



# Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Research Article

(2024) 3(3):43-68

## Reliability Investigation with the New Architecture of the Backup Node Markov Model with a Better Repair and Replacement Rate and More Monitoring in Avoiding the Failure of Industrial Wireless Sensor Networks

Ahmadreza Zamani<sup>1</sup>, PhD Student, Mohammad Ali Pourmina<sup>1</sup>, Professor,  
Ramin Shaghghi Kandovan<sup>2</sup>, Assistant Professor

<sup>1</sup> Department of Mechanical, Electrical and Computer Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Electrical and Computer Engineering, Yadegar-e-Imam Khomeini (RAH) Shahre Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

### Abstract:

Sensor nodes are prone to failure due to the various applications of operating environments. This paper presents a new architecture with a Markov model to improve reliability. In the modification of the previous ideas, due to work fatigue, energy consumption and high maintenance costs, the idea of increasing the repair and replacement rate to avoid failure with the availability of replacement nodes with detailed planning of the support unit. The advantages of this method are reducing the failure rate, increasing reliability, fast implementation and deployment, energy efficiency and economic savings, improving the performance and useful life of the network, reducing delay and system rejuvenation and dynamics. The structure of the proposed method is by using the sleep and wake mode of the hot or cold standby node in such a way that the spare node is placed parallel to the main node and if one or both nodes are damaged, the system is reversible and the damage can be repaired or replaced. The technique of idle time and the availability of the backup spare sensor play an important role in reducing energy consumption. The experts of the support unit perform the configuration settings so that the equipment goes to sleep or standby mode during idle time. And if one or two nodes are damaged, first the healthy spare node is awake and in service, and then the damaged node is repaired and replaced and placed in standby or sleep mode. The results of the innovation, we can mention the emphasis on node health monitoring, failure avoidance, improving repair and replacement rates and efficiency. The simulation results show a better improvement compared to the previous models.

**Keywords:** Fault tolerance, Node redundancy, Reliability, Standby sensor, Wireless sensor networks.

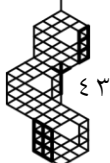
**Received:** 02 November 2023

**Revised:** 04 January 2024

**Accepted:** 29 March 2024

**Corresponding Author:** Dr. Mohammad Ali Pourmina, pourmina@srbiau.ac.ir

DOI: 10.30486/TEEGES.2024.904846





مقاله پژوهشی

## فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

### بررسی قابلیت اطمینان با معماری جدید مدل مارکوف گره پشتیبان با نرخ تعمیر و تعویض بهتر و نظارت بیشتر در پرهیز از خرابی شبکه‌های حسگر بی سیم صنعتی

احمد رضا زمانی<sup>۱</sup>، دانشجوی دکتری، محمدعلی پور مینا<sup>۱</sup>، استاد، رامین شقاقی کندوان<sup>۲</sup>، استادیار

۱- دانشکده گروه مهندسی مکانیک، برق و کامپیوتر واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشکده گروه مهندسی برق و کامپیوتر واحد یادگار امام خمینی(ره) شهر ری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

**چکیده:** گره‌های حسگر به دلیل کاربردهای متنوع محیط‌های عملیاتی، مستعد خرابی هستند. ایده این مقاله، ارائه یک معماری جدید با مدل مارکوف برای بهبود قابلیت اطمینان می‌باشد. در اصلاح ایده‌های قبل با توجه به خستگی کاری، هزینه مصرف انرژی و تعمیرات بالا می‌توان از ایده افزایش نرخ تعمیر و تعویض در پرهیز از خرابی با دردسترس بودن گره‌های جایگزین با برنامه‌ریزی دقیق تعمیرات، بهره برد. مزایای این روش کاهش میزان خرابی، افزایش قابلیت اطمینان، پیاده سازی و استقرار سریع، بهره‌وری انرژی و صرفه‌جویی اقتصادی، بهبود عملکرد و عمر مفید شبکه، کاهش تاخیر و جوان‌سازی و پویایی سیستم می‌باشد. ساختار روش پیشنهادی با استفاده از حالت خواب و بیداری گره آماده به کار سرد یا گرم به گونه‌ای است که گره یدکی به موازات گره اصلی قرار می‌گیرد و در صورت آسیب دیدن یک یا دو گره، سیستم برگشت پذیر می‌باشد و می‌توان خرابی را تعمیر یا جایگزین نمود. تکنیک زمان بیکاری و دردسترس بودن حسگر یدک پشتیبان، نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی دارد. و کارشناسان واحد پشتیبانی تنظیمات پیکربندی را به گونه‌ای انجام می‌دهند تا در زمان بیکاری، تجهیزات به حالت خاموشی یا آماده به کار بروند و در صورت آسیب دیدن یک یا دو گره، ابتدا گره یدکی سالم بیدار و در سرویس و سپس گره آسیب دیده تعمیر و تعویض و در حالت آماده به کار یا خواب قرار گیرد. از نتایج حاصل از نوآوری این روش، تأکید بر نظارت سلامتی گره، جلوگیری از خرابی و بهبود نرخ تعمیر و تعویض، کاهش مصرف و بهره‌وری انرژی می‌توان اشاره نمود. نتایج شبیه‌سازی در مقایسه با مدل‌های قبل، بهبود بهتری را نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** افزونگی گره پشتیبان، تحمل پذیری خطا، حسگر آماده باش، شبکه‌های حسگر بی سیم، قابلیت اطمینان

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۱

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۴

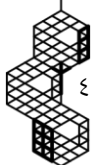
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۱۰

نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمدعلی پورمینا، pourmina@srbiau.ac.ir

DOI: 10.30486/TEEGES.2024.904846



یکی از مهم‌ترین فناوری‌های قرن بیست و چهارم، فناوری اطلاعات سبز<sup>۱</sup>، هوش مصنوعی<sup>۲</sup>، بینایی ماشین<sup>۳</sup>، رباتیک<sup>۴</sup>، سامانه‌های خبره<sup>۵</sup> و یادگیری ماشین<sup>۶</sup>، شبکه‌های حسگر بی‌سیم (WSN) می‌باشند که کاربردهای مختلفی دارند و با استفاده بهینه و پایدار از فناوری اطلاعات در افزایش قابلیت اطمینان و بهبود عملکرد در کاهش مصرف انرژی، حفظ محیط زیست و کاهش اثرات زیست‌محیطی مرتبط با عملکرد تجهیزات سایت نیز اشاره دارد. به طور کلی، استفاده از تکنیک‌ها و روش‌هایی برای کاهش مصرف انرژی، در سیستم‌های واحد پشتیبانی، از جمله حسگرها، سرورها، شبکه‌ها و دستگاه‌ها از موضوعات مهمی هستند که فناوری‌های فوق‌روی آن‌ها تاکید دارند و همچنان نقش هوش مصنوعی در بهینه‌سازی تولید، توزیع و مصرف انرژی، افزایش ثبات شبکه و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بسیار نویدبخش در صنعت انرژی می‌باشد که با استفاده از شبکه‌های هوشمند [۱] و مدیریت پاسخ به تقاضا، مدیریت مصرف انرژی کاربران، بسیار آسان‌تر می‌شود. همچنین هوش مصنوعی در زمینه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، باعث کاهش زمان و میزان خرابی و افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات می‌شود. با پیشرفت فناوری و ادغام بیشتر هوش مصنوعی در سیستم‌های انرژی، می‌توانیم چشم‌انداز انرژی پایدارتر و کارآمدتری را پیش‌بینی کنیم. جهت ارائه بهتر، به مروری بر کارهای گذشته و تحقیقات مشابه، می‌پردازیم. در ارتباطات بی‌سیم در مناطقی که دسترسی فیزیکی به آنها دشوار است، نقش شبکه‌های حسگرهای بی‌سیم، در انتشار و فناوری اطلاعات سبز بسیار حیاتی می‌باشد و به‌کارگیری هوش مصنوعی با استفاده از انواع حسگرها در کنار انسان، جهت پرهیز از غفلت و فراموشی و خستگی پرسنل سایت‌های صنعتی که انتشار اطلاعات درست بسیار حیاتی می‌باشد، در افزایش قابلیت اطمینان، بهبود عملکرد و کاهش مصرف انرژی، در حال گسترش می‌باشد و در صورت خرابی حسگرها، قطعات یدک یا پشتیبان جایگزین شده و قابلیت اطمینان برای دو حسگر محاسبه و مقایسه می‌شود [۲]. به دلیل محدودیت شدید منابع و محیط‌های عملیاتی سخت و دسترس ناپذیر، گره‌های حسگر مستعد خطا، خرابی و تاخیر هستند. خطاها ممکن است در سیستم، منتشر شده و منجر به خرابی کل سیستم شوند. استراتژی جایگزینی و افزایش افزونگی و تاخیر با رویکرد صرفه‌جویی در تعامل هستند. سیستم با یدکی افزونگی سرد، دارای قابلیت اطمینان بالاتری نسبت به سیستم با یدکی گرم است [۳]. قابلیت اطمینان، با تعداد قطعات یدکی بیشتر و تعداد اجزای فعال کمتر متناسب است [۴]. تعامل بین مصرف انرژی و تأخیر تحویل داده‌های قابل اعتماد یا تحویل به‌موقع داده‌ها بین گره منبع و گره مقصد در یک شبکه حسگر بی‌سیم روش (ARQ)<sup>۷</sup> مشارکتی موفق‌تر از روش (ARQ) غیرمشارکتی است [۵]. تحویل مطمئن بسته عملکرد (ARQ) مشارکتی قابل اعتمادتر و اطمینان آن بیشتر و تحویل به‌موقع بسته‌ها بهتر و با تاخیر کمتر انجام می‌شود و (ARQ) غیرمشارکتی از نظر بهره‌وری توان گره‌های حسگر، به دلیل اینکه اکثر حسگرها در فرآیند ارسال بسته شرکت نمی‌کنند، بهتر است [۶]. در صورت بروز خرابی، قابلیت اطمینان و (MTTF) (میانگین زمان تا خرابی) با جایگزینی حسگر معیوب با حضور قطعات یدکی و بدون حضور قطعات یدکی آماده‌به‌کار، بررسی می‌شود [۷]. در مواجهه با خرابی سیستم، در دسترس بودن برنامه‌های نظارتی، پیکربندی مجدد شبکه و سطوح مختلف افزونگی جهت به حداقل رساندن خسارات اقتصادی، آسیب‌های زیست‌محیطی، خطاهای دائمی، اختلال و غیرفعال شدن دستگاه‌های شبکه، برای بهینه‌سازی قابلیت اطمینان با تعداد تجهیزات میدانی (FD)<sup>۸</sup> بیشتر و تعداد یدک یا جایگزینی بیشتر، بسیار موثرتر می‌باشد [۸]. رویکردهای بهبود با روش‌های تحمل خطا و بهبود تکنیک تشخیص خرابی و تجمیع داده با هدف تمرکز بر بهره‌وری انرژی و بهبود طول عمر شبکه و بهبود (QoS)، طبقه‌بندی و مدل‌سازی شده است [۹]. در اتوماسیون صنعتی و کنترل فرآیند<sup>۹</sup> (IAPC) برای کاربردهای بلادرنگ صنعتی، پروتکل مسیریابی<sup>۱۰</sup> (RRR)، تحویل داده به مرکز کنترل در مهلت از پیش تعیین شده، بر اساس زمان مناسب مهلت ارسال و یا زمان واقعی قابل دریافت، نرخ دریافت بسته و تحویل به‌موقع داده را بهبود می‌بخشد و بسته را در زمان مهلت بهینه، ارسال می‌کند [۱۰]. ارزیابی پارامترهای خرابی و طول عمر گره حسگر بی‌سیم تحت سه سناریوی کاری بر اساس حالت‌های گره حسگر (خواب و فعال) و مکانیسم متناوب بین حالت‌ها، تعریف و مقایسه می‌شود و سناریو موازی طولانی‌ترین طول عمر و مکانیسم متناوب بین حالت‌ها، قابل اطمینان و به صرفه‌ترین حالت را ارائه می‌دهد [۱۱]. الگوریتم تشخیص عیب و افزونگی در نرخ‌های خرابی بالا، (MTTF) و قابلیت اطمینان مدل (FT)<sup>۱۱</sup> نسبت به (NFT)<sup>۱۲</sup> بهبود بهتری را دارد و استفاده از گره‌های یدک پشتیبان مدل دو قسمتی و سه قسمتی (گره‌های حسگر سه‌تایی) بهبود خوبی در (MTTF) دارند [۱۲]. تحویل داده در زمان مهلت ارسال بسته از طریق انرژی گره کارآمد، ترافیک را به‌طور یکنواخت توزیع می‌کند و نتایج نشان دهنده افزایش و بهبود تحویل به‌موقع داده و افزایش طول عمر شبکه می‌باشد [۱۳]. یک پروتکل مسیریابی مبتنی بر دو هاب که بر اساس اطلاعات دو هاب همسایه<sup>۱۳</sup> (IWSN) کار می‌کند با به حداقل





