در پل‌های کابلی، کابل‌ها به صورت موازی از همدیگر قرار دارند. در صورتی که یکی از کابل‌ها دچار آسیب شود فشار بر روی دیگر کابل‌ها افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر احتمال پارگی آن‌ها افزایش می‌یابد. برای ارزیابی قابلیت اطمینان پل‌های کابلی از مدل‌های اشتراک بار استفاده می‌شود.^[۲۳] دیگر مدل‌های کاربرد برای اشتراک بار در زمینه‌های قابلیت اطمینان نرم‌افزار،^[۲۴] بررسی انتشار ویروس HIV،^[۲۵] و نگهداری - تعمیرات^[۲۶] توسعه داده شده است.

مدل ظرفیت جریان ساده‌ترین مدل خرابی آشنایی در سیستم‌های افزونه است.^[۲۷] در این مدل یک سیستم افزونه با n جزء یکسان در نظر گرفته شده است که فشار L به صورت مساوی بر روی همه‌ی اجزای عملیاتی تقسیم می‌شود. مدل ظرفیت جریان توسعه‌یافته توسط ینگهای^[۲۱] و جینگ^[۲۲] ارائه شد^[۲۸] و برای سیستم‌های افزونه با اجزای غیریکسان کاربرد دارد. استفاده از این مدل بر اساس سه فرضیه ممکن است: این مدل برای سیستم‌های k از n با اجزای غیریکسان مناسب است که دارای توزیع طول عمر نامی هستند؛^[۲] هر جزء می‌تواند خراب یا سالم باشد (سیستم دو حالتی یا دودویی).^[۳] اجزا تعمیرپذیر نیستند و قابلیت نگهداری - تعمیرات ندارند. اجزا یک بار دچار خرابی می‌شوند و بلافاصله این خرابی شناسایی می‌شود و جزء خراب به سرعت از سیستم خارج می‌شود.

در^[۲۹] یک سیستم افزونه‌ی ۱ از ۲ در نظر گرفته شده است. ۲ جزء A و B با نرخ خرابی‌های α و β در این سیستم افزونه وجود دارند. زمانی که یکی از آن‌ها دچار خرابی می‌شود، نرخ خرابی جزء دیگر افزایش می‌یابد و می‌تواند α' و یا β' باشد. در این مطالعه از ترکیب تابع چگالی اجزا یک تابع چگالی دو متغیره به وجود می‌آید و تابع تجمعی توزیع آن به دست می‌آید. این تابع تجمعی با نام مدل فرند شناخته می‌شود.

توزیع‌های چندمتغیره‌ی نامی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها به کار می‌روند و همیشه مورد توجه آماداران قرار داشته‌اند. اما می‌توان گفت به دلیل غیرکاربردی بودن این توزیع‌ها و محاسبات پیچیده‌ی آماری، در سال‌های اخیر کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. لین^[۲۳] و همکاران^[۳۰] در مطالعه‌ی خود از توزیع نامی چندمتغیره به منظور ارائه‌ی یک مدل جدید برای اشتراک بار بهره گرفته‌اند. فرض بر این است که طول عمر اجزای دارای توزیع نامی است؛ در برخی موارد این فرض نادرست است. در اجزای مکانیکی نرخ خرابی می‌تواند به صورت افزایشی باشد و با گذر زمان تغییر کند. پزنگای^[۲۴] و همکاران^[۲۷] با به کارگیری روش شبیه‌سازی قابلیت اطمینان یک سیستم افزونه را با توزیع طول عمر وایبال به دست آوردند. آن‌ها در این مطالعه اشتراک بار بین اجزاء را نیز در نظر گرفته‌اند. در^[۳۱] یک مدل ریاضی برای ارزیابی قابلیت اطمینان و میانگین زمان خرابی برای یک سیستم k از n با اشتراک بار ارائه شده است. این مدل ریاضی برای سیستم‌های افزونه‌ی k از n با اجزای یکسان و غیریکسان توسعه داده شده است. همان‌طور که گفته شد در صورتی که یک جزء در سیستم افزونه دچار خرابی شود، فشار بر روی دیگر اجزا افزایش می‌یابد. این افزایش فشار باعث می‌شود تا طول عمر اجزای باقی‌مانده کاهش یابد و خود به صورت

مشترک خرابی معرفی شده است. در این مقاله ابتدا درخت خرابی برای یک راکتور هسته‌یی ترسیم و سپس پارامترهای خرابی مستقل اجزا و خرابی در اثر علت مشترک به صورت جداگانه در مدل ریاضی تعریف شده است. در اکثر مطالعات انجام شده گروهی از اجزا تحت تأثیر یک علت مشترک دچار خرابی می‌شوند؛ ولی مدل معرفی شده در این مقاله با در نظر گرفتن تأثیر چند علت مشترک خرابی قابلیت اطمینان سیستم را برآورد می‌کند به طوری که اجزای مستعد از چند علت مشترک و خرابی مستقل خود دچار خرابی می‌شوند.

علاوه بر مدل‌های ذکر شده (پتا فاکتور - آلفا فاکتور - MGL) از درخت خرابی، درخت خرابی پویا، شبکه‌های بی‌زی،^[۱۲] زنجیره‌ی مارکوف، شبکه‌ی پتری^[۱۳] یا ترکیب این روش‌ها با همدیگر، برای تخمین قابلیت اطمینان سیستم‌ها با علت مشترک خرابی استفاده می‌شود. در مرجع^[۱۸] با تعریف کردن یک عملگر جدید، علت مشترک خرابی در تحلیل درخت خرابی پویا لحاظ شده است. در این مطالعه علاوه بر عملگر جدید اضافه شده ساختار سلسله مراتبی برای درخت خرابی پویا در نظر گرفته شده است که از رخداد حالت انفجاری^[۱۴] جلوگیری می‌کند.

هوانگ^[۱۵] و همکاران^[۱۸] با استفاده از زنجیره‌ی مارکوف قابلیت اطمینان یک سیستم تعمیرپذیر با دو جزء را محاسبه کرده‌اند؛ به طوری که خرابی اجزا علاوه بر خرابی مستقل شامل علت مشترک خرابی نیز هست. در این مقاله فرض شده است که علت مشترک خرابی به صورت یک شوک به سیستم وارد می‌شود و باعث خرابی هر دو جزء می‌شود و در نهایت میانگین زمان خرابی برای این سیستم با به کارگیری نظریه‌ی فازی (برای در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت) ارزیابی شده است. نیولت^[۱۶] و راسند^[۱۷] ابتدا درخت خرابی و درخت رخداد را برای برآورد ریسک سیستم پیشنهاد کرده‌اند؛ سپس به دلیل ناتوانی درخت خرابی و درخت رخداد در مدل‌سازی قابلیت اطمینان سیستم‌هایی که دارای خرابی‌های وابسته‌اند، شبکه‌ی پتری را پیشنهاد کرده‌اند و توسعه‌ی آن را در این شبکه به وجود آورده‌اند. در نهایت با تبدیل درخت خرابی به شبکه‌ی پتری ریسک یک سیستم را با خرابی‌های وابسته برآورد کرده‌اند.

اکانز^[۱۸] و مصلح^[۲۱] با ارائه‌ی یک روش جدید به وسیله‌ی شبکه‌های بی‌زی احتمال خرابی یک سیستم را با در نظر گرفتن علت مشترک خرابی و اجزای غیر یکسان محاسبه کرده‌اند. در پژوهش‌های انجام شده علت مشترک خرابی در سیستم با اجزای موازی و یکسان بررسی شده است. در حالی که در واقعیت در پاره‌یی از موارد خرابی هم‌زمان در اجزای غیریکسان نیز ایجاد می‌شود؛ به عبارت دیگر علت مشترک خرابی باعث ایجاد خرابی در دو جزء غیریکسان می‌شود. در مقاله‌ی اکانز و مصلح قابلیت اطمینان یک سیستم پمپ آب و یک مولد برق مطالعه شده است. به طوری که خطای انسانی در نگهداری - تعمیرات به عنوان یک علت مشترک خرابی برای پمپ‌های آب و مولد برق تعیین شده است و بعد از هر بار عملیات نگهداری - تعمیرات احتمال خرابی هم‌زمان پمپ‌ها و مولد وجود دارد.

۴. پیشینه‌ی مطالعات در باره‌ی خرابی آشنایی

خرابی آشنایی در ابتدا در سیستم‌های افزونه مطرح شد. این نوع از خرابی وابسته در سیستم‌های افزونه با نام اشتراک بار^[۱۹] نیز شناخته می‌شود. خرابی یک جزء در سیستم افزونه می‌تواند بر نرخ خرابی دیگر اجزا تأثیر بگذارد به گونه‌یی که با خراب شدن یک جزء فشار (بار) بر روی اجزای باقی‌مانده که دچار خرابی نشده‌اند افزایش می‌یابد و نتیجه‌ی این افزایش فشار، افزایش نرخ خرابی اجزای باقی‌مانده است. در بسیاری

در مرجع [۲۹] قابلیت اطمینان یک سیستم فازی چندوضعیتی با خرابی وابسته ارزیابی شده است. نکته‌ی حائز اهمیت در این پژوهش پیچیدگی بین اجزای زیر سیستم‌هاست که باعث شده خرابی‌ها بر روی یکدیگر تأثیر بگذارند و خرابی به سرعت در کل سیستم انتشار یابد. به‌منظور مدل‌سازی شرایط واقعی سیستم از زنجیره‌ی مارکوف فازی استفاده شده است به‌طوری‌که ابتدا سیستم به یک سیستم سری - موازی ساده تبدیل شده و سپس زنجیره‌ی مارکوف به‌صورت جداگانه برای هر زیر سیستم در حالت چندوضعیتی تعریف شده است. در نهایت به‌منظور بررسی اعتبار مدل، قابلیت اطمینان یک سیستم تولید انرژی ارزیابی شده است.

در این مقاله برای در نظر گرفتن شرایط واقعی سیستم به چندین مشخصه توجه شده است. این مشخصه‌ها عبارت‌اند از زمان، خرابی‌های وابسته، تعمیرپذیری، ساختار سیستم و نحوه‌ی کارکرد اجزا. در جدول ۱ به بررسی این مشخصه‌ها در مقالات مختلف پرداخته شده است و در نهایت خلاصه‌ی مطالعات مشخص شده و سپس شرایط پژوهش حاضر توضیح داده شده است.