رساندن راه‌اندازی، مسیر تحویل بسته سرتاسری را بهبود می‌بخشد و ارتباطات چند کاناله راهی برای بهبود قابلیت اطمینان و تحویل به‌موقع داده به گره مقصد از طریق گره‌های دیگر و ارتباط پیوند ارتباطی دارند که بتوان تضمین کیفیت خدمات و تحویل به‌موقع داده را با پروتکل مسیریابی جدید، ارائه داد [۱۴]. حساسیت  $R(S)^{14}$  نسبت به تغییرات احتمال خرابی (در معرض خرابی اجزای مختلف) از جمله خرابی حسگر، فرستنده، گیرنده، پردازنده و باتری بیانگر آن است که قابلیت اطمینان حسگر، فرستنده، پردازنده و باتری به ترتیب کمتر می‌شود و یا احتمال خرابی حسگر، فرستنده، پردازنده و باتری به ترتیب بیشتر می‌شود و قابلیت اطمینان و دقت مدل سه‌حالته (روشن، رله و خاموش) بهتر از مدل ساده دوحالته (روشن و خاموش) می‌شود [۱۵]. استراتژی نظارت و زمان عملکرد بهینه، زمان تعمیر و جایگزینی، زمان تست عملکرد و زمان بین دو خرابی  $^{15}$  (MTBF) بستگی به دوران نظارت و تعمیر و نگهداری و کنترل دارد؛ یعنی نظارت بیشتر بر عملکرد حسگرها، متناسب با عیب‌یابی سریعتر و تعمیرات دقیق‌تر می‌باشد و لذا، قطعات یدک سریعتر تامین و جایگزین شده و زمان بین دو خرابی حسگرها (MTBF) بیشتر شده و مدت زمان عملکرد بهینه افزایش می‌یابد و با داشتن برنامه‌های متنوع و کاربردی مرتبط در شبکه‌های نسل بعدی و اینترنت چیزها، ماموریت‌های حیاتی و ایمنی، فراهم می‌شود [۱۶]. به دلیل اینکه انسان یک موجود غیرقابل کنترل و غیرقابل پیش‌بینی می‌باشد و رفتار انسان در مدیریت بر مشکلات سیستم‌های فیزیکی سایبری (CPS) تحت تأثیر محیط قرار می‌گیرد؛ لذا توسعه، ارزیابی و تجزیه و تحلیل فن‌آوری جامع خودمدیریتی، شباهت بین درستی و قابل‌اعتماد بودن و حوزه‌های مدیریت خطا، رفع چالش‌ها جهت نگهداری، تعمیر و جایگزینی ضروری می‌باشد. توسعه و نگهداری (CPS) نیازمند توسعه فناوری مدیریت پروژه و استانداردسازی آن می‌باشد. راه‌حل کاهش پیچیدگی برنامه‌ها، جداسازی عناصر فیزیکی، مدیریت معماری، منطق عملکرد فرآیند، می‌باشد و باعث بهبود قابلیت اطمینان، انعطاف‌پذیری و سازگاری (CPS) می‌شود. هنگام تغییرات، سازگاری با محیط جدید بسیار زمان‌بر و هزینه‌بر است از طرفی جمع‌آوری داده‌های خطا به‌خاطر رفتار خطا در فرکانس پایین، بسیار سخت می‌باشد لذا با استفاده از روش یادگیری ماشین (ML)  $^{16}$  نظارت و کاهش پیچیدگی، انجام می‌شود به‌دلیل تعدد سناریوها، طبقه بندی سناریوها با استفاده از زیرسیستم‌ها توصیه می‌شود [۱۷]. تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان و در دسترس بودن یک سیستم گره حسگر بی‌سیم قابل تعمیر سه قسمتی متشکل از سه گره حسگر یکسان در واحد تعمیر تحت یک مرکز تعمیر مشترک، وقتی یک گره حسگر فعال از کار بیفتد یا خراب شود، بلافاصله تسهیلات تعمیر روشن می‌شود و طبق خط‌مشی، تعمیرات انجام می‌شود. میانگین زمان تا خرابی سیستم (MTTF) و در دسترس بودن حالت پایدار  $^{17}$  (SSA) با نرخ خرابی قطعات و نرخ تعمیر، تجزیه و تحلیل می‌شود [۱۸]. استفاده از تیم‌های متخصص تعمیر و نگهداری و نظارت در از بین بردن ایرادها، قبل از وقوع خرابی ضروری است و تیم نگهداری نسبت به تعمیرات در اولویت می‌باشد؛ چراکه نگهداری کار فکری، نظارت جهت پیشگیری از وقوع عیب و عدم از کار افتادن حتی یک جزء از سیستم می‌باشد و کار تعمیر، بطوردرستی ویا اتومات در قبال رفع عیب و بعد از وقوع عیب می‌باشد و منجر به از کار افتادن یک جزء از سیستم تا رفع عیب، می‌شود [۱۹]. کارخانه هوشمند، سیستم‌های کنترل شبکه بی‌سیم (NCS)  $^{18}$  جهت هوشمندسازی کارخانه‌ها و کنترل فرآیندهای صنعتی می‌باشد که در آن حسگر، کنترل کننده و محرک‌ها یک سیستم کنترل بر روی یک شبکه توزیع قرار دارد به منظور دستیابی به کنترل کیفیت مطلوب  $^{19}$  (QoC) و الزامات قابلیت اطمینان جهت محاسبه تاخیر بسته‌های داده، از طریق پردازش ارتباط بی‌سیم انجام می‌شود [۲۰]. مقایسه سه مدل (سری، هیبریدی و موازی) به‌صورت (RBD) نشان می‌دهد که کم‌اعتمادترین مدل، مدل سری می‌باشد که در آن خرابی یک گره واحد، عملکرد شبکه را به خطر می‌اندازد و کاربرد کمی دارد و قابل اطمینان‌ترین مدل، مدل هیبریدی و موازی است و مدل ترکیبی نتایج قابل اعتمادتری را ارائه می‌دهد [۲۱]. الگوریتم مبتنی بر (CTMC)  $^{20}$  برای به حداقل رساندن هزینه‌های تحویل و مسیریابی و ذخیره‌سازی داده از طریق استقرار گره ذخیره، طراحی شده است [۲۲]. طراحی قوی و رفع پیچیدگی به انعطاف‌پذیری سیستم نیز کمک می‌کند [۲۳]. داده‌ها باید با حداقل تاخیر و حداکثر قابلیت اطمینان منتقل شوند و تأخیر و قابلیت اطمینان مخالف همدیگرند. با بهینه‌سازی تأخیر مسیره‌ها، قابلیت اطمینان افزایش می‌یابد و مسیره‌هایی که انرژی بیشتری مصرف می‌کنند، طول عمر کمتری دارند و با تأخیر بیشتری مواجه می‌شوند و کمتر قابل اعتماد هستند و مسیره‌هایی که انرژی کمتری مصرف می‌کنند، طول عمر بیشتری دارند و با تأخیر کمتری مواجه می‌شوند و قابل اطمینان‌ترند. و همچنین اندازه شبکه بزرگتر، قابلیت اطمینان را کاهش و تأخیر را بیشتر می‌کند [۲۴]. و در نهایت در سال ۲۰۲۲ مقاله " پروتکل تأخیر- قابلیت اطمینان سازگار و تضمین کیفیت خدمات پیام‌رسانی از راه دور اینترنت اشیا" با هدف بررسی قابلیت اطمینان اینترنت اشیا به دلیل استفاده از پهنای باند بالا و پیاده‌سازی ساده، با استراتژی بهینه‌سازی نسبت تلفات بسته، انتقال داده قابل اعتماد و به‌حداقل رساندن تاخیر بررسی شد. مسئله بهینه‌سازی کیفیت مطلوب خدمات در سطوح مختلف، برای به‌حداقل رساندن تلفات بسته و کاهش تاخیر و ارتقای قابلیت اطمینان، از طریق تعامل



پویا با محیط، انجام می شود. الگوریتم بهینه سازی خدمات باکیفیت، توسط یک پیام آگاه از تاخیر، مجموع وزنی تاخیر و تلفات بسته را کاهش و کیفیت متمایز خدمات اینترنت اشیا را بهبود می دهد که با افزایش سرعت تبادل داده (V)، تأخیر کمتر و نسبت تلفات بسته بیشتر می شود؛ در حالی که برعکس با کاهش سرعت تبادل (V) و ایجاد ترافیک و صف، تاخیر بیشتر و نسبت تلفات بسته کمتر می گردد و به صورت پویا جهت حفظ تعادل بین کاهش تلفات بسته و تأخیر با تنظیم مقدار سرعت، خدمات متمایز (QoS) را می توان برآورد نمود. نتایج نشان می دهد که با تنظیم سرعت متناسب (V) در کاربردهای عملی می توان پارامترهای هر شبکه را تنظیم نمود [۲۵].

## ۱-۱- سازمان دهی مقاله

ساختار مقاله در ادامه بدین شرح است: در قسمت دوم، جهت روش آماده نمودن روندکار، ابتدا مروری بر کارهای مرتبط قبل نموده و انواع مدل های سیستم های جایگزینی ارائه شده است. سیستم فیزیکی دو یدک پشتیبان با عملکرد تعمیر یک خرابی و امکان جایگزینی یک حالت به دلیل ماهیت حالت گرم نیز بررسی شده است؛ در قسمت سوم، کاربردهای مقاله و چالشها و بررسی شرایط بحرانی و گذرا و رسیدن به شرایط پایدار توسط الگوریتم مدل پیشنهادی تشریح و بررسی شده است؛ در قسمت چهارم، نوآوری کار، مدل سازی سیستم دو یدک پشتیبان با عملکرد تعمیر دو خرابی و امکان جایگزینی دو حالت طبق مدل مارکوف، تشریح و خلاصه شده است و تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان دو حسگر مشابه اصلی و آماده باش و امکان تعمیر یا تعویض دو خرابی به دلیل ماهیت حالت سرد به همراه روابط ریاضی به منظور بهبود قابلیت اطمینان، ارائه شده است. در قسمت پنجم، ارزیابی و نتایج شبیه سازی کار پیشنهادی، ارائه و مقایسه شده است. در نهایت در قسمت ششم، نتیجه گیری انجام شده است.

## ۲- مرور آخرین فعالیتهای مرتبط و مشارکت و مقایسه آنها

اطلاعات فرآیندی توسط حسگرها در لایه فیزیکی به اتاق کنترل مرکزی یا مرکز مانیتورینگ، جهت نظارت و کنترل سایت صنعتی، ارسال می شوند. موضوع و تمرکز این مقاله، تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان با ارائه معماری جدید می باشد. یکی از مهم ترین معیارهای عملکرد در محیط های صنعتی قابلیت اطمینان می باشد و سطح قابلیت اطمینان شبکه را می توان با استفاده از ابزاری به نام مدل سازی قابلیت اطمینان ارزیابی کرد. قابلیت اطمینان انواع مختلف حسگرهای بی سیم و سیمی، با استفاده از مدل مارکوف به کمک در سرویس قرارگیری قطعات یدکی بررسی می شود [۲]. پیشگیری از خسارات جبران ناپذیر حوادث احتمالی و خرابی های ناگهانی واحدهای فرآیندی در صنعت کنترل فرآیند و ارتباطات داده ضروری است. ارزش و اهمیت کار نسبت به کارهای قبل افزایش نرخ جایگزینی گره های خراب و تعمیر و تعویض به موقع خرابی، در زمان نقطه شروع خرابی حسگر اصلی با یدک و حسگر سالم با معیوب می باشد و برنامه های کاربردی، معماری، چالشها، تهدیدها و فرصتها و راه حل های مدل پیشنهادی و تفاوت با کارهای قبلی و مسیرهای آینده تحقیق نیز مورد بررسی قرار می گیرند. همچنین این روش از به کارگیری سه حسگر پشتیبان که همیشه صرفه اقتصادی ندارد و در مواقع اضطراری کاربرد دارد، جلوگیری و قابلیت اطمینان را بهتر پوشش می دهد. همچنین با توجه به اینکه ساختار روش پیشنهادی با استفاده از حالت خواب و بیداری گره آماده به کار سرد یا گرم به گونه ای است که گره یدکی به موازات گره اصلی قرار می گیرد و در صورت آسیب دیدن یک یا دو گره، سیستم برگشت پذیر می باشد و می توان خرابی را تعمیر یا جایگزین نمود و استفاده از تکنیک هایی مثل زمان بیکاری در ارتباط با تجهیزات دارای پشتیبان و در دسترس بودن حسگر یدک، نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی دارد. برای این منظور کارشناسان واحد پشتیبانی تعمیر و تعویض در پرهیز از خرابی باید تنظیمات پیکربندی را به گونه ای انجام دهند تا در زمان بیکاری، تجهیزات به حالت خاموش یا به عبارت دقیق تر آماده به کار بروند و در صورت آسیب دیدن یک یا هر دو گره، ابتدا گره یدکی سالم بیدار و در سرویس بیاید و در اولویت بعدی، گره آسیب دیده تعمیر و در نهایت تعویض بشود و مجدداً در حالت آماده به کار یا حالت خواب قرار گیرد و به عبارتی انرژی مصرفی به طور قابل توجهی کاهش می یابد و باعث بهره وری انرژی و صرفه جویی اقتصادی و نیل به فناوری اطلاعات سبز و رایانش سبز و در نتیجه انرژی سبز نیز می شود. در این مقاله، هدف رایانش سبز با مدیریت مصرف انرژی حسگرها و تجهیزات مستقر در سایت صنعتی، با قابلیت پشتیبانی حالت خواب و بیداری گره ها نیز برآورد شده است. در ابتدا به تعریف متغیرها طبق جدول (۱) می پردازیم که هر یک از عناصر و پارامترهای جدول در جایگاه خود تشریح می گردد.



جدول (۱): پارامترها و تعاریف مورد استفاده در محاسبه قابلیت اطمینان (تعریف متغیرها)

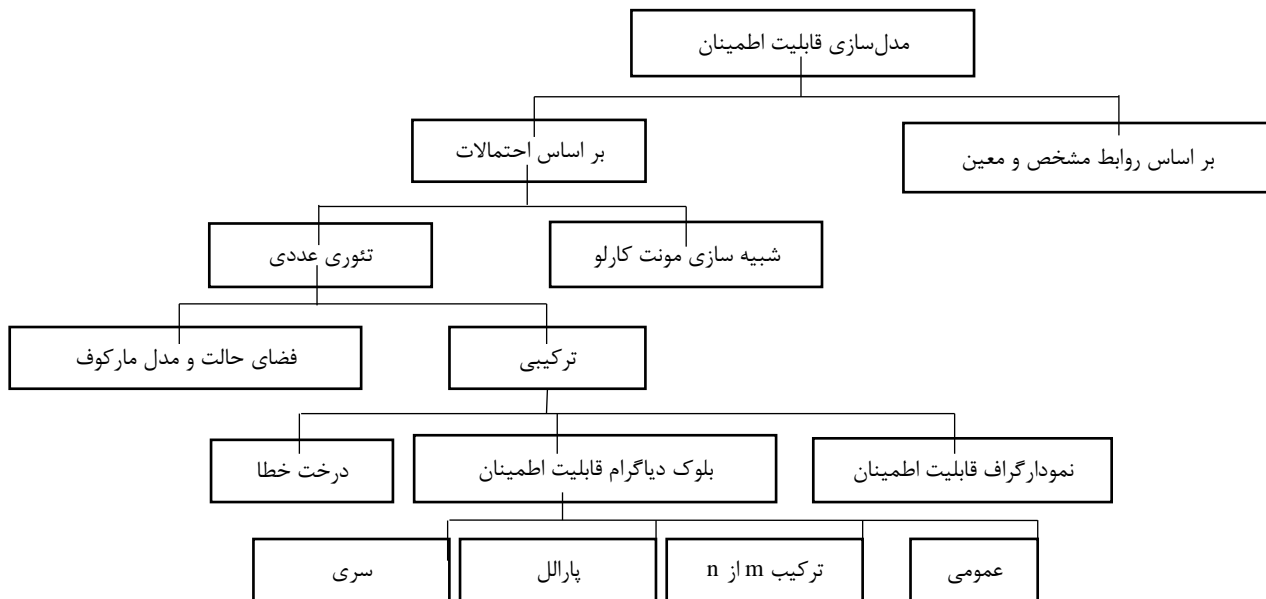
شماره	پارامتر	تعریف	شماره	پارامتر	تعریف
۱	$R(t)$	قابلیت اطمینان	۸	$p_k$ یا $p_k(t)$	احتمال عملکرد حالتهای مختلف
۲	$Q(t)$	عدم قابلیت اعتماد	۹	S	فضای حالت
۳	MTTF	متوسط زمان تا خرابی	۱۰	R	شعاع پرش
۴	$\lambda$ یا $\beta$	نرخ شکست یا خرابی حسگر	۱۱	H	ارتباط
۵	$\mu$ یا $r$	نرخ جایگزینی یدک	۱۲	TC(R,H)	میزان تاخیر ارسال بسته حالت مشارکتی
۶	MTBF	میانگین مدت زمان ما بین دو خرابی متوالی	۱۳	TNC(R,H)	میزان تاخیر ارسال بسته حالت غیرمشارکتی
۷	MTTR	میانگین زمان تعمیر و تعویض	۱۴	V و t	سرعت تبادل داده و زمان کارکرد