در تحقیقات انجام شده فقط یک نوع از خرابی‌های وابسته مورد توجه بوده است و در اکثر موارد اجزا به‌صورت غیرتعمیرپذیر و دودویی در نظر گرفته شده‌اند. در برخی از مدل‌های ارائه شده به‌منظور ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها با خرابی آبشاری به حالت انفجاری در شبکه‌ی بیزی توجه نشده است یا برخی دیگر به تأثیر گذر زمان در قابلیت اطمینان توجهی نکرده‌اند. در این پژوهش یک حالت جدید از خرابی آبشاری در سیستم‌های چندوضعیتی تعمیرپذیر ارائه می‌شود و سپس با به کارگیری درخت خرابی پویا و شبکه‌ی بیزی پویا یک روش جدید به‌منظور در نظر گرفتن خرابی آبشاری در سیستم‌های چندوضعیتی تعمیرپذیر ارائه می‌شود. برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها با دو نوع از خرابی‌های وابسته درخت خرابی پویا و تبدیل آن به شبکه‌ی بیزی پویا پیشنهاد می‌شود. در مدل ارائه شده با استفاده از روش تبدیل لاپلاس توابع توزیع هر حالت برای یک سیستم چندوضعیتی مشخص شده است و تعمیرپذیری اجزا نیز در شبکه‌ی بیزی پویا مد نظر قرار می‌گیرد. استفاده از شبکه‌ی بیزی پویا باعث می‌شود تا تأثیر گذر زمان در ارزیابی قابلیت اطمینان در نظر گرفته شود. در مطالعه‌ی حاضر برای ایجاد شبکه‌ی بیزی پویا از درخت خرابی پویا استفاده می‌شود که این کار منجر به کاهش حالت انفجاری در شبکه‌ی بیزی پویا می‌شود.

ادامه‌ی ساختار مقاله به شرح زیر است: در بخش ۵ شبکه‌ی بیزی پویا شرح داده می‌شود. در بخش ۶ نحوه‌ی تبدیل درخت خرابی پویا به شبکه‌ی بیزی پویا توضیح داده می‌شود. در بخش ۷ مدل پیشنهادی شرح داده می‌شود. ابتدا نحوه‌ی لحاظ کردن تعمیرپذیری برای اجزای چندوضعیتی شرح داده می‌شود و سپس یک عملگر جدید در درخت خرابی پویا ایجاد می‌شود تا بتوان به وسیله‌ی آن تأثیر خرابی آبشاری را در نظر گرفت. در بخش ۸ به منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی مطالعه‌ی موردی برای سیستم پمپاژ فشار قوی ارائه می‌شود و نتایج تحلیل می‌شود.

۵. شبکه‌ی بیزی پویا

شبکه‌ی بیزی پویا، توسعه‌یافته‌ی شبکه‌ی بیزی معمولی است با این تفاوت که احتمالات هر گره با گذر زمان نیز تغییر می‌کند؛ به عبارتی توزیع احتمال توأم برای کل شبکه‌ی بیزی (وقتی که زمان ثابت باشد) برابر است با:

$$P(u) = \prod_i^n P(A_i(t) | pa(A_i(t))) \quad (1)$$

یک متغیر تصادفی باشد. ماتوک^{۲۵} و همکاران^[۲۲] از فرایند مارکوف استفاده کرده‌اند و اشتراک بار را در یک سیستم با اجزای چندوضعیتی لحاظ کرده و تابع قابلیت اطمینان سیستم را محاسبه کرده‌اند. در پژوهش آن‌ها هیچ اشاره‌ی به تأثیر کارکرد معیوب اجزا در سیستم نشده است و صرفاً اجزا به‌صورت چندوضعیتی در نظر گرفته شده‌اند. جاین^{۲۶} و گوپتا^[۲۳] از زنجیر مارکوف و روش تبدیل لاپلاس برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم افزونه با دو نوع از خرابی‌های وابسته بهره گرفته‌اند. آن‌ها علت مشترک خرابی و خرابی آبشاری را در مدل خود لحاظ کرده‌اند. در مطالعه‌ی آن‌ها خرابی آبشاری در سیستم‌های افزونه بررسی شده است. نوآوری اصلی این پژوهش اجزای غیریکسان در سیستم افزونه است و با فرمول‌بندی این شرایط در زنجیر مارکوف توانسته‌اند یک مدل کارآمد نسبت به سایر پژوهش‌ها ارائه دهند. در این پژوهش اجزا تعمیرناپذیر در نظر گرفته شده‌اند.

بایو^{۲۸} و همکاران^[۲۴] و کداتاریتری^{۲۹} و همکاران^[۲۵] با به کارگیری شبکه‌های بیزی پویا یک الگوریتم برای تبدیل سیستم‌های سری - موازی به شبکه‌های بیزی و یک مدل برای در نظر گرفتن خرابی آبشاری در سیستم‌های چند وضعیت در شبکه‌ی برق ارائه کرده‌اند. در مطالعات آنها منظور از حالت معیوب، وضعیتی است که شبکه‌ی برق با توان زیاد کار می‌کند. در این مطالعات بردارها و گره‌های متفاوتی به‌منظور بررسی خرابی آبشاری، در نظر گرفتن زمان و تعمیرپذیری به شبکه بیزی اضافه شده است که ضعف اصلی این پژوهش‌ها را بیان می‌کند. زیرا با افزایش روابط، بردارها و گره‌ها در شبکه بیزی احتمال رخداد حالت انفجاری در کل شبکه بالا می‌رود.^[۲۶] از طرفی، کلیه‌ی گره‌ها در شبکه بیزی به‌صورت چند وضعیت فرض شده‌اند، در حالی که در همه‌ی سیستم‌ها نمی‌توان همه‌ی اجزا را به‌صورت چندوضعیتی در نظر گرفت و عملکرد برخی از اجزا فقط به‌صورت دودویی (خراب و سالم) است. از طرفی دیگر کارکرد معیوب در یک جزء به واسطه‌ی کارکرد معیوب جزء دیگر ایجاد می‌شود یا خرابی یک جزء باعث افزایش احتمال کارکرد معیوب جزء دیگر می‌شود که در مطالعات فوق هیچ کدام از این شرایط لحاظ نشده است (تأثیر کارکرد معیوب در کارکرد دیگر اجزا).

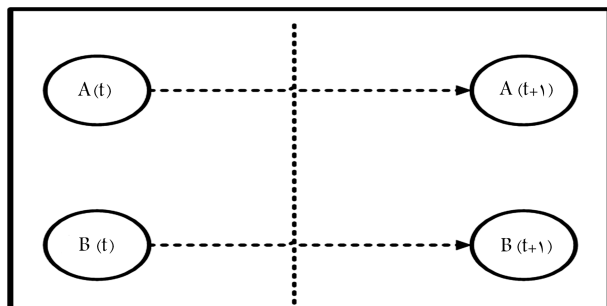
علاوه بر علت مشترک خرابی و خرابی آبشاری وابستگی‌های دیگری در بین اجزای سیستم‌ها وجود دارند که به راحتی نمی‌توان قابلیت اطمینان آن‌ها را مدل‌سازی و ارزیابی کرد. در پاره‌ی از موارد این وابستگی‌ها به دلیل پیچیده بودن سیستم‌ها ایجاد می‌شوند. منظور از پیچیده بودن یک سیستم تعداد اجزای زیاد آن و روابط خاصی است که بین زیر سیستم‌های آن وجود دارد؛ به‌طوری‌که نمی‌توان روابط را سری یا موازی در نظر گرفت. در مرجع^[۲۷] یک مدل ارزیابی قابلیت اطمینان و میانگین زمان خرابی برای سیستم تعمیرپذیر پیچیده ارائه شده است. در این مقاله تابع مفصل برای در نظر گرفتن وابستگی بین زیر سیستم‌ها انتخاب شده است و در نهایت با بهره گرفتن از زنجیره‌ی مارکوف مدل‌سازی انجام شده است. استفاده از تابع مفصل و زنجیره‌ی مارکوف باعث شده است انعطاف‌پذیری مدل افزایش یابد و مدل برای سیستم‌های چند وضعیت تعمیرپذیر نیز قابل استفاده شود.

در مرجع^[۲۸] یک سیستم چند وضعیت با زیرسیستم‌های وابسته در نظر گرفته شده است و با ایجاد تابع جدید بر اساس تابع مولد، درجه‌ی وابستگی تعریف شده و یک مدل به‌منظور ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم چندوضعیتی پیچیده با اجزای وابسته ارائه شده است. منظور از وابستگی اجزا وابستگی دو طرفه است و به نحوی می‌توان آن را در دسته‌ی خرابی‌های آبشاری قرار داد. در این مقاله تعمیرپذیر بودن اجزا مد نظر قرار نگرفته است؛ در حالی که خرابی آبشاری در اکثر موارد در اجزای مکانیکی قابل تعمیر اتفاق می‌افتد.

جدول ۱. پیشینه پژوهش.

ردیف	تاریخ انتشار (میلادی)	شماره مرجع	ساختار سیستم		نوع وابستگی	نحوه کارکرد		تعمیر پذیری
			مورد نظر			اجزا		
			افزونه	سری		چندحالتی	دودویی	
۱	۱۹۸۷	[۴۰]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
۲	۱۹۹۱	[۴۱]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
۳	۱۹۹۱	[۴۲]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
۴	۱۹۹۵	[۴۳]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
۵	۱۹۹۷	[۴۴]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
۶	۲۰۰۳	[۴۵]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
۷	۲۰۰۵	[۴۶]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
۸	۲۰۰۷	[۴۷]	سیستم منسجم*	✓	✓	✓	✓	✓
۹	۲۰۰۹	[۴۸]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
۱۰	۲۰۱۳	[۴۹]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
۱۱	۲۰۱۴	[۵۰]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
۱۲	۲۰۱۵	[۵۱]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
۱۳	۲۰۱۵	[۵۲]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
۱۴	۲۰۱۶	[۵۳]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
۱۵	۲۰۱۶	[۵۴]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
۱۶	۲۰۱۶	[۲]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
۱۷	۲۰۱۶	[۵۵]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
۱۸	۲۰۱۷	مقاله حاضر	✓	✓	✓	✓	✓	✓

* Coherent



شکل ۱. مثالی از شبکه بیزی پویا.

منظور از $A_i(t)$ ، i امین متغیر در لحظه t و منظور از $pa(A_i(t))$ گره‌های والد 3^0 است. بنابراین با در نظر گرفتن زمان در احتمالات شرطی، توزیع توأم کل شبکه به ازای مقادیر مختلف زمان برابر است با

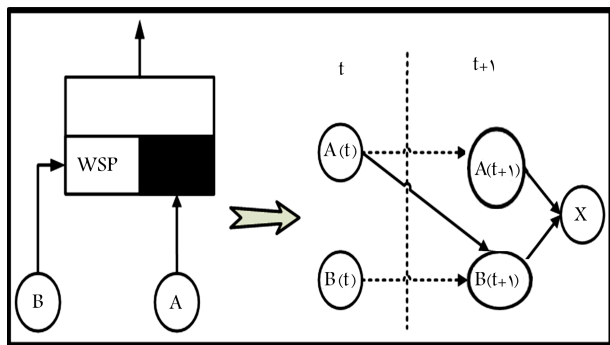
$$P(u) = \prod_{t=1}^T \prod_{i=1}^n P(A_i(t) | pa(A_i(t))) \quad (2)$$

برای تبدیل درخت خرابی پویا به شبکه‌ی بیزی پویا از حالت خاصی از شبکه‌ی بیزی پویا استفاده می‌شود که به آن شبکه‌ی بیزی پویا با زمان گسسته گفته می‌شود. زمانی که درخت خرابی پویا به شبکه‌ی بیزی پویا تبدیل می‌شود باید به طریقی احتمالات محاسبه شوند که در هر لحظه از زمان وضعیت عملگر مشخص باشد؛ یعنی مشخص باشد که در لحظه t عملگر در چه وضعیتی قرار دارد، فعال است یا غیرفعال. شبکه‌ی بیزی با زمان گسسته را می‌توان با 2 برش زمانی در نظر گرفت به طوری که متغیر یا گره اول وضعیت متغیر را در لحظه t بیان کند و متغیر دوم وضعیت همان متغیر قبلی را در لحظه $t+1$ نشان دهد. این دو متغیر با برداری به نام بردار زمانی به همدیگر متصل می‌شوند؛ به عبارت دیگر وضعیت متغیر اول به صورت مجازی به مقدار Δt تغییر می‌کند. در این حالت با تغییر زمان وضعیت احتمالات برای هر گره به صورت گسسته مشخص می‌شود. به این نوع خاص از شبکه‌ی بیزی، شبکه‌ی بیزی پویا با 2 برش زمانی گفته می‌شود. شکل ۱ شبکه‌ی بیزی پویا را برای اجزای A و B نشان می‌دهد.

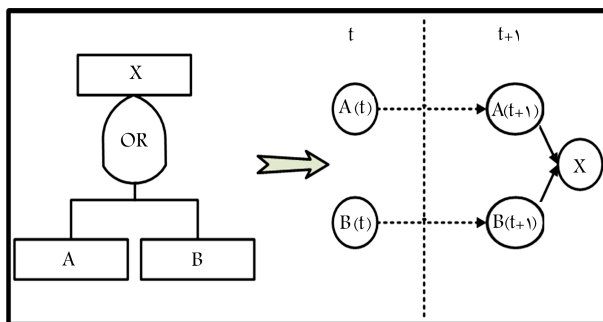
۶. تبدیل درخت خرابی پویا به شبکه‌ی بیزی پویا

درخت خرابی در شرایط عادی ابزار مناسبی برای ارزیابی ریسک یک سیستم است. ولی در این روش همه‌ی رخدادها در حالت دودویی (صفر - یک) هستند و همه‌ی وقایع آماری از همدیگر مستقل فرض می‌شود؛ بنابراین نمی‌توان از درخت خرابی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های چندوضعیتی با اجزای وابسته استفاده کرد. به همین دلیل درخت خرابی پویا به شبکه‌ی بیزی پویا تبدیل می‌شود.

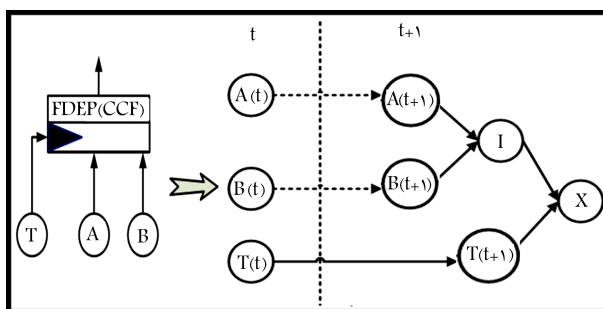
در این قسمت نحوه‌ی تبدیل درخت خرابی پویا به شبکه‌ی بیزی پویا بیان می‌شود. چهار نوع از عملگرهای عمده که بیشترین استفاده را در درخت خرابی پویا دارند، عبارت‌اند از عملگر توالی (SEQ)، 3^1 عملگر وابستگی (FDEP)، 3^2 عملگر



شکل ۴. تبدیل عملگر رزرو گرم به شبکه‌ی بیزی پویا.



شکل ۲. تبدیل عملگر OR به شبکه‌ی بیزی پویا.



شکل ۳. تبدیل عملگر وابستگی (عملگر علت مشترک خرابی) به شبکه‌ی بیزی پویا.

۷. آماده‌سازی مدل پیشنهادی

در این مقاله تلاش می‌شود تا شرایط واقعی سیستم در ارزیابی قابلیت اطمینان آن لحاظ شود؛ از این رو مشخصه‌های تعمیرپذیری، اجزای چندوضعیتی، وابستگی اجزا، زمان و حالت انفجاری در مدل ارزیابی قابلیت اطمینان مد نظر قرار گرفته است. محاسبه‌ی تابع توزیع سیستم چندوضعیتی برای به دست آوردن احتمالات مربوط به هر وضعیت در هر لحظه از زمان با استفاده از توزیع‌های آماری معمول به راحتی امکان‌پذیر نیست؛ از این رو در مرحله‌ی اول ابتدا با استفاده از زنجیره‌ی مارکوف و روش تبدیل لاپلاس محاسبه‌ی تابع توزیع یک جزء چندوضعیتی پیشنهاد می‌شود. ماتریس نمودارگذار مشخص می‌شود. سپس معادلات دیفرانسیل برای زنجیره‌ی مارکوف تعیین می‌شوند. در نهایت با به‌کارگیری تبدیل لاپلاس معادلات حل و توابع توزیع یک جزء چندوضعیتی محاسبه می‌شوند. در مرحله‌ی دوم پژوهش احتمالات شرطی در شبکه‌ی بیزی با زمان گسسته به گونه‌ی تعریف می‌شوند که شرایط تعمیرپذیری در ارزیابی قابلیت اطمینان یکپارچه شود. در مرحله‌ی سوم مفهوم خرابی آشناری در سیستم‌های چندوضعیتی تعمیرپذیر که مد نظر این مقاله است، ارائه می‌شود. در مرحله‌ی چهارم پژوهش با ایجاد یک عملگر جدید در درخت خرابی پویا، خرابی آشناری تعریف شده در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم لحاظ می‌شود.

۱.۷. تعمیرپذیری و اجزای چندوضعیتی در شبکه‌ی بیزی پویا

اجزای چندوضعیتی در هر لحظه از زمان امکان دارد که در سه وضعیت مختلف قرار داشته باشند (سالم (۲) - معیوب (۱) - خراب (۰)). زمانی جزء مورد نظر سالم است، که وظیفه‌ی خود را به خوبی انجام دهد. زمانی جزء خراب در نظر گرفته می‌شود که از کار باز بماند یا به عبارتی نتواند وظیفه‌ی خود را انجام دهد. وضعیت معیوب به حالتی از جزء اشاره دارد که جزء وظیفه‌ی خود را به خوبی انجام نمی‌دهد یا با حداقل توان ممکن کار می‌کند. لحاظ کردن وضعیت معیوب در ارزیابی قابلیت اطمینان اجزا اهمیت ویژه‌ی دارد. در برخی موارد اگر جزء در وضعیت معیوب قرار داشته باشد تعمیرپذیری آن با هزینه‌ی کمتری انجام می‌شود یا این امکان وجود دارد که جزء در وضعیت معیوب خسارت‌های جبران‌ناپذیری را به کل سیستم وارد کند؛ بنابراین، برای طراحان و مهندسان سیستم این مسئله بسیار مهم است که بدانند اجزای چندوضعیتی سیستم در هر لحظه از زمان با چه احتمالی در چه شرایطی قرار دارند.

اولویت (PAND) ^{۳۳} و عملگر رزرو (SP) ^{۳۴} با توجه به نیاز مقاله عملگرهای مرتبط با پژوهش حاضر به اختصار شرح داده می‌شوند.

۱.۶. عملگر OR

همان‌طور که گفته شد برای تبدیل درخت خرابی پویا به شبکه‌ی بیزی پویا از حالت خاصی از شبکه‌ی بیزی با زمان گسسته استفاده می‌شود. فرض می‌شود که دو جزء A و B به صورت سری نسبت به همدیگر قرار گرفته‌اند، در این صورت تبدیل درخت خرابی پویا به شبکه‌ی بیزی پویا با زمان گسسته برای این دو جزء در شکل ۲ آمده است.

۲.۶. عملگر وابستگی

خروجی این عملگر زمانی اتفاق می‌افتد که رخدادهای A و B هر دو رخ بدهند یا رخداد T اتفاق بیافتد. در صورتی که رخداد T به تنهایی اتفاق بیافتد خروجی عملگر، عمل می‌کند. این عملگر به‌عنوان عملگر علت مشترک خرابی نیز شناخته می‌شود. شکل ۳ تبدیل درخت خرابی پویا را به شبکه‌ی بیزی پویا برای عملگر علت مشترک خرابی نشان می‌دهد.

۳.۶. عملگر رزرو گرم (WSP) ^{۳۵}

در پاره‌یی از موارد برای برخی از سیستم‌ها با اجزای حساس یک جزء به صورت رزرو (بدک) در نظر گرفته می‌شود. وقتی جزء B جایگزین جزء عملیاتی A می‌شود، نرخ خرابی آن برابر نرخ خرابی جزء A می‌شود اما زمانی که در وضعیت رزرو (آماده به کار) قرار دارد، نرخ خرابی آن کمتر از نرخ خرابی جزء A است؛ به عبارت دیگر جزء B در وضعیت رزرو نیز دچار شکست می‌شود. به این سیستم افزونه، سیستم رزرو گرم گفته می‌شود. شکل ۴ تبدیل عملگر رزرو گرم در درخت خرابی پویا را به شبکه‌ی بیزی پویا نشان می‌دهد.