ایده اصلی در این پژوهش، تجزیه و تحلیل مسائل قابلیت اطمینان جهت تحمل‌پذیری خرابی و خطا در یک سیستم شبکه حسگر و (MTTF)<sup>۲۱</sup> حسگرها را بررسی می‌کند. تحقیقات متمرکز بر روی روشی برای ارائه یک شبکه کارجایگزین به موقع قطعات حسگر معیوب یا خراب با قطعات یدکی سالم، جهت اطمینان از عملکرد صحیح سیستم می‌باشد؛ به‌طوری‌که حداکثر طول عمر شبکه حسگر در تحمل-پذیری خطا بدون به‌خطر افتادن عملکرد شبکه، لحاظ شود. یکی از مهمترین پارامترهای هر سیستمی، قابلیت اطمینان جهت ایجاد اطمینان از کارکرد صحیح حسگرها و قطعات یدکی می‌باشد که با  $R(t)$  نمایش داده می‌شود. ساختار این مقاله ارائه یک معماری جدید قابلیت اطمینان برای بیان کارکرد صحیح مجموعه‌ای از گره‌ها در طی دوره زمانی مشخص جهت انتقال داده و یا عملکرد تجهیزات می‌باشد و محاسبه  $R(t)$  بر اساس احتمالات و شرایط عدم قطعیت بنا شده است. قابلیت اعتماد احتمال آن است که یک جزء از سیستم تا زمان  $t$  به فعالیت خود ادامه دهد و برای بهبود عملکرد شبکه بتوان طول عمر مفید تجهیزات را بیشتر نمود. تحمل خرابی سیستم، نوعی توانایی است که بعد از آنکه در هر یک از قسمت‌های آن خطا اتفاق افتاد، شبکه بتواند به عملیاتش ادامه دهد. برآورد قابلیت اعتماد دستگاه‌ها و تجهیزات سیستم می‌تواند در فضای رقابتی کارخانه‌ها و تولیدکنندگان، برای تجزیه و تحلیل مسائل قابلیت اطمینان شبکه‌های حسگر هوشمند بی‌سیم<sup>۲۲</sup> موثر واقع شود. هدف اصلی اطمینان، تطبیق با آخرین پیشرفت‌های فناوری نگهداشت مبتنی بر قابلیت اطمینان<sup>۲۳</sup> و برنامه‌های کاربردی (IoT)<sup>۲۴</sup> و (CPS)<sup>۲۵</sup> مبتنی بر (WSN) می‌باشد و بسیار مهم است که سیستم (WSN) در برابر خرابی قطعات، مقاوم باشد؛ افزایش گره‌ها و نرخ جانمایی<sup>۲۶</sup>  $r$  و کاهش نرخ خرابی<sup>۲۷</sup>  $\beta$  با گذر طول عمر تجهیزات در مدل کاربردی پیشنهادی در بهبود قابلیت اطمینان در لایه‌های مختلف مخابراتی قابل بررسی است. حسگرها<sup>۲۸</sup> و محرک‌ها<sup>۲۹</sup> اطلاعات را از طریق سنجش، جمع‌آوری و سپس به سیستم کنترل مرکزی جهت عملیات و مدیریت نظارت و کنترل فرایندها انتقال می‌دهند [۲۰]. ما در مدل‌های خود لوازم یدکی گرم یا آماده به کار را در نظر می‌گیریم؛ به‌طوری‌که بلافاصله حسگر خراب را بایستی تعویض نمود و یا فاصله بین لحظه خرابی حسگر و لحظه‌ای که لوازم یدکی جایگزین می‌شوند را بسیار کم نمود و در مدل‌های مختلف نرخ خرابی را مطالعه کرده و با مدلی شروع می‌کنیم که در آن قطعات یدکی مختلف، برای حسگرهای مختلف وجود دارند که می‌توانند جایگزین شوند [۳]. در این راستا، باید به دو راه حل توجه نمود. برای دستیابی به قابلیت اطمینان بهتر سیستم، یک راه حل، بهبود کیفیت قطعات یدکی و راه حل بعدی، افزایش تعداد لوازم یدکی است [۴]. ایده مدل مارکوف، برای تجزیه و تحلیل مسائل قابلیت اطمینان دستگاه‌ها و برآورد تحمل‌پذیری خطا و بهبود قابلیت اطمینان در یک سیستم شبکه حسگر بی‌سیم جهت حداکثر طول عمر شبکه با استفاده از انواع مختلف حسگرها می‌باشد که برای دستیابی به تحمل‌پذیری خطا، قطعات یدکی می‌توانند جایگزین اجزای معیوب و حسگرهای خراب شوند و میزان خرابی را با  $\lambda$  یا  $\beta$  و نرخ تعمیر و جایگزینی را با  $\mu$  یا  $r$  نمایش می‌دهیم. با حل معادلات مارکوف و معلوم بودن متوسط میزان خرابی و یا تعیین نرخ تعمیر و جایگزینی، تابع دسترسی و اطمینان‌پذیری  $R(t)$  به دست می‌آید و با نرخهای مختلف  $\lambda$  یا  $\beta$  و  $\mu$  یا  $r$  قابل مقایسه است. با توجه به آنکه یکی از چالش‌های اصلی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، اجتناب‌ناپذیری از خطا، خرابی و تاخیر می‌باشد که با روش‌هایی در مدل پیشنهادی از انتقال مطمئن داده تا گره مقصد، اطمینان حاصل می‌شود.



## ۱-۲- روشهای مدل‌سازی و تحلیل قابلیت اطمینان

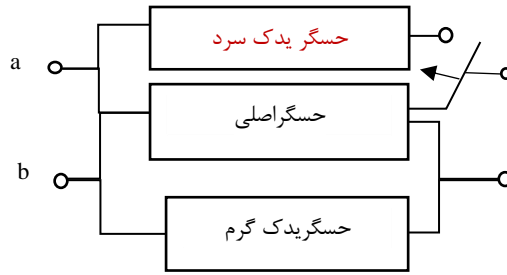
طبقه‌بندی روش‌های اساسی مدل‌سازی قابلیت اطمینان در زمینه شبکه‌های حسگر بی‌سیم صنعتی (IWSN) طبق شکل (۱) می‌تواند بر اساس روابط مشخص و معین و یا بر اساس احتمالات، مدل‌سازی شود. مدل بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان (RBD) به دلیل سادگی به عنوان یکی از کاربردی‌ترین ابزارهای مدل‌سازی قابلیت اطمینان، به طور گسترده در حسگرها، میکروکنترلر، حافظه، سیستم عامل و کانال بصورت (سری، ترکیبی و موازی) مورد استفاده قرار می‌گیرد و مدل موازی، قابل اطمینان‌ترین مدل است [۱۱]. وقوع خرابی اجزای سیستم با روش درخت خطا نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد و شاخه کاری این پروژه در مورد مدل مارکوف با استفاده از فضای حالت و بصورت موازی قابل بررسی است [۲۱].



شکل (۱): طبقه‌بندی روش‌های اساسی مدل‌سازی قابلیت اطمینان در کارهای موجود در زمینه (WSN) [۹]

## ۲-۲- ساختار سیستم موازی با حسگر یدک گرم و سرد

شبکه حسگر مستعد خطا و خرابی می‌باشد که اولین گام تشخیص عیب، می‌باشد و قدم بعدی پیشگیری جهت بهبود یا تعمیر خرابی است و قدم آخر در صورت عدم تعمیر به موقع، تعویض و جایگزینی قطعه معیوب می‌باشد. لازمه ماندگاری سیستم استفاده از بلوک موازی می‌باشد که در غیاب حسگر خراب، در سرویس قرار می‌گیرد. ساختار موازی سیستم در بهبود اطمینان پذیری کل شبکه کارایی بهتری دارد؛ لذا می‌توان از دو گره حسگر که به صورت موازی و دو قسمتی متصل شده، بهره برد [۱۱، ۱۵، ۲۶]. در شکل (۲) ساختار موازی سیستم به صورت حسگر یدک گرم و یدک سرد ترسیم شده است و ما از آن بهره می‌بریم [۳]. فضای حالت دارای دو عضو  $S = \{ \text{فعال، غیر فعال} \}$ ، حالت غیرفعال یا یدک دارای دو حالت {سالم، خراب} و یا {منتظر سالم، منتظر تعمیر} با تعداد حالات {سالم، منتظر سالم} - {سالم، منتظر تعمیر} = خراب - {منتظر تعمیر، منتظر تعمیر} متشکل از دو گره حسگر فعال و سالم در حالت یدک گرم و یا یک حسگر فعال و یک حسگر منتظر سالم در حالت یدک سرد و یا یک حسگر فعال و دیگری خراب و منتظر تعمیر، و در نهایت هر دو خراب و منتظر تعمیر، به ترتیب از بهترین تا بدترین حالت می‌باشد [۲۶]. هدف ما بررسی جامع مدل مارکوف برای تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان با استراتژی نظارت بر گره‌ها با امکان تعمیر دو خرابی می‌باشد با توجه به آنکه احتمال وقوع آن خیلی کم است.

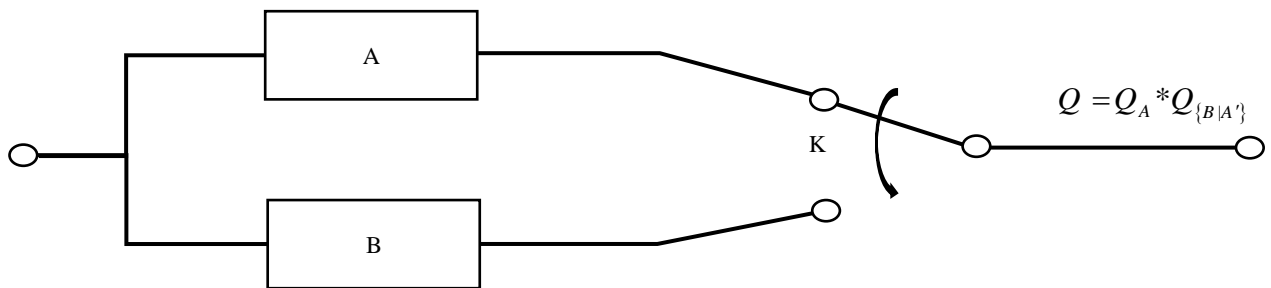


شکل (۲) ساختار سیستم یدک سرد a و مقایسه با سیستم موازی یا یدک گرم b

طبق شکل (۲) و (۳) جهت ارائه معماری به صورت ایده جدید الهام گرفته و از آن در شکل‌های (۸) به بعد، استفاده می‌نمائیم.

### ۲-۳- ساختار سیستم کشیک یا یدک سرد

در شکل (۳) سیستم حالت یدک آماده‌باش یا سرد ترسیم شده است در این سیستم حسگر B غیرفعال و یدک، حسگر A اصلی و فعال می‌باشد و حسگر B در وقوع خرابی، با تاخیر ناچیز کلید K تعویض و در سرویس قرار می‌گیرد یا حسگر پشتیبان در وقوع عیب و خرابی حسگر اصلی در سرویس می‌آید و با حالت سیستم موازی، که همیشه هر دو فعال یا درگیر هستند، متفاوت است و حالت یدک سرد دارای قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به حالت یدک گرم یا موازی [۲۰، ۲۵]. حالت یدک گرم تاخیری ندارد، ولی قابلیت اطمینان در ابتدا زیاد است و به مرور کم می‌شود و حالت یدک سرد قابلیت اطمینان بخاطر وجود ریسک تاخیر و وقفه در ابتدا کم است و اگر بدون تاخیر در سرویس قرار بگیرد به خاطر اینکه حسگر در حال استراحت بوده قابلیت اطمینان بیشتری دارد و اینکه آیا سیستم با جایگزین سریع یا تعمیر در زمان مجاز امکان برگشت دارد و کلیه این شرایط کاربرد سیستم در حالت گرم و سرد را مشخص می‌کند.

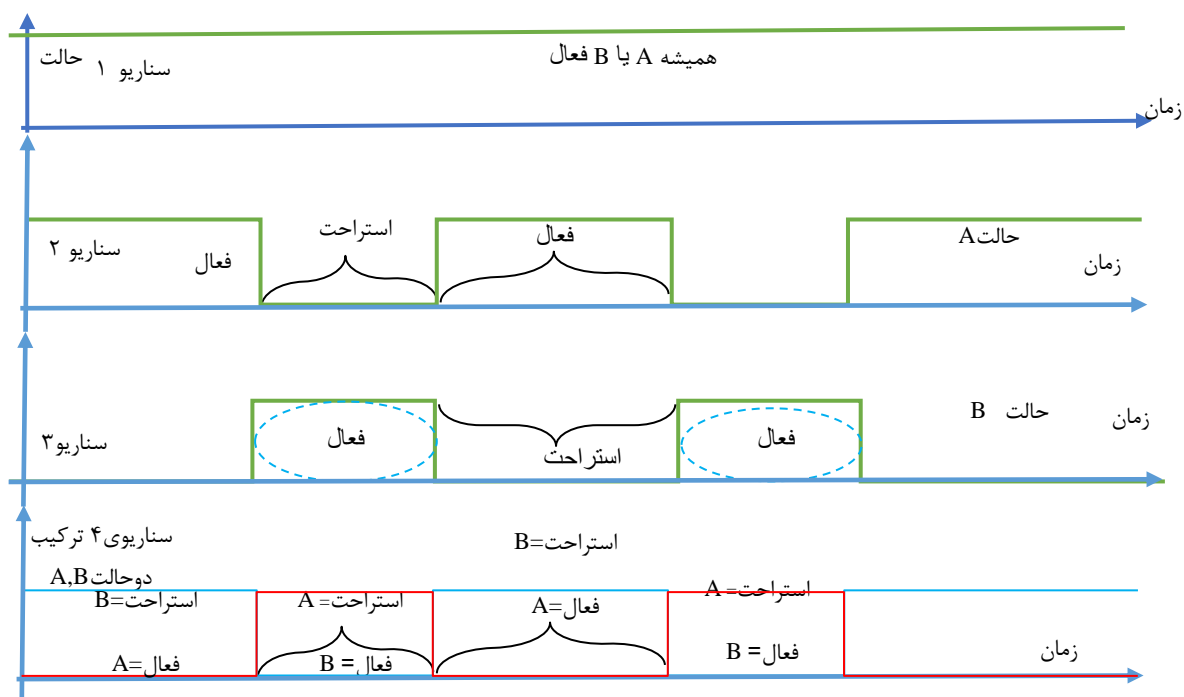


شکل (۳): ساختار سیستم کشیک یا یدک سرد [۲۶]

همانطور که مشاهده شد حالت سیستم موازی و همیشه فعال (سیستم گرم) با سیستم حالت آماده‌باش و غیرفعال (سیستم سرد) بسیار متفاوت است. اولی حسگر اصلی با حسگر کشیک همیشه سرویس و دارای قابلیت اطمینان بیشتر، بدون تاخیر با مصرف انرژی بیشتر نسبت به حالت سرد می‌باشد و در سیستم سرد حسگر پشتیبان در وقوع عیب و خرابی حسگر اصلی، بیدار و در سرویس می‌آید و لذا در مصرف انرژی صرفه‌جویی، اما اطمینان کمتر و تاخیر وجود دارد و ذکر این نکته ضروری است که قابلیت اطمینان در ابتدا زیاد و به تدریج که تجهیز درگیر است کم می‌شود. حسگری که اکثر اوقات سرویس است از عمر مفید تجهیز کم می‌شود و قابلیت اطمینان آن در طول زمان کمتر می‌شود و حسگری که گاهی سرویس می‌آید و بیشتر آماده‌باش است قابلیت اطمینان بیشتری دارد و لذا، طبق نتایج شکل (۶) و شکل (۷) سیستم گرم به تعداد حسگر بیشتری نسبت به سیستم یدک سرد برای رسیدن به قابلیت اطمینان مطلوب نیاز دارد. طبق شکل (۴) ترکیبی از همه‌ی گره‌های داخل ناحیه پوشش فرستنده در وضعیت شنودگی هستند. در این وضعیت، پروتکل MAC که برای شبکه‌های (WSN)، پروتکلی که براساس (duty cycle) کار می‌کند و بر اساس این پروتکل، وضعیت شنودگی یا گوش به



زنگ<sup>۳۰</sup> زمانی است که گره‌ها در وضعیت بیداری<sup>۳۱</sup> باشند و در زمان استراحت گره‌ها در وضعیت خواب هستند [۱۱، ۲۷]. در شکل (۴) چهار سناریوی کاری بر اساس حالت‌های گره حسگر تعریف می‌شود. سناریو ۱ یک گره حسگر همیشه فعال و در حال کار می‌باشد. که در این سناریو، هیچ طرح (خواب/بیداری) برای سیکل کاری حسگر اعمال نمی‌شود و خستگی حسگر به دلیل کار ممتد کاملاً مشهود است. سناریو ۲ و ۳ مکانیسم متناوب گره حسگر بین دو حالت (خواب و فعال) تغییر می‌کند با تفاوت اینکه سیکل کاری طرح‌ها عکس همدیگر می‌باشد و در حالت خواب انرژی کمتری و در زمان فعالیت انرژی بیشتری مصرف می‌کند. به طور کلی، ساختار سناریو ۲ و ۳ موازی طولانی‌ترین طول عمر را در میان ۴ سناریو ارائه می‌دهد و نتایج خاص به پارامترهای انتخاب شده بستگی دارد و سناریوی ۳ قابل اطمینان‌ترین حالت است و در سناریوی ۴، ادغام دو سناریوی قبل مکانیسم متناوب بین حالت‌ها (خواب و فعال) می‌باشد و دو گره حسگر به طور متناوب بین حالت خواب و فعال تغییر می‌کنند و طرح (خواب/بیداری) برای سیکل کاری هر حسگر اعمال می‌شود و انجام کار بین دو حسگر پشتیبان به طور متناوب تکرار می‌شود و خستگی حسگرها پوشش داده می‌شود [۱۱، ۲۷].

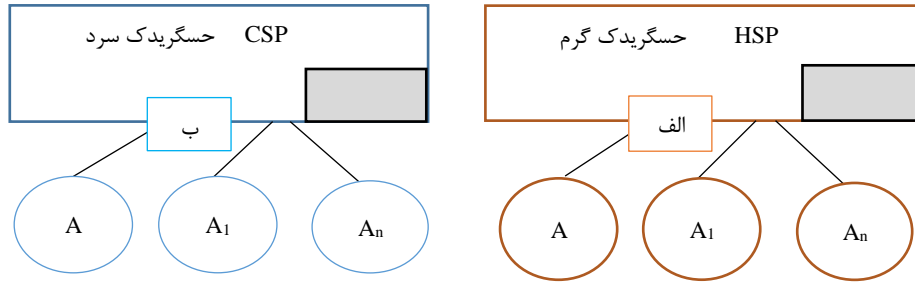


شکل (۴): ساختار سیستم یدک در وضعیت خواب و فعال در چهار سناریوی مختلف [۱۱، ۲۷].

در شکل (۵-الف) مدل سیستم موازی با  $n+1$  حسگر و کشیک با یدک گرم و (۵-ب) با یدک سرد ترسیم شده است. خرابی یدک با فضای حالت به روش مارکوف در حل مسئله استفاده می‌شود. وقتی حسگر A فعال است یدک در حالت کشیک<sup>۳۲</sup> است و وقتی حسگر اصلی خراب شود، حسگر یدک  $A_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) وارد عمل می‌شود [۷، ۸]. برای سادگی در همه حسگرها نرخ خرابی با توزیع نمایی و با  $\beta$  فرض می‌شود [۱۱، ۲۸]. برای شکل (۳) با یدک سرد، اگر تمام حسگرها خراب شوند یا عدم اطمینان پذیری سیستم با احتمال اینکه همه اجزای آن خراب شوند [۱۲]. در نتیجه محاسبه قابلیت اطمینان در حالت آماده‌باش از رابطه (۱) و در حالت یدک گرم (سیستم موازی) از رابطه (۲) به دست می‌آید و در این روابط (۱) و (۲)  $Q_A$  و  $Q_B$  نشان‌دهنده عدم قابلیت اعتماد سیستم A, B و  $R_A$  نشان‌دهنده قابلیت اطمینان گره حسگر اولیه A و  $R_{A_i}$  نشان‌دهنده قابلیت اطمینان حسگرهای یدک  $A_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) در حالت کشیک یا آماده‌باش یدک گرم می‌باشد.

$$Q = Q_A Q_{\{B|A\}} \quad (1)$$

$$Q = Q_A Q_B \quad (2)$$



شکل (۵): مدل سیستم موازی با  $n+1$  حسگر یدک گرم (الف) یدک سرد (ب) [۹]