۲.۷. مرحله‌ی اول: محاسبه‌ی تابع توزیع تجمعی برای اجزای

چندوضعیتی

در شبکه‌ی بیزی پویا با زمان گسسته برای هر جزء در سیستم دو گره در نظر گرفته می‌شود. گره اول وضعیت جزء را در لحظه‌ی t و گره دوم وضعیت همان جزء را در لحظه‌ی $t+1$ نشان می‌دهد. در این صورت اگر احتمالات شرطی برای گره دوم به گونه‌ی تعریف شوند که تعمیرپذیری جزء را نیز مد نظر قرار دهند، می‌توان احتمالات هر وضعیت را در لحظه‌ی $t+1$ محاسبه کرد. شکل ۵ شبکه‌ی بیزی پویا با زمان گسسته را برای یک جزء چندوضعیتی نشان می‌دهد.

وقتی که جزئی به صورت چندوضعیتی کار می‌کند، به جای نرخ خرابی جزء باید نرخ تغییر وضعیت آن از حالت سالم به معیوب و از حالت معیوب به خراب مشخص باشد. هر کدام از وضعیت‌ها با علائم زیر نمادگذاری می‌شود (جزء مورد نظر بعد از خراب شدن قابل تعمیر است).

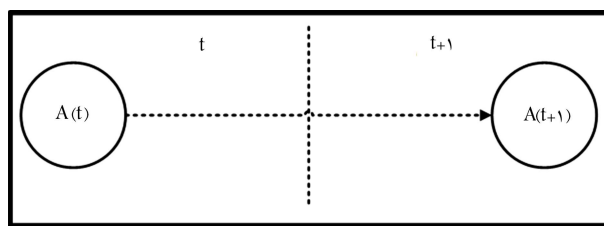
نرخ تغییر وضعیت از حالت سالم به معیوب برای جزء A

نرخ تغییر وضعیت از حالت معیوب به حالت خراب برای جزء A

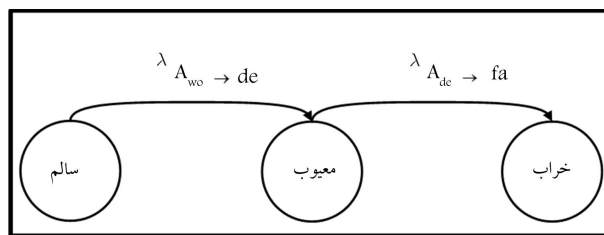
نرخ تعمیرپذیری جزء A

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، احتمالات اولیه برای اجزای دودویی با استفاده از توزیع‌های آماری و اطلاعات قبلی قابل محاسبه است. ولی برای اجزای چندوضعیتی به راحتی نمی‌توان از توزیع‌های آماری استفاده کرد؛ زیرا در هر لحظه از زمان احتمال این‌که جزء چندوضعیتی در هر وضعیت قرار بگیرد، متفاوت است و با گذر زمان نیز این احتمالات تغییر می‌کنند. با استفاده از روش تبدیل لاپلاس می‌توان توابعی بر حسب زمان ایجاد کرد که احتمال هر وضعیت را در هر لحظه از زمان مشخص می‌کنند. حالات هر گره در زنجیر مارکوف بیانگر وضعیت جزء است که حالات سالم، معیوب، و خراب را نشان می‌دهد. شکل ۶ نمودار زنجیره‌ی مارکوف را برای جزء A نشان می‌دهد.

$$\lambda = \begin{bmatrix} -\lambda_{wo \rightarrow de} & \lambda_{wo \rightarrow de} & 0 \\ 0 & -\lambda_{de \rightarrow fa} & \lambda_{de \rightarrow fa} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$



شکل ۵. شبکه‌ی بیزی پویا با زمان گسسته برای جزء A .



شکل ۶. نمودار زنجیره‌ی مارکوف برای یک جزء چند وضعیتیتی.

معادلات دیفرانسیل نیز با توجه به ماتریس آهنگ گذار زنجیره‌ی مارکوف (رابطه‌ی ۴) نوشته می‌شوند. این معادلات برحسب ضرب ماتریسی $\frac{dP_k(t)}{dt} = P_k(t) \cdot \lambda$ $k = 0, 1, 2$ نوشته شده است (رابطه‌ی ۵).

$$\begin{aligned} \frac{dP_T(t)}{dt} &= -\lambda_{wo \rightarrow de} \cdot P_1(t) \\ \frac{dP_1(t)}{dt} &= \lambda_{wo \rightarrow de} \cdot P_T(t) - \lambda_{de \rightarrow fa} \cdot P_1(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_{de \rightarrow fa} \cdot P_1(t) \end{aligned} \quad (5)$$

با استفاده از $\int_0^\infty e^{-st} P_k(t) dt$ $k = 0, 1, 2$ تبدیل لاپلاس برای معادلات رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید که در رابطه‌ی ۶ آورده شده است.

$$\begin{aligned} P_T(s) &= \frac{1}{(s + \lambda_{wo \rightarrow de})} \\ P_1(s) &= \frac{\lambda_{wo \rightarrow de}}{(s + \lambda_{wo \rightarrow de}) \cdot (s + \lambda_{de \rightarrow fa})} \\ P_2(s) &= \frac{\lambda_{wo \rightarrow de} \cdot \lambda_{de \rightarrow fa}}{s \cdot (s + \lambda_{wo \rightarrow de}) \cdot (s + \lambda_{de \rightarrow fa})} \end{aligned} \quad (6)$$

با گرفتن معکوس تبدیل لاپلاس، معادلات ۷ به دست می‌آیند که هر کدام به عنوان تابع توزیع هر وضعیت برای جزء چندوضعیتی شناخته می‌شوند. برای حل معادلات دیفرانسیل و روش تبدیل لاپلاس از نرم‌افزار متلب استفاده شده است.

$$\begin{aligned} P_T(t) &= \exp(-\lambda_{wo \rightarrow de} \cdot t) \\ P_1(t) &= \frac{\lambda_{wo \rightarrow de} \cdot \exp(-\lambda_{de \rightarrow fa} \cdot t)}{\lambda_{wo \rightarrow de} - \lambda_{de \rightarrow fa}} - \frac{\lambda_{wo \rightarrow de} \cdot \exp(-\lambda_{wo \rightarrow de} \cdot t)}{\lambda_{wo \rightarrow de} - \lambda_{de \rightarrow fa}} \\ P_2(t) &= \frac{\lambda_{de \rightarrow fa} \cdot \exp(-\lambda_{wo \rightarrow de} \cdot t)}{\lambda_{wo \rightarrow de} - \lambda_{de \rightarrow fa}} - \frac{\lambda_{wo \rightarrow de} \cdot \exp(-\lambda_{de \rightarrow fa} \cdot t)}{\lambda_{wo \rightarrow de} - \lambda_{de \rightarrow fa}} + 1 \end{aligned} \quad (7)$$

۳.۷. مرحله‌ی دوم: جدول احتمالات شرطی در شبکه‌ی بیزی پویا

برای اجزای چندوضعیتی تعمیرپذیر

در مجموع برای گره دوم جزء چندوضعیتی تعمیرپذیر در شبکه‌ی بیزی پویا ۹ احتمال شرطی باید نوشت. در جدول احتمال شرطی وضعیت سالم با عدد ۲ وضعیت معیوب با عدد ۱ و وضعیت خراب با عدد ۰ نمایش داده می‌شوند. احتمال شرطی اول: احتمال شرطی اول بیان می‌کند که جزء مورد نظر در لحظه‌ی $t+1$ سالم باشد به شرطی که بدانیم در لحظه‌ی t نیز سالم بوده است. این احتمال برابر است با این‌که سیستم در زمان Δt دچار کارکرد معیوب نشده باشد. با توجه به این‌که توزیع عمر اجزا را توزیع نمایی در نظر گرفته‌ایم، رابطه‌ی زیر برقرار است.

$$P(A_{t+1} = 2 | A_t = 2) = \exp(-\lambda_{wo \rightarrow de} \cdot \Delta t) \quad (8)$$

احتمال شرطی دوم: این احتمال شرطی بیان می‌کند که اگر بدانیم جزء در لحظه‌ی t سالم است، در این صورت احتمال کارکرد معیوب جزء در لحظه‌ی $t+1$ چقدر است. در صورتی جزء معیوب کار می‌کند که در زمان Δt وارد وضعیت معیوب شده باشد.

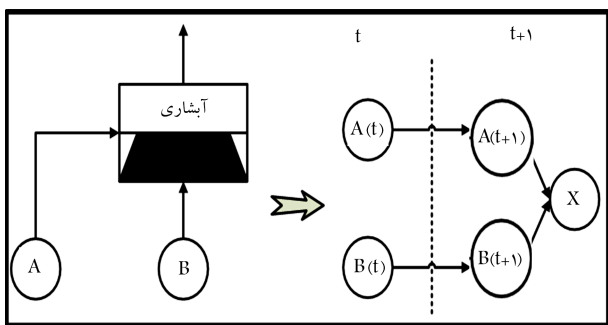
$$P(A_{t+1} = 1 | A_t = 2) = 1 - \exp(-\lambda_{wo \rightarrow de} \cdot \Delta t) \quad (9)$$

این‌گونه نیست. این احتمال وجود دارد که با کارکرد معیوب یک جزء در سیستم، کارکرد معیوب در دیگر اجزای دودویی سیستم انتشار یابد یا حتی خرابی یک جزء باعث خرابی کل سیستم نشود و فقط احتمال کارکرد معیوب را در سیستم افزایش دهد، در این صورت یک نوع خرابی آبخاری در سیستم‌های چندوضعیتی ایجاد می‌شود. از طرفی خرابی آبخاری در سیستم‌های سری تعمیرپذیر نیز باعث می‌شود تا چند جزء به صورت هم‌زمان خراب شوند. این مسئله در تعمیرپذیری اجزا تأثیر می‌گذارد. زیرا خرابی یک جزء باعث شده است تا جزء دیگر نیز خراب شود؛ در این صورت هر دو جزء به تعمیر نیاز دارند. در این مقاله منظور از خرابی آبخاری، گسترش کارکرد معیوب در دیگر اجزای یک سیستم سری تعمیرپذیر است به گونه‌ای که کارکرد معیوب یک جزء تعمیرپذیر در سیستم باعث می‌شود تا کارکرد معیوب یا خرابی در دیگر اجزای سیستم انتشار یابد.