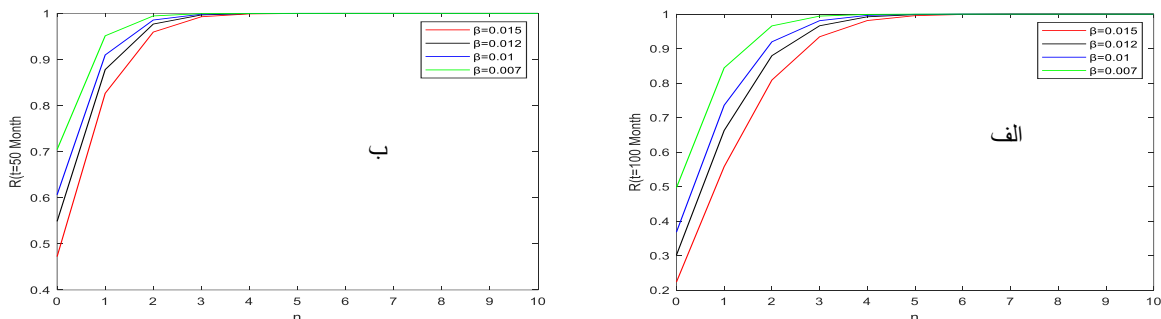
بنابراین قابلیت اطمینان حالت کلی سیستم  $n$  یدک گرم یا سیستم موازی طبق شکل (۵-الف) از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$R(t) = 1 - (1 - R_A)^n \cdot \prod_{i=1}^n (1 - R_{Ai}) = 1 - (1 - e^{-\beta t})^{n+1} \quad (۳)$$

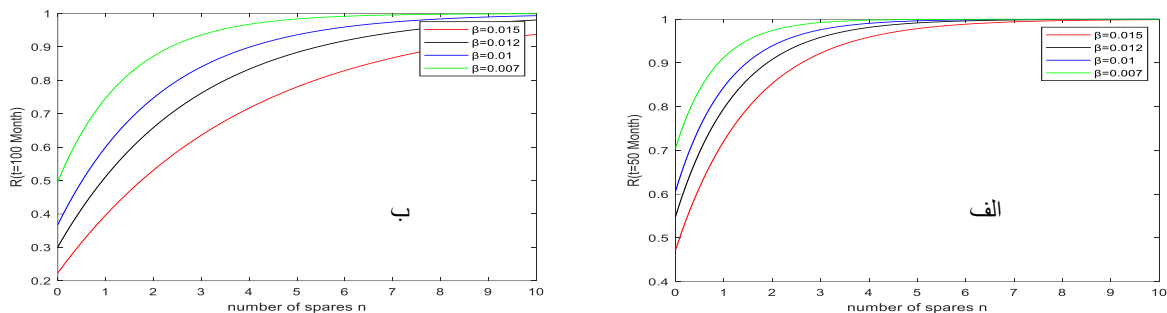
قابلیت اطمینان حالت کلی سیستم  $n$  یدک سرد در حال کشیک طبق شکل (۵-ب) از رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$R(t) = \left( \sum_{i=0}^n \frac{\beta t^i}{i!} \right) e^{-\beta t} = \left( 1 + \beta t + \frac{(\beta t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\beta t)^n}{n!} \right) e^{-\beta t} \quad (۴)$$

نتایج شبیه‌سازی برای دو طول عمر ساختار موازی با یدک سرد طبق شکل (۶-الف) و (۶-ب) ۵۰ ماه، و برای ساختار موازی با یدک گرم طبق شکل (۷-الف) و (۷-ب) ۵۰ ماه، می‌باشد [۲]. می‌دانیم قابلیت اعتمادپذیری سیستم در شروع به کار سیستم دارای بالاترین میزان است و با طول عمر، این قابلیت کاهش می‌یابد. با فرض تعداد گره حسگر، از صفر تا ده یدک وجود داشته باشد [۲] و برای نرخ های خرابی متفاوت  $\beta = 0.015, \beta = 0.012, \beta = 0.01, \beta = 0.007$  شبیه‌سازی‌ها جهت مقایسه این مقاله با کارهای قبل در شکل (۶) و (۷) انجام شده است. در حالتی که  $\beta$  کمترین مقدار باشد، هر چه تعداد یدک‌ها بیشتر باشد قابلیت اعتماد به یک نزدیک‌تر می‌شود و هر چه نرخ خرابی بیشتر شود قابلیت اعتماد کمتر می‌شود. اگر مدت زمان طول عمر حسگرها و ادوات نصف شود (از ۱۰۰ ماه به ۵۰ ماه)، با داشتن یک گره یدک و یا تعداد ۲ حسگر با نرخ های خرابی مفروض، قابلیت اطمینان بالای ۹۰٪ تضمین و به یک نزدیک‌تر می‌شود؛ در حالی که اگر از عمر تجهیزات بیشتر استفاده شود و مدت زمان طول عمر حسگرها و ادوات نسبت به حالت قبل دو برابر گردد (از ۵۰ ماه به ۱۰۰ ماه)، یعنی از یک تجهیز بیشتر از عمر مفید آن استفاده شود با داشتن ۳ و ۴ گره یدک و یا تعداد ۵ حسگر (هزینه خیلی بیشتر) با همان نرخ خرابی قبل قابلیت اطمینان بالای ۸۰٪ تضمین و از یک فاصله می‌گیرد؛ لذا برای کارکرد مدت زمان بیشتر و طول عمر بیشتر، بایستی با تعداد گره یدک بیشتر، قابلیت اطمینان به یک برسد و دیده می‌شود که قابلیت اطمینان عملکرد تجهیزات، از لحظه شروع (زمان اولیه) تا لحظه پایان عمر، مدت زمان عمر بهینه آنها به صورت نمایی، کاهش می‌یابد.



شکل (۶): تغییرات قابلیت اعتماد بر اساس تعداد یدک حالت سرد در نرخ خرابی متفاوت و طول عمر (الف) ۱۰۰ و (ب) ۵۰ ماه [۳]

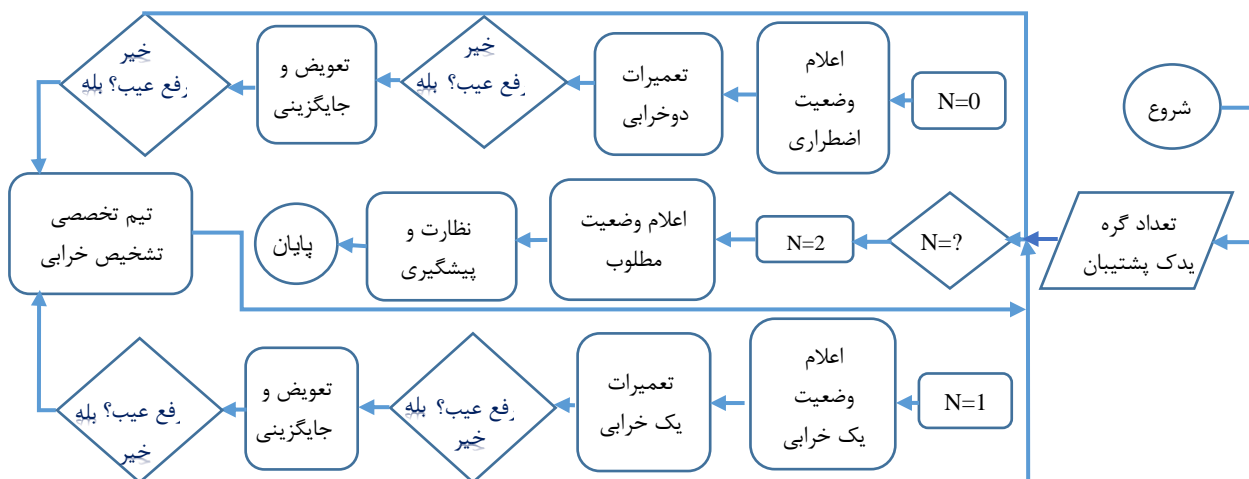


شکل (۷): تغییرات قابلیت اعتماد بر اساس تعداد یدک گرم در نرخ خرابی متفاوت و طول عمر (الف) ۱۰۰ ماه و (ب) ۵۰ ماه [۳]

همان‌طور که در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) در نتایج شبیه‌سازی مشاهده خواهد شد، زمانی که از عمر مفید تجهیزات بگذرد، عملکرد مفید تجهیزات با شدت خیلی بیشتری افت می‌کند و قابلیت اطمینان سریع‌تنزل پیدا می‌کند و باید تعداد حسگر یدک خیلی بیشتری هزینه نمود و با صرف هزینه زیاد قابلیت اطمینان به ۹۰٪ نمی‌رسد و بالای ۸۰٪ می‌شود و لذا بایستی برای بازدهی و کارایی بیشتر به عمر مفید تجهیزات اهمیت داده و زودتر قطعات مستعمل را تعویض بنماییم [۹]. برای هر دو نوع طراحی با یدک‌های گرم و سرد، سیستم وقتی خراب می‌شود که حسگر اولیه و همه حسگرهای یدک خراب شوند که با تعداد ۳ یا ۴ حسگر با یدک گرم و با تعداد ۲ حسگر با یدک سرد قابلیت اعتماد بالای ۹۰٪ می‌شود؛ بنابراین با تعداد ۲ حسگر اصلی و یدک به نتایج مطلوبی می‌توان دست یافت و جهت کاربرد تعداد بیشتر به صرف هزینه‌های زیادی نیاز است که خصوصاً برای حسگرهای گرم بیشتر از ۳ حسگر مقرون به صرفه نیست، برای حسگرهای سرد، نیز نیاز نمی‌باشد. طبق شکل (۷-الف، ب) برای دو حسگر، قابلیت اطمینان به یک نزدیک‌تر شده و بالای ۹۵٪ می‌رسد. برای طول عمر بیشتر با ۳ حسگر با نرخ‌های خرابی مفروض، قابلیت اطمینان بالای ۹۰٪ می‌رسد، بنابراین بررسی دو حسگر پشتیبان پیشنهادی به نظر کافی می‌باشد و برای ۳ حسگر به عنوان کار آینده با ارائه مدل جدید، قابل بررسی می‌باشد [۱۸].

### ۳- فرضیات و چالش‌های مدل و بررسی شرایط بحرانی و رسیدن به شرایط پایدار

استفاده از افزونگی در محیط‌های صنعتی به صورت هرم اتوماسیون صنعتی در لایه فیزیکی، با الگوریتم مدل پیشنهادی قابل بررسی می‌باشد.



شکل (۸): رسم الگوریتم و فلوچارت مدل پیشنهادی یدک دوقسمتی



### ۳-۱- الگوریتم و مفروضات مدل

- فرضیات الگوریتم مدل پیشنهادی در زیر تشریح می‌گردد و از آن در رسم فلوچارت طبق شکل (۸) استفاده می‌شود.
۱. نظارت دائم الگوریتم هوشمند برای شناسایی و تشخیص خرابی‌ها با تعداد گره حسگر فعال
  ۲. امکان استقلال یک و دو خرابی و تعمیر هر گره حسگر با نرخ خرابی  $\beta$  و با نرخ تعمیر  $r$  در دو حالت فعال و استراحت
  ۳. حساس به تعداد سالم بودن (نمایش با  $N$ ) و به از کارافتادن حسگرها در ایجاد یک خرابی ( $N=1$ ) و دو خرابی ( $N=0$ ) و پرهیز از وضعیت نامطلوب ( $N=0,1$ )
  ۴. هدایت سریع به واحد تعمیر و بعد جایگزینی طبق خط مشی بر اساس اولین رخداد خرابی جهت پرهیز از شرایط اضطراری
  ۵. کاهش تاخیر در اولویت تعمیر و اولویت بعدگزینه تعویض، بخاطر نداشتن تاخیر و موجود بودن کالا در انبار و عدم تعمیر
  ۶. هدایت به سمت وضعیت مطلوب ( $N=2$ ) بدون خرابی و ایجاد شرایط محیطی و عملیاتی پایدار با استراتژی نظارت مداوم

### ۳-۲- چالش‌های مدل

افزایش مواردی چون نرخ جایگزینی، تحویل داده، انرژی کارآمد، حساسیت، طول عمر، دقت و اطمینان و کاهش مواردی چون پیچیدگی، هزینه پشتیبانی، تاخیر، خرابی و خطا در پیشبرد اهداف محیط‌های صنعتی بسیار موثر می‌باشند. افزایش حساسیت  $R(S)$  به معنی درسرویس قرارگیری تجهیزات و حسگرهای یدک به محض تغییرات جزئی در سلامت آنها و احتمال وقوع خطا و خرابی می‌باشد. استراتژی نظارت به موقع و بیشتر بر عملکرد حسگرها و تعمیر و نگهداری فوری در زمان عملکرد بهینه با کاهش نرخ خرابی و افزایش نرخ جایگزینی تاثیر مستقیم دارد. به دلیل کاربرد و به کارگیری مقاله در صنعت، می‌توان پارامترهای شرایط راه اندازی را با توجه به ضرورت گذر از شرایط بحرانی و گذرا و رسیدن به شرایط پایدار و ماندگار، طبق استراتژی ارزیابی نمود و هشدارهای مثبت کاذب<sup>۳۳</sup> را طبق استراتژی نظارت بر هشدارها جهت تشخیص هشدارهای نادرست از هشدارهای واقعی و درست حذف نمود و حذف هشدارهای جعلی و کاذب بسیار ضروریست تا از آسیب‌های ناشی از خرابی غیر واقعی، اتلاف وقت و ترافیک و تاخیر زیاد در شبکه پرهیز شود. استراتژی بدین صورت است که همواره طبق شرایط پیش آمده جدید، نشست‌هایی برگزار و ارزیابی مجدد و به‌روزرسانی شرایط انجام گردد. موارد مطرح در ارزیابی الگوریتم مدل پیشنهادی، شامل موارد زیر می‌تواند باشد:

- ۱- نظارت بر شرایط محیطی، نظارت بر ساختار سلامت حسگرها و عملگرها و یا تجهیزات سیستم
- ۲- نظارت بر عملکرد و سلامت ماشین‌آلات، نظارت بر عملکرد سامانه‌ها
- ۳- نظارت بر عملکرد حسگرهای شبکه، مراکز داده، نظارت بر سلامتی سازه‌های مهندسی
- ۴- افزایش حساسیت با تنظیم آستانه‌های قابل تحمل شرایط کارکرد و پرهیز از آستانه‌های غیرقابل تحمل
- ۵- استفاده از مکث زمانی در صدور فرمان شرایط اضطراری و تشخیص هشدارهای درست از نادرست، خرابی‌های واقعی، مشکلات عملکرد و سایر آسیب‌های ناشی از هشدارهای غیرواقعی
- ۶- اولویت بندی قوانین منطقی در شرایط گذرا و گذر سریع از شرایط بحرانی حسگرها
- ۷- نظارت مداوم بر حذف هشدارهای نادرست و تشخیص هشدارهای نادرست از درست با منطق هوش مصنوعی
- ۸- اقدامات اصلاحی دیگر در شناسایی مشکلات برای رفع ازدحام و ترافیک

با توجه به اقدامات اصلاحی بالا مبنی بر مسیرهای اصلاح برگشت در مدل کاربردی دو حسگر، می‌توان در تشخیص گره‌های خراب از سالم و تعمیر و تعویض به موقع گره یدک در زمان نقطه شروع خرابی، در بهبود قابلیت اطمینان با نرخ جایگزینی بیشتر و کاهش تاخیر و احتمال خرابی با بهره مندی از دو حسگر و صرف هزینه کمتر بهره برد [۲۹]. بعد از تشخیص گره‌های خراب با توجه به پشتیبانی واحد تامین قطعات واحدهای صنعتی و موجود بودن کالا در انبار، گزینه تعویض گره یدک، بخاطر نداشتن تاخیر در روند کار به آسانی انجام می‌شود و در اولویت می‌باشد و گزینه تعمیر همواره در استفاده بهتر از عمر تجهیزات و کارآیی و بهره بردن بیشتر از تجهیز، به شرط آنکه شرایط اضطراری پیش نیاید در اولویت قرار می‌گیرد و این موارد در واحد برنامه‌ریزی تعمیرات مورد بررسی قرار می‌گیرند.



جدول (۲): طبقه‌بندی انواع چالش‌ها و راه‌حل‌های موثر و روش کار شناسایی چالش‌ها، خطاها و بازیابی خرابی

انواع چالش‌ها	راه‌حل‌ها و روش کار
عدم اطمینان پذیری	مدل هیبریدی و موازی پشتیبان - سیستم دو حالت - افزونگی با استفاده از گره‌های یدک پشتیبان (کاربرد مدل دوقسمتی) - روش تحمل خطا مدل FT - تکنیک مشارکتی - استراتژی نظارت و تعمیر و نگهداری و زمان عملکرد بهینه دو حسگر - افزایش هوشیاری و کنترل هوشمند
کاهش حساسیت	افزایش حساسیت تجهیزات و حسگرها R(S) نسبت به تغییرات جزئی سلامتی یا احتمال خطا و خرابی - کاهش تاثیر نرخ خرابی - افزایش تاثیر نرخ جایگزینی دو حسگر - نظارت به‌موقع و بیشتر بر عملکرد حسگرها - استراتژی نظارت بیشتر بر تعمیر و نگهداری فوری در زمان نیاز
کاهش دقت	مدل دو حالت - تکنیک مشارکتی - کاهش خستگی کاری حسگر با جوازسازی (تعمیر به موقع) و خواب و بیداری گره‌ها (جایگزینی)
احتمال خطا	افزایش قابلیت اطمینان و کاهش احتمال خرابی دو حسگر - دشواری جمع‌آوری داده‌های خطا و خرابی در فرکانس پایین - بهبود تعمیرات با کیفیت دو حسگر
تأخیر ارسال داده	کاهش تأخیر با بهبود مسیر تحویل و مدیریت داده - بافر - توزیع ترافیک - پروتکل مسیریابی مبتنی بر دو هاپ - ارتباطات چند کاناله - تکنیک غیرمشارکتی - جوازسازی و راه‌اندازی مجدد جهت پرهیز از خواب و هنگی سیستم -
تأخیر تعمیرات	کاهش تأخیر با تشخیص خطا با ML یادگیری ماشینی - تعمیرات فوری - تکنیک تشخیص رویداد - عیب‌یابی سریع و تامین و جایگزینی سریع قطعات یدکی
تأخیر در سرویس قرارگرفتن	کاهش تأخیر با حضور دو حسگر یدکی آماده به کار گرم و سرد - کنترل هوشمند و منطقی
تأخیر در تشخیص خطا	تکنیک تشخیص رویداد - افزایش هوشمندی با مدارات منطقی - کاهش خستگی و تبلی کاری - جوازسازی و راه‌اندازی مجدد جهت پرهیز از خواب و هنگی سیستم
هزینه پشتیبانی یدک	تسهیلات خرید یک تا دو یدک - تعداد کمتر اجزای درگیر بهبوده سیستم و نظارت بر آن به‌طور هوشمند
هزینه تعمیرات	تسهیلات تعمیر دو یدک - تعداد کمتر اجزای درگیر بهبوده سیستم و رعایت حد اجزای فعال - خواب و بیداری گره‌ها
کاهش طول عمر شبکه	بهبود کیفیت قطعات - افزایش و جایگزینی دو یدک - روش تحمل خطا - خواب و بیداری دو یدک
خستگی کاری	تاثیر بیشتر با روشهای تکنیک مشارکتی - افزایش و جایگزینی قطعات دو یدک - خواب و بیداری دو گره
افزایش مصرف انرژی	پروتکل مسیریابی گره کارآمد انرژی - تکنیک تجمیع داده - تکنیک غیرمشارکتی - تعداد کمتر اجزای فعال سیستم - خواب و بیداری دو گره
پیچیدگی	استفاده از زیرسیستم‌ها برای نظارت و بررسی - جداسازی منطقها - جداسازی معماری مدیریت و عملیات فرآیند - طبقه بندی سناریوها و ناحیه بندی واحدهای صنعتی
افزایش نرخ خرابی	افزایش نرخ جایگزینی - کاهش تأخیرها - تشخیص خطاها - تعمیرات به‌موقع و فوری - افزایش حساسیت و دقت - کاهش خستگی
کاهش نرخ جایگزینی	افزایش نرخ جایگزینی - افزایش گره‌های یدک پشتیبان - افزایش هوشیاری - خواب و بیداری به‌موقع
احتمال یک خرابی	مدل دو حسگر با پشتیبان امکان جایگزینی یک یدک - بهبود کیفی و کمی تعمیرات
احتمال دو خرابی	پشتیبان و کاربرد مدل دوقسمتی امکان جایگزینی دو یدک - بهبود کیفیت تعمیرات

### ۳-۳- بررسی تأخیر در لایه فیزیکی و حسگرها

مروری مختصر بر انواع تأخیر دو حسگر پشتیبان، که در زیر بررسی می‌شود.