۵.۷. مرحله‌ی چهارم: عملگر خرابی آبخاری در درخت خرابی پویا و

تبدیل آن به شبکه‌ی بیزی پویا

با استفاده از شبکه‌های بیزی پویا می‌توان خرابی آبخاری را برای اجزای مختلف در نظر گرفت و رابطه‌ی بین اجزا را مشخص کرد. اگر گره A را وضعیت مستقل جزء A در نظر بگیریم و گره B وضعیت مستقل جزء B باشد و کارکرد معیوب جزء A باعث کارکرد معیوب یا خرابی جزء B نیز بشود، در این حالت احتیاج است تا درخت خرابی پویا به شبکه‌ی بیزی زمان گسسته تبدیل شود. هیچ یک از عملگرهایی که در درخت خرابی پویا وجود دارند، توانایی مدل کردن وضعیت خرابی آبخاری را که بین اجزای A و B است، ندارند؛ بدین منظور ابتدا یک عملگر در درخت خرابی پویا ایجاد می‌کنیم تا خرابی آبخاری اجزا را نسبت به همدیگر نشان دهد. با این کار علاوه بر در نظر گرفتن خرابی آبخاری در سیستم‌های چندوضعیتی و تعمیرپذیر، از رخداد حالت انفجاری در شبکه‌ی بیزی جلوگیری می‌شود. شکل ۷ نمایی از عملگر پیشنهادی در این مقاله و تبدیل آن به شبکه‌ی بیزی پویا را نشان می‌دهد. در شبکه‌ی بیزی ایجاد شده در شکل ۷ گره‌های $A(t)$ و $B(t)$ وضعیت‌های اولیه را برای اجزا مشخص می‌کنند. گره‌های $A(t+1)$ و $B(t+1)$ به ترتیب وضعیت اجزای A و B را با توجه به تعمیرپذیر بودن آن‌ها مشخص می‌کنند. گره Cascade نیز وضعیت خرابی آبخاری را در جزء B نشان می‌دهد و احتمالات شرطی برای این گره به صورت جدول ۲ تعریف می‌شوند. در این جدول δ درصدی از مواقع را نشان می‌دهد که کارکرد معیوب جزء A باعث خرابی جزء B می‌شود. در نتیجه $1 - \delta$ درصد از مواقع را نشان می‌دهد که کارکرد معیوب جزء A باعث گسترش کارکرد معیوب در جزء B می‌شود. اگر مقدار δ برابر با صفر باشد در این صورت کارکرد معیوب جزء A فقط باعث کارکرد معیوب جزء B می‌شود و خرابی را در سیستم گسترش نمی‌دهد.



شکل ۷. تبدیل عملگر خرابی آبخاری به شبکه‌ی بیزی پویا با زمان گسسته.

احتمال شرطی سوم: احتمال این‌که جزء در لحظه‌ی $t+1$ خراب باشد به شرطی که در لحظه‌ی t سالم بوده است، برابر صفر است؛ زیرا جزء ابتدا وارد وضعیت معیوب می‌شود سپس خراب می‌گردد. پس رخداد این واقعه محال است.

$$P(A_{t+1} = 0 | A_t = 2) = 0 \quad (10)$$

احتمال شرطی چهارم: احتمال کارکرد سالم جزء مورد نظر، زمانی که جزء در لحظه‌ی $t+1$ سالم باشد به شرطی که بدانییم در لحظه‌ی t معیوب بوده است، برابر صفر است. چون تغییر ناگهانی سیستم در زمان Δt به وضعیت سالم غیرممکن است (سیستم در وضعیت معیوب قابل تعمیر نیست).

$$P(A_{t+1} = 2 | A_t = 1) = 0 \quad (11)$$

احتمال شرطی پنجم: این احتمال، احتمال کارکرد معیوب جزء را در لحظه‌ی $t+1$ نشان می‌دهد به شرطی که بدانییم جزء در لحظه‌ی t معیوب بوده است. این احتمال برابر است با احتمال این‌که جزء در زمان Δt وارد وضعیت خراب نشده باشد.

$$P(A_{t+1} = 1 | A_t = 1) = \exp(-\lambda_{A_{de-fa}} \cdot \Delta t) \quad (12)$$

احتمال شرطی ششم: زمانی که بدانییم جزء در لحظه‌ی t معیوب است، در این صورت احتمال خرابی آن برابر است با احتمال این‌که جزء در زمان Δt خراب شده باشد.

$$P(A_{t+1} = 0 | A_t = 1) = 1 - \exp(-\lambda_{A_{de-fa}} \cdot \Delta t) \quad (13)$$

احتمال شرطی هفتم: زمانی که بدانییم جزء در لحظه‌ی t خراب بوده است، در این صورت احتمال کارکرد سالم آن در لحظه‌ی $t+1$ برابر است با احتمال این‌که جزء مورد نظر در زمان Δt تعمیر شده باشد.

$$P(A_{t+1} = 2 | A_t = 0) = 1 - \exp(-\mu_A \cdot \Delta t) \quad (14)$$

احتمال شرطی هشتم: این احتمال بیان‌کننده‌ی کارکرد معیوب جزء در لحظه‌ی $t+1$ است وقتی که جزء مورد نظر در لحظه‌ی t خراب بوده است. هر زمان که جزء تعمیر می‌شود وضعیت آن به حالت سالم تبدیل می‌شود. به عبارت دیگر بعد از هر بار تعمیر کردن، جزء مورد نظر به یک جزء نو و جدید تبدیل می‌شود؛ در این صورت این احتمال شرطی برابر با صفر است.

$$P(A_{t+1} = 1 | A_t = 0) = 0 \quad (15)$$

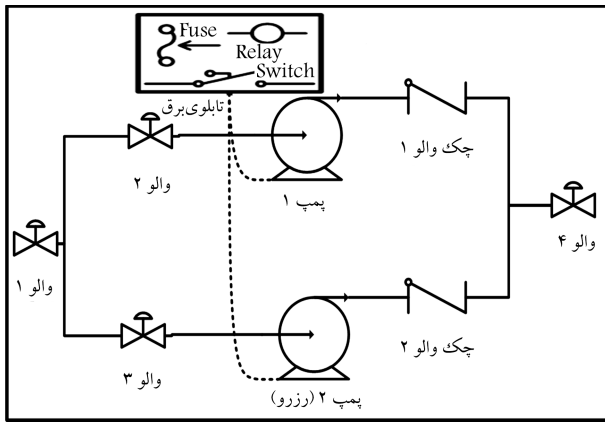
احتمال شرطی نهم: اگر بدانییم که جزء در لحظه‌ی t خراب است، در این صورت احتمال خرابی آن در لحظه‌ی $t+1$ برابر با احتمال این است که در زمان Δt تعمیر نشده باشد.

$$P(A_{t+1} = 0 | A_t = 0) = \exp(-\mu_A \cdot \Delta t) \quad (16)$$

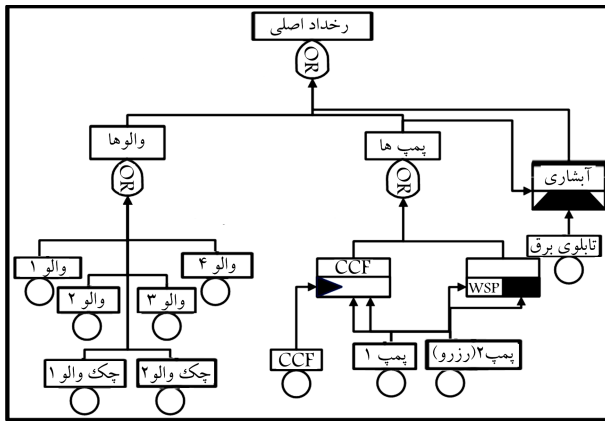
۴.۷. مرحله‌ی سوم: مفهوم خرابی آبخاری در سیستم‌های

چندوضعیتی تعمیرپذیر

در سیستم‌های سری اگر هر یک از اجزا یا همه‌ی اجزا به صورت هم‌زمان دچار خرابی شوند در قابلیت اطمینان سیستم تأثیری نخواهد گذاشت؛ زیرا با خرابی یک جزء در سیستم سری کل سیستم خراب می‌شود. اما در سیستم‌ها و اجزای چندوضعیتی



شکل ۸. نمای فنی سیستم پمپاژ آب فشار قوی.



شکل ۹. درخت خرابی پویای سیستم پمپاژ آب فشار قوی.

در این سیستم پمپاژ آب دو پمپ آب به صورت موازی قرار دارند (یکی عملیاتی و یکی یدک) در نتیجه این دو پمپ علاوه بر خرابی مستقل در اثر علت مشترک خرابی نیز دچار شکست می شوند. درخت خرابی این سیستم پمپاژ در شکل ۹ آمده است. همان طور که در درخت خرابی مشخص شده است، هر کدام از والوها که دچار خرابی بشوند، کل سیستم خراب می شود. زیرا نشستی آب اتفاق می افتد. این نشستی می تواند به صورت نشستی داخلی یا نشستی خارجی باشد. نشستی داخلی باعث می شود تا آب در زمان بسته بودن والو از آن عبور کند و باعث به هم خوردن تنظیمات هواگیری شود. از طرف دیگر نشستی خارجی منجر به خروج آب از روزه های والو می شود که در این صورت نیز کل سیستم پمپاژ دچار خرابی می شود. پمپ ها نیز به صورت موازی نسبت به همدیگر قرار گرفته اند و عملکردشان به صورت آماده به کار گرم است. وقتی پمپ فعال دچار خرابی شود یا برای عملیات نگه داری - تعمیرات متوقف شود، پمپ یدک جایگزین می شود. پمپ یدک نیز در زمان غیرفعال بودن دچار خرابی می شود (آماده به کار گرم). کاربرد معیوب پمپ ها بر روی تابلوی برق تأثیر می گذارد؛ در پاره ای از موارد این کاربرد معیوب باعث می شود تا جریان برق عبوری از تابلوی برق تحت تأثیر قرار بگیرد و این تغییرات جریان باعث افزایش دمای تابلوی برق می شود. برای در نظر گرفتن این شرایط در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم پمپ های آب از عملگر پیشنهادی در این مقاله استفاده می شود. این عملگر وضعیت جدید تابلوی برق را نسبت به خرابی مستقلس و کاربرد معیوب پمپ های آب مشخص می کند. عملگر Cascade دو ورودی دارد. یکی خرابی مستقل تابلوی برق را نشان می دهد و ورودی دیگر مربوط به پمپ های آب است؛ زیرا همان طور که گفته شد کاربرد معیوب

جدول ۲. جدول احتمالات شرطی برای گره X در عملگر Cascade.

گروه والد		$P(X A_{t+1}, B_{t+1})$		
A	B	(۲) سالم	(۱) معیوب	(۰) خراب
(۲) سالم	(۲) سالم	۱	۰	۰
	(۰) خراب	۰	۰	۱
(۱) معیوب	(۲) سالم	۰	$1 - \delta$	δ
	(۰) خراب	۰	۰	۱
(۰) خراب	(۲) سالم	۱	۰	۰
	(۰) خراب	۰	۰	۱

در نتیجه در صورتی که عملگر پیشنهادی در درخت خرابی پویا استفاده شود حالات مختلف خرابی آبشاری در اجرای چند وضعیت تعمیر پذیر قابل مدل سازی اند.

۸. مطالعه موردی

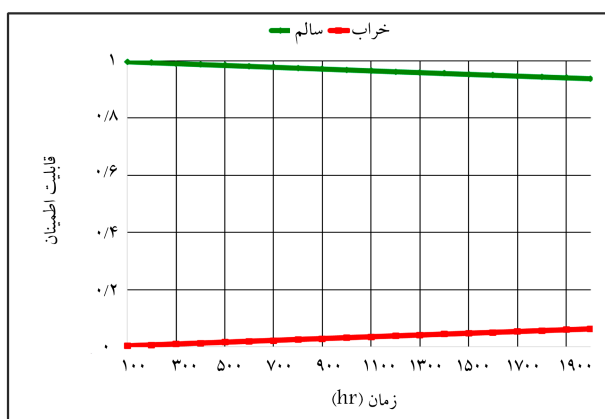
سیستم پمپاژ آب فشار قوی در مکان های مختلف و صنایع گوناگون استفاده می شود. این سیستم وظیفه دارد که آب را با فشار مشخص و به سمت مشخص هدایت کند. برخی از موارد استفاده سیستم پمپاژ آب فشار قوی عبارتند از برج های خنک کننده، سیستم خنک کننده راکتورهای هسته ای، سیستم های اطفای حریق، انتقال آب آشامیدنی از منابع آب به مصرف کننده ها و ... [۴] از مهم ترین این کاربردها می توان به انتقال آب آشامیدنی از منابع به مصرف کننده ها اشاره کرد. در سال های اخیر قابلیت اطمینان سیستم های پمپاژ آب به شدت مورد توجه دولت مردان قرار گرفته است؛ زیرا قطعی آب در شهرها و شهرستان های بزرگ عواقب جبران ناپذیری را ایجاد می کند. برای انتقال آب آشامیدنی از منابع ذخیره ای یا تصفیه خانه ها از لوله های انتقال آب استفاده می شود. با توجه به این که مسیر انتقال آب آشامیدنی در اکثر موارد مسیره های طولانی است، این امکان وجود دارد که به دلیل ناهمواری های سطح زمین شیب هایی در مسیر خط لوله ای آب ایجاد شود. این شیب ها باعث می شوند که فشار آب داخل لوله ها به شدت کاهش پیدا کند و آب آشامیدنی به مقصد انتقال پیدا نکند. برای حل این مشکل از سیستم های پمپاژ آب فشار قوی استفاده می شود. به طوری که ابتدا مکان های مناسب برای نصب سیستم پمپاژ آب مشخص می شوند. سپس در مکان های تعیین شده ایستگاه های پمپاژ آب ساخته می شوند. در صورتی که یکی از سیستم های پمپاژ آب از کار بیافتد، شبکه ای آبرسانی دچار افت فشار یا قطعی آب می شود. به همین دلیل در هر ایستگاه پمپاژ آب از دو سیستم پمپاژ استفاده می شود تا در صورتی که سیستم پمپاژ عملیاتی دچار خرابی شد، سیستم پمپاژ یدک جایگزین شود و از افت فشار یا قطعی آب جلوگیری کند. حال اگر عواملی وجود داشته باشند که باعث خرابی هم زمان دو سیستم پمپاژ آب در ایستگاه های پمپاژ شوند، در این صورت هر دو سیستم پمپاژ به صورت هم زمان از شبکه خارج می شوند و شبکه ای آبرسانی با قطعی آب مواجه می شود. از این رو در نظر گرفتن علت مشترک خرابی در ارزیابی قابلیت اطمینان پمپاژ آب از اهمیت ویژه ای برخوردار است. از طرف دیگر پمپ های آب و موتورهای الکتریکی به صورت چند وضعیت کار می کنند. این نوع کاربرد آن ها باعث می شود تا زمانی که وارد وضعیت معیوب شدند تأثیرات مختلفی در کل سیستم ایجاد شود و کاربرد معیوب گسترش یابد. در نتیجه تأثیر کاربرد معیوب نیز باید در ارزیابی قابلیت اطمینان این سیستم ها در نظر گرفته شود (خرابی آبشاری). شکل ۸ نقشه فنی سیستم پمپاژ آب را نشان می دهد.

۹. تحلیل نتایج

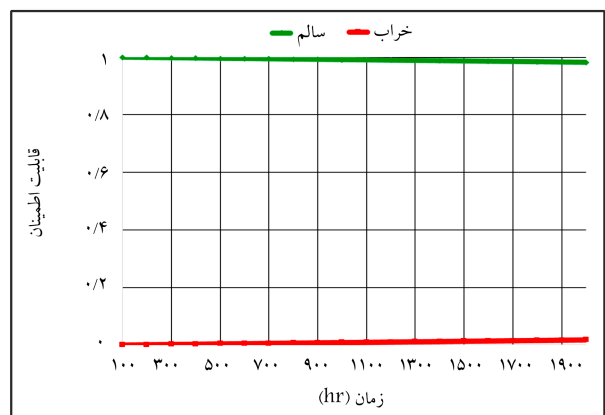
چندین نرم‌افزار به منظور حل محاسبات آماری شبکه‌های بیزی وجود دارند؛ برخی از آن‌ها عبارت‌اند از نرم‌افزار MSBN، UNB-Bayse و Netica این نرم‌افزارها توانایی حل شبکه‌های بیزی پویا با زمان گسسته را ندارند؛ به همین دلیل برای حل شبکه‌ی بیزی سیستم پمپاژ فشار قوی از نرم‌افزار اکسل استفاده می‌شود. شبکه‌ی بیزی در این نرم‌افزار کدنویسی و به‌منظور تحلیل حساسیت آن، نمودارهای هر کدام از گره‌ها (اجزاء) بر اساس گذر زمان ترسیم می‌شوند. شکل‌های ۱۱ تا ۱۶ نمودار قابلیت اطمینان هر کدام از اجزای سیستم پمپاژ آب را در هر لحظه از زمان نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود برای اجزای چندوضعیتی با گذشت زمان احتمال کارکرد سالم آن‌ها کاهش می‌یابد و به احتمال کارکرد معیوب و خرابی آن‌ها افزوده می‌شود. با توجه به نرخ‌های تغییر وضعیت هر جزء نمودارها ترسیم شده‌اند. با گذشت زمان کل سیستم به حالتی وارد می‌شود که احتمال کارکرد سالم آن برابر صفر می‌شود و فقط در وضعیت معیوب و خراب قرار می‌گیرند.

چک والوها نسبت به والوها دارای نرخ خرابی بیشتری هستند؛ در نتیجه در هر لحظه از زمان نیز قابلیت اطمینان کمتری نسبت به والوها دارند.

والوها نرخ خرابی کمتری نسبت به سایر اجزا در سیستم دارند؛ بنابراین تابع قابلیت اطمینان آن‌ها در گذر زمان با شیب کمتری کاهش می‌یابد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود پمپ‌ها به‌صورت چند وضعیت عمل می‌کنند که احتمالات هر وضعیت با گذر زمان تغییر می‌کند. همان‌طور که در شکل ۱۴ ملاحظه می‌شود کارکرد معیوب



شکل ۱۱. نمودار احتمالات هر وضعیت برای چک والوها.

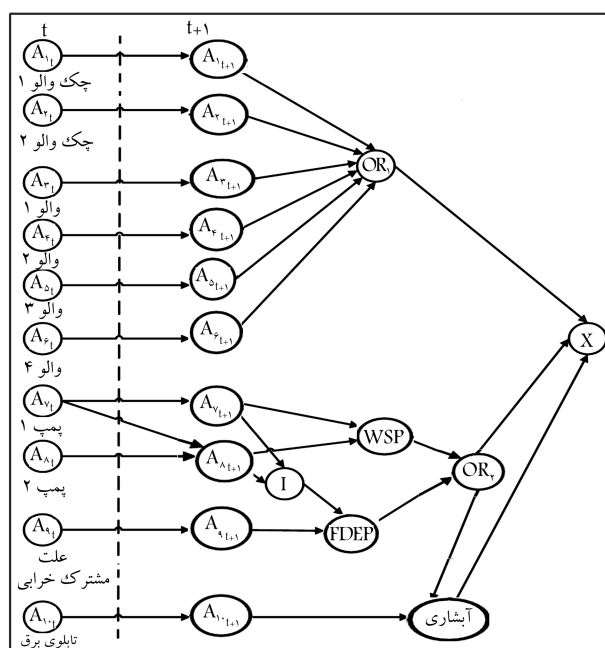


شکل ۱۲. نمودار احتمالات هر وضعیت برای والوها.

پمپ‌های آب باعث کارکرد معیوب یا خرابی تابلوی برق می‌شود. با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده از سیستم پمپاژ آب می‌توان مقدار δ را تخمین زد.

با توجه به قواعد تبدیل درخت خرابی پویا به شبکه‌ی بیزی با زمان گسسته که بیشتر گفته شد، شبکه‌ی بیزی با زمان گسسته برای درخت خرابی شکل ۹ به‌صورت شکل ۱۰ ترسیم می‌شود.

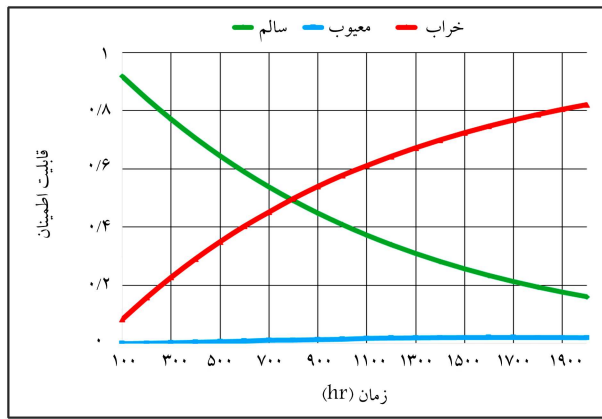
جدول ۳ نرخ‌های خرابی، نرخ تعمیرپذیری و نرخ رخداد علت مشترک خرابی را برای سیستم پمپاژ آب نشان می‌دهد. نرخ خرابی و نرخ تعمیرپذیری برای اجزای دودویی ثابت است و از توزیع نمایی پیروی می‌کند. توزیع عمر اجرای چندوضعیتی (پمپ‌ها) از توابع به دست آمده از زنجیر مارکوف به دست می‌آید. احتمالات مربوط به گره‌های دوم برای هر جزء با جدول احتمالات شرطی مشخص می‌شوند. جدول احتمالات شرطی برای هر کدام از گره‌های شبکه‌ی بیزی شکل ۱۰ تعیین می‌شوند. این جداول احتمالات شرطی را با استفاده از رابطه‌ی ۲ مشخص و پس از انجام محاسبات، احتمالات هر وضعیت را برای نکتک اجزا و کل سیستم مشخص می‌کنند.



شکل ۱۰. درخت خرابی سیستم پمپاژ فشار قوی.

جدول ۳. نرخ خرابی اجزای سیستم پمپاژ فشار قوی.

ردیف	نام جزء		فارسی	لاتین
	نرخ تعمیر پذیر	نرخ خرابی		
۱	$\mu_{Ch} = 0/2$	$\lambda_{Ch} = 0/00004$	چک والو	Check Valve
۲	$\mu_{Pu} = 0/02$	$\lambda_{wo \rightarrow de} = 0/00012$ $\lambda_{de \rightarrow fa} = 0/0002$	پمپ	Pump
۳	$\mu_{Va} = 0/2$	$\lambda_{Va} = 0/000011$	والو	valve
۴	$\mu_{pa} = 0/2$	$\lambda_{Pa} = 0/000011$	تابلو برق	Panel
۵	-	$\lambda_{CCF} = 0/0376$	علت مشترک خرابی	CCF



شکل ۱۶. نمودار احتمالات هر وضعیت برای کل سیستم پمپ آب فشار قوی.

جدول ۴. احتمالات هر وضعیت بین زمان‌های ۵۰۰۰ تا ۸۰۰۰ ساعت کارکرد سیستم پمپ آب فشار قوی.

خراب	معیوب	سالم	زمان (ساعت)
۰٫۹۸۶	۰٫۰۰۴	۰٫۰۱۰	۵۰۰۰
۰٫۹۸۸	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۹	۵۲۰۰
۰٫۹۹۰	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۷	۵۴۰۰
۰٫۹۹۲	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۶	۵۶۰۰
۰٫۹۹۳	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۵	۵۸۰۰
۰٫۹۹۴	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۴	۶۰۰۰
۰٫۹۹۵	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۴	۶۲۰۰
۰٫۹۹۶	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۳	۶۴۰۰
۰٫۹۹۶	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۳	۶۶۰۰
۰٫۹۹۷	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۶۸۰۰
۰٫۹۹۷	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۷۰۰۰
۰٫۹۹۸	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۷۲۰۰
۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۷۴۰۰
۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۷۶۰۰
۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۷۸۰۰
۱	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۸۰۰۰

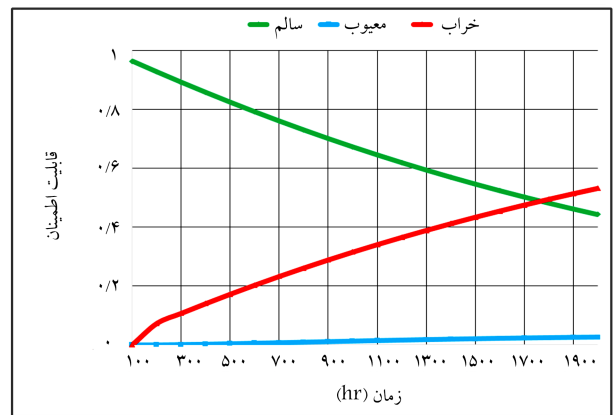
در بازه زمانی ۵۰۰۰ ساعت تا ۸۰۰۰ ساعت مشخص شده است. با گذر زمان احتمال خرابی سیستم به بیشترین حد خود می‌رسد و احتمال کارکرد سالم و معیوب صفر می‌شود. با توجه به نرخ خرابی‌های اجزای سیستم، این سیستم بعد از زمان ۶۸۰۰ ساعت کارکرد دیگر در وضعیت سالم قرار ندارد و فقط وضعیت معیوب و خراب برای سیستم امکان‌پذیر است. از زمان ۷۴۰۰ ساعت به بعد نیز سیستم خراب می‌شود.

۱۰. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

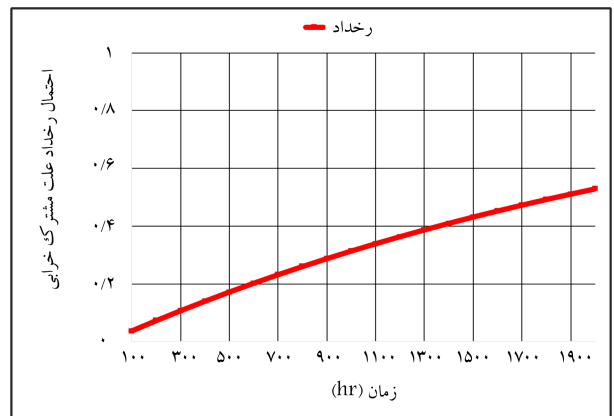
در نظر گرفتن تأثیر خرابی‌های وابسته در ارزیابی قابلیت اطمینان مستلزم آن است که ابتدا خرابی‌های وابسته و نوع آن‌ها در سیستم‌ها شناسایی شوند و سپس در مدل‌های ارزیابی قابلیت اطمینان لحاظ شوند. دو نوع از مهم‌ترین خرابی‌های وابسته خرابی آبشاری و علت مشترک خرابی هستند. تقریباً همه سیستم‌های افزونه علاوه بر



شکل ۱۳. نمودار احتمالات هر وضعیت برای پمپ‌های آب.



شکل ۱۴. نمودار احتمالات هر وضعیت برای تابلوی برق.



شکل ۱۵. نمودار احتمال رخداد علت مشترک خرابی.

در تابلوی برق به واسطه‌ی کارکرد معیوب پمپ‌های آب ایجاد شده است. شکل ۱۶ نمودار قابلیت اطمینان کل سیستم پمپ آب را نشان می‌دهد.

با گذشت زمان احتمال کارکرد سالم سیستم کاهش می‌یابد. در عین حال با گذشت زمان به احتمال خرابی سیستم و کارکرد معیوب آن افزوده می‌شود. تقریباً در زمان ۶۰۰ ساعت، احتمال کارکرد سالم و خراب سیستم برابر است و به احتمال کارکرد معیوب آن نیز افزوده شده است. با گذشت زمان سیستم به حالتی می‌رسد که احتمال کارکرد سالم آن برابر با صفر می‌شود و فقط احتمال کارکرد معیوب و خراب آن وجود دارد. در جدول ۴ احتمالات هر وضعیت برای کل سیستم پمپ آب فشار قوی

۱. در این تحقیق دو نوع از خرابی‌های وابسته در مدل ارزیابی قابلیت اطمینان مد نظر قرار گرفت. با پیچیده‌تر شدن سیستم‌ها خرابی‌های وابسته‌ی بیشتری در سیستم‌ها اتفاق می‌افتد. سیستم‌های پمپاژ آب در برخی موارد سه نوع از خرابی‌های وابسته را شامل می‌شوند، به طوری که علاوه بر علت مشترک خرابی و خرابی آبشاری در سیستم‌های سری چند وضعیت، خرابی متناسب با شرایط پویا نیز در آن‌ها وجود دارد. برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود که روشی ارائه شود تا سه نوع از خرابی‌های وابسته را در مدل ارزیابی قابلیت اطمینان لحاظ کند.
۲. با استفاده از نظریه‌ی فازی می‌توان شرایط عدم قطعیت را در مدل‌های ارزیابی قابلیت اطمینان در نظر گرفت؛ برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود عملگر ارائه شده و نحوه‌ی ترسیم درخت خرابی و تبدیل آن به شبکه‌ی بی‌ری با زمان گسسته با شبکه‌ی بی‌ری پویای فازی نیز در نظر گرفته شود.
۳. شبکه‌های پتری نت نیز می‌توانند برای حل درخت خرابی پویا استفاده شوند؛ برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود که خرابی آبشاری و علت مشترک خرابی با استفاده از شبکه‌های پتری نت مدل‌سازی و در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها لحاظ شوند و نتایج آن با نتایج این مقاله مقایسه شود (حالت انفجاری در شبکه‌های پتری نت از شبکه‌های بی‌ری کمتر است).
- خرابی مستقل خود در اثر علت مشترک خرابی نیز دچار شکست می‌شوند. خرابی آبشاری نیز می‌تواند در سیستم‌های سری و سیستم‌های موازی وجود داشته باشد. این دو خرابی وابسته بیشترین تأثیر را بعد از خرابی مستقل اجرا در شکست سیستم‌ها دارند؛ به طوری که اگر این تأثیر در مدل ارزیابی قابلیت اطمینان لحاظ نشود، بدون شک قابلیت اطمینان سیستم به درستی ارزیابی نمی‌شود.
- از طرفی مشخصه‌هایی مانند تعمیر پذیری و اجزای چندوضعیتی نیز می‌توانند نقش بسزایی در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها داشته باشند؛ پس حتماً باید در مدل‌های ارزیابی مورد توجه قرار گیرند. در این مقاله ابتدا نحوه‌ی در نظر گرفتن تعمیر پذیری در شبکه‌ی بی‌ری پویا برای اجزای چند وضعیت توضیح داده شد. در این راستا از روش تبدیل لاپلاس برای ایجاد تابع توزیع تجمعی یک جزء چند وضعیت بهره گرفته شد و سپس احتمالات شرطی برای گره دوم جزء چند وضعیت در شبکه‌ی بی‌ری پویا به گونه‌ی تعریف شد که مشخصه‌ی تعمیر پذیری در نظر گرفته شود. در ادامه مفهوم خرابی آبشاری در سیستم سری چند وضعیت شرح داده شد و یک عملگر جدید در درخت خرابی پویا ایجاد شد تا بتوان به وسیله‌ی آن تأثیر کارکرد معیوب یک جزء را در دیگر اجزای یک سیستم در نظر گرفت. برای حل عملگر پیشنهادی شبکه‌ی بی‌ری پویا توسعه داده شد.
- برای مطالعات آینده سه پیشنهاد زیر مطرح می‌شود.

پانوشته‌ها

1. common cause failure
2. coupling factor
3. cascade failure
4. Edwards
5. Watson
6. Harris
7. Fleming
8. Evans
9. Beckman
10. Mosleh
11. multiple greek letter
12. bayesian networks
13. petri net
14. explosion state
15. Huang
16. Nvlt
17. Rausand
18. O'Connor
19. load Share
20. Daniel
21. Yinghui
22. Jing
23. Lin
24. Pozsgai
25. Maatouk
26. Jain
27. Gupta
28. Bobbio
29. codetta-raiteri
30. Parents Node
31. sequence enforcing gate

32. functional dependency gate
33. priority-and gate
34. spare gate
35. Warm Spare gate

منابع (References)

1. Finkelstein, M., *Failure rate modelling for reliability and risk*, Springer Science & Business Media.(2008).
2. Shim, K. and Yim, J., *A Study of Estimation Methods for Reliability of Common Cause Failure at k-out-of-n System*, *Advanced Science and Technology Letters*, pp.99-104 (2016).
3. Kapur, K.C. and Pecht. M., *Reliability engineering*, John Wiley & Sons (2014).
4. Mortazavi, S.M., Karbasian, M. and Goli, S. "Evaluating MTTF of 2-out-of-3 redundant systems with common cause failure and load share based on alpha factor and capacity flow models", *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, **8**(3), pp.542-552 (2016).
5. Mortazavi, S.M. Mohamadi, M. and Jouzdani, J. "MTBF evaluation for 2-out-of-3 redundant repairable systems with common cause and cascade failures considering fuzzy rates for failures and repair: a case study of a centrifugal water pumping system", *Journal of Industrial Engineering International*, **14**(2), pp.281-291 (2018).

6. Wall, I., United States Nuclear Regulatory Commission, Washington DC (United States) Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risk in US Commercial Nuclear Power Plants Executive Summary (Washington -1400) International Atomic Energy Agency (IAEA) (1975).
7. Rausand, M., Høyland, A., *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications*, **396**, John Wiley & Sons (2004).
8. Edwards, G. and Watson, I. "A study of common-mode failures", UKAEA Risley Nuclear Power Development Establishment (1979).
9. Harris, B., *Stochastic Models for Common Failures. Reliability and Quality Control*, pp. 185-200 (1986)
10. Fleming, K. "Reliability model for common mode failures in redundant safety systems", Modeling and Simulation. Volume 6, Part 1 (1975).
11. Evans, M., Parry, G. and Wreathall, J. "On the treatment of common-cause failures in system analysis", *Reliability Engineering*, **9**(2), p. 107-115 (1984).
12. Beckman, L.V. "Match redundant system architectures with safety requirements", *Chemical Engineering Progress*, **91**(12), pp. 54-61 (1995).
13. Hokstad, P. and Corneliusson, K. "Loss of safety assessment and the IEC 61508 standard", *Reliability Engineering & System Safety*, **83**(1), p. 111-120 (2004).
14. Mosleh, A. and Siu, N. "A multi-parameter common cause failure model", *Transactions of the 9th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, Vol. M (1987).
15. Warren, C.G. "Common cause failures: Implementation of a simplified alpha Factor model", *Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), Proceedings-Annual*. IEEE (2010).
16. Fleming, K. and Kalinowski, A. "An extension of the beta factor method to systems with high levels of redundancy", PLG-0289., Pickard, Lowe and Garrick, Inc Newport Beach, CA (1983).
17. Rejc, Ž.B. and Čepin, M. "An extension of Multiple Greek Letter method for common cause failures modelling", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **29**, pp. 144-154 (2014).
18. Xing, L., Meshkat, L. and Donohue, S.K. "Reliability analysis of hierarchical computer-based systems subject to common-cause failures", *Reliability Engineering & System Safety*, **92**(3), pp. 351-359 (2007).
19. Huang, H.-I., Lin C.-H. and Ke J.-C. "Two-unit repairable systems with common-cause shock failures and fuzzy parameters: parametric programming approach", *International Journal of Systems Science*, **39**(5), pp. 449-459 (2008).
20. Nvlt, O., Rausand, M. "Dependencies in event trees analyzed by Petri nets", *Reliability Engineering & System Safety*, **104**, pp. 45-57, (2012).
21. O'Connora, A. and Mosleh A. "A general cause based methodology for analysis of common cause and dependent failures", *System Risk and Reliability Assessments*, **145**, pp. 341-350 (2015).
22. Daniels, H. "The statistical theory of the strength of bundles of threads. I", *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. The Royal Society (1945).
23. Kvam, P.H. and Pena, E.A. "Estimating load-sharing properties in a dynamic reliability system", *Journal of the American Statistical Association*, **100**(469), pp. 262-272 (2005).
24. Jelinski, Z. "Software reliability research", *Statistical Computer Performance Evaluation*, pp. 465-484 (1972). <https://doi.org/10.1076/B978-0-12-266950-7.50028-1>.
25. Jewell, N.P. and Kalbfleisch, J. "Marker Processes in Survival Analysis", *Lifetime Data Analysis*, **2**(1), pp. 15-29 (1996).
26. Misra, K.B., *Handbook of performability engineering.*, Springer Science & Business Media (2008).
27. Pozsgai, P., Neher, W. and Bertsche, B. "Models to consider load-sharing in reliability calculation and simulation of systems consisting of mechanical components", Reliability and Maintainability Symposium, Annual. IEEE (2003).
28. Yinghui, T. and Jing, Z. "New model for load-sharing k-out-of-n: G system with different components", *Journal of Systems Engineering and Electronics*, **19**(4), pp. 748-751 (2008).
29. Freund, J.E. "A bivariate extension of the exponential distribution", *Journal of the American Statistical Association*, **56**(296), pp. 971-977 (1961).
30. Lin, H.-H., Chen, K.-H. and Wang, R.-T. "A multivariate exponential shared-load model", *IEEE Transactions on Reliability*, **42**(1), pp. 165-171 (1993).
31. Amari, S.V. and Bergman, R. "Reliability analysis of k-out-of-n load-sharing systems", Reliability and Maintainability Symposium, RAMS 2008. Annual. IEEE (2008).
32. Maatouk, I., Chatelet, E. and Chebbo, N. "Reliability of multi-states system with load sharing and propagation failure dependence", *Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (ICQR2MSE)*, International Conference on. IEEE (2011).
33. Jain, M. and Gupta, R. "Load sharing m-out of-N: G system with non-identical components subject to common cause failure", *International Journal of Mathematics in Operational Research*, **4**(5), pp. 586-605 (2012).
34. Bobbio, A. and et al. "Modeling cascading failure propagation through dynamic bayesian networks", *IFAC Proceedings Volumes*, **42**(5), pp. 209-214 (2009).
35. Codetta-Raiteri, D. and et al. "A dynamic Bayesian network based framework to evaluate cascading effects in a power grid", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **25**(4), pp. 683-697 (2012).
36. Mo, Y. "A multiple-valued decision-diagram-based approach to solve dynamic fault trees", *IEEE Transactions on Reliability*, **63**(1), pp. 81-93 (2014).
37. Ram, M. and Singh, S. "Availability, MTTF and cost analysis of complex system under preemptive-repeat repair discipline using Gumbel-Hougaard family copula", *International Journal of Quality & Reliability Management*, **27**(5), pp. 576-595 (2010).

38. Levitin, G. "A universal generating function approach for the analysis of multi-state systems with dependent elements", *Reliability Engineering & System Safety*, **84**(3), pp. 285-292 (2004).
39. Liu, Y. and H.-Z. Huang. "Reliability assessment for fuzzy multi-state systems", *International Journal of Systems Science*, **41**(4), pp. 365-379 (2010).
40. Hughes, R. "A new approach to common cause failure", *Reliability Engineering*, **17**(3), pp. 211-236 (1987).
41. Schilling, R. and Dörre, P. "Consideration of common cause aspects in the design of Siemens/KWU PWRs", *Reliability Engineering & System Safety*, **34**(3), pp. 345-354 (1991).
42. Humphreys, P. and Jenkins, A. "Dependent failures developments", *Reliability Engineering & System Safety*, **34**(3), pp. 417-427 (1991).
43. Dhillon, B. Anude, O. "Common-cause failure analysis of ak-out-of-n: G system with non-repairable units", *International Journal of Systems Science*, **26**(10), pp. 2029-2042 (1995).
44. Fricks, R.M., Trivedi, K.S. "Modeling failure dependencies in reliability analysis using stochastic petri nets", *Proceedings of European Simulation Multi Conference (ESM 97)*, Istanbul, Turkey (1997).
45. Dobson, I., Carreras, B.A. and Newman, D.E. "A probabilistic loading-dependent model of cascading failure and possible implications for blackouts", *System Sciences, Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on*, IEEE (2003).
46. Montani, S., Portinale, L. and Bobbio, A. "Dynamic bayesian networks for modeling advanced fault tree features in dependability analysis", *Proceedings of the 16th European Conference on Safety and Reliability*, Leiden, The Netherlands, AA Balkema (2005).
47. Cui, L. and Li, H. "Analytical method for reliability and MTTF assessment of coherent systems with dependent components", *Reliability Engineering & System Safety*, **92**(3), pp. 300-307 (2007).
48. Kang, D.I., Hwang, M.J. and Han, S.H. "Estimation of the common cause failure probabilities of the components under mixed testing schemes", *Annals of Nuclear Energy*, **36**(4), pp. 493-497 (2009).
49. Radu, G., Mladin, D. and Prisecaru, I. "Analysis of potential common cause failure events for Romania-TRIGA 14MW reactor", *Nuclear Engineering and Design*, **265**, pp. 164-173 (2013).
50. Yu, Y., Wang, S. and Niu, F. "Analysis of common cause failure effect on system reliability in seismic PSA", *Progress in Nuclear Energy*, **75**, pp. 158-167 (2014).
51. Rezaei, P., Hines, P.D. and Eppstein, M.J. "Estimating cascading failure risk with random chemistry", *IEEE Transactions on Power Systems*, **30**(5), pp. 2726-2735 (2015).
52. Hao, G. and et al. "Reliability analysis of relay protection based on the fuzzy-markov model", *system*, **8**(10), (2015).
53. Yuyan, C. and et al. "Fuzzy dynamic fault tree analysis for electro-mechanical actuator based on algebraic model with common-cause failures", *Automatic Control and Computer Sciences*, **50**(2), pp. 80-90 (2016).
54. Li, Q. and Li, R. "Reliability evaluation for cloud computing system considering common cause failure", *Control Conference (CCC)*, 35th Chinese. TCCT (2016).
55. Su, C., Lin, N. and Fu, Y. "Multi-state reliability assessment for hydraulic lifting system based on the theory of dynamic Bayesian networks", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, pp. 1748006X16660488 (2016).