تأخیر حس کردن حسگر<sup>۳۴</sup>: وقتی که حسگر در حال حس کردن با تأخیر مواجه شود، اتفاق می‌افتد.

تأخیر بازگشت<sup>۳۵</sup>: وقتی اتفاق می‌افتد که حس کردن حسگر موفقیت آمیز نباشد یا ارسال دیگری تشخیص داده شده و یا برخورد اتفاق افتاده باشد و اصطلاحاً آنرا تأخیر در تشخیص خطا می‌نامند.

تأخیر انتقال<sup>۳۶</sup>: همان تأخیر ارسال داده است و به عرض پهنای باند و طول بسته حسگر، بستگی دارد.

تأخیر انتشار<sup>۳۷</sup>: توسط فاصله بین حسگرهای اصلی و یدک تعیین می‌شود اصطلاحاً آن را تأخیر در سرویس قرارگرفتن نیز می‌نامند.



تاخیر صف تعمیرات<sup>۳۸</sup>: به بار ترافیکی حسگر بستگی دارد و در مواقع ترافیک سنگین این تاخیر حداکثر است.

تاخیر پردازش<sup>۳۹</sup>: مربوط به محاسبات پردازشگر می‌باشد و این تاخیر به‌طور عمده به توان محاسباتی حسگر و بازدهی الگوریتم پردازشگر شبکه داده، بستگی دارد. در شبکه‌ها H ارتباط R شعاع پرش و تاخیر ارسال بسته نسبت به احتمال خرابی و خطای ارتباط در دو حالت مشارکتی و غیرمشارکتی به ترتیب به صورت رابطه (۵) و (۶) نمایش داده می‌شود [۵] و تاخیر حالت مشارکتی و غیرمشارکتی طبق شکل (۱۲) شبیه‌سازی و رسم شده است.

$$TC(R, H) = TC(H - 2H) \Rightarrow \frac{P^4(2-P) + P^{2H} + P^{H+1}(1-5P+2P^2)}{(1-P)(P^2 - P^H)^2} \quad (5)$$

$$TNC(R, H) = \frac{\left[ \frac{H}{R} \right]}{(1-P)} \quad (6)$$

شناسایی چالش‌های قابلیت اطمینان و راه حل‌های موثر بر آنها را طبق جدول (۲)، طبقه‌بندی و بررسی می‌کنیم [2].

#### ۴- ارائه مدل دو حسگر موازی و آماده‌باش و امکان تعمیر یا جایگزینی یک تا دو خرابی

در این قسمت به نوآوری مقاله و ارائه مدل دو حسگر موازی و آماده‌باش جهت پوشش تا دو خرابی می‌پردازیم. در این مطالعه، ما با تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان و در دسترس بودن یک سیستم گره حسگر بی‌سیم قابل تعمیر دو قسمتی طبق شکل (۹) جهت ارتقای  $R(t)$  برای نواحی مختلف مدل دو حسگر موازی با افزودن یک حسگر آماده‌باش و امکان تعمیر یا جایگزینی یک تا دو خرابی تحت یک مرکز تعمیر مشترک سروکار داریم.

##### ۴-۱- بررسی حالات مختلف مدل سیستم دو قسمتی

در این مدل وقتی یک گره حسگر از کار بیفتد، تسهیلات تعمیر روشن می‌شود. طبق خط‌مشی اولین خرابی با اولین تعمیر مواجه می‌شود و اگر قابل تعمیر نباشد با تعویض مواجه می‌شود. بدلیل داشتن دو حسگر احتمال آنکه یک حسگر از دو یدک خراب باشد، محتمل تر می‌باشد. الگوریتم و فلوچارت مدل پیشنهادی در شکل (۸) طبق استراتژی سیستم ترسیم شده واز آن طبق شکل (۹) در ارایه معماری جدید مدل دو قسمتی استفاده و فرض می‌شود که در هر گره یک حسگر اصلی و یک حسگر یدک، در مجموع تعداد دو حسگر وجود دارد، که مطلوب ما در آن است که هر دو سالم باشند و در آن:

$\mu$  یا  $\lambda$ : نرخ جایگزینی حسگر یدک به جای حسگر اصلی است که ما با  $\lambda$  نمایش می‌دهیم.

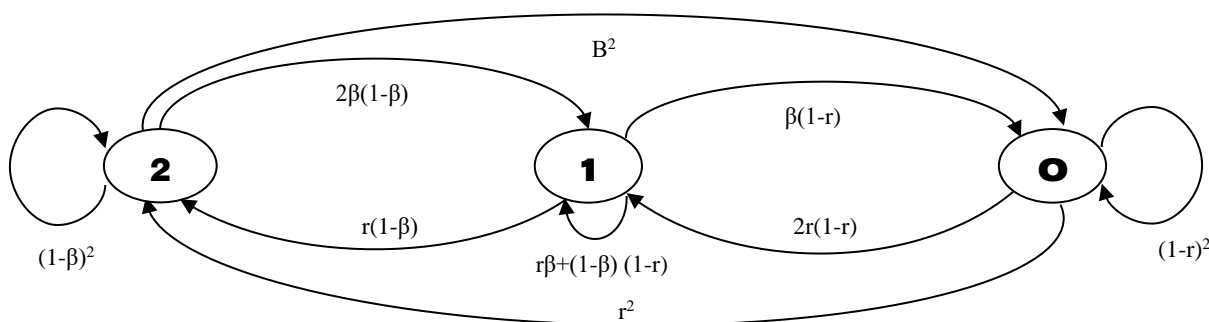
$\lambda$  یا  $\beta$ : نرخ شکست یا خرابی حسگر که با  $\beta$  نمایش داده شده است [۱۷].

فضای حالت مدل دارای سه عضو  $S = \{0, 1, 2\}$  که حالت ۲ حالت مطلوب و احتمال عملکرد حالت مطلوب برابر واحد یا  $P(2) = 1$  به عبارتی مطلوب است که همیشه حالت ۲ پیش بیاید و باقی بماند و حالت ۱، یک حسگر سالم و یدک آن خراب یا بالعکس و حالت صفر هر دو حسگر اصلی و کشیک یا آماده‌باش خراب شده‌اند و احتمال عملکرد هر دو حالت ۱ و ۰ برابر صفر یا  $P(1) = P(0) = 0$  به عبارتی مطلوب نیست این حالات پیش بیایند و لذا احتمال هر دوی آنها نزدیک صفر فرض می‌شود.

با توجه به اینکه دو حسگر یا تجهیز بصورت پشتیبان یکدیگر عمل می‌نمایند و هر دو حسگر عملکرد مطلوبی داشته باشند با حالت ۲ نمایش می‌دهیم و با احتمال وقوع  $(1-\beta)^2$  حالت ۲ به خودش برمی‌گردد و با احتمال  $\beta^2$  هر دو حسگر خراب می‌شوند و به حالت صفر می‌رسد و اگر یکی از آنها در اثر خطا یا خرابی از سرویس خارج شود با احتمال  $2\beta(1-\beta)$  از حالت ۲ به حالت ۱ رسیده و با احتمال وقوع  $r\beta + (1-\beta)(1-r)$  حالت ۱ به خودش بر می‌گردد؛ یعنی با این احتمال یک حسگر مطلوب است و یک حسگر یدک خراب شده است و باز اگر مجدد یکی از حسگرهای سالم در اثر خطا یا خرابی از سرویس خارج شود با احتمال  $\beta(1-r)$  از حالت ۱ به حالت صفر می‌رود که در آن حالت هیچ حسگری عملکرد مطلوب ندارد و خراب شده‌اند و نیاز به تعمیر یا جایگزینی وجود دارد که با احتمال وقوع  $(1-r)^2$  در همان حالت بدون تعمیر و جایگزینی یا خراب می‌مانند و با احتمال وقوع  $2r(1-r)$  یکی از حسگرها تعمیر یا جایگزین می‌شود و با احتمال  $r(1-\beta)$  از حالت ۱ به حالت ۲ رفته که در آن حالت هر دو حسگر تعمیر یا جایگزین و عملکرد مطلوب دارند و از



خرابی درآمده‌اند و نیاز به تعمیر یا جایگزینی دیگر نیست و با احتمال  $r^2$  از حالت صفر به حالت ۲ می‌رود؛ یعنی هر دو حسگر تعمیر یا جایگزین شده‌اند [۱۹].



شکل (۹): معماری جدید دوقسمتی با مدل مارکوف جهت بررسی قابلیت اطمینان با دو حسگر مشابه پشتیبان و امکان تعمیر یا تعویض یک تا دو خرابی [۳۰]

#### ۴-۲- روابط و عبارات ریاضی محاسبه قابلیت اطمینان

با بررسی شکل (۹) و استفاده از مدل مارکوف به روش ماتریسی  $A * P = A$  رابطه (۷) بدست می‌آید که می‌توان احتمال حالت‌ها را از وضعیت مطلوب تا وضعیت نامطلوب نوشت. با توجه به مدل مارکوف، خروجی حالت‌های مختلف یا جمع هر سطر ماتریس رابطه (۷) بایستی یک شود.

$$(P(2) \ P(1) \ P(0)) * \begin{bmatrix} (1-\beta)^2 & 2\beta(1-\beta) & \beta^2 \\ r(1-\beta) & r\beta + (1-\beta)(1-r) & \beta(1-r) \\ r^2 & 2r(1-r) & (1-r)^2 \end{bmatrix} = (P(2) \ P(1) \ P(0)) \quad (7)$$

اگر طبق شکل (۹) احتمال حالت‌ها را از وضعیت نامطلوب تا وضعیت مطلوب بنویسیم رابطه (۸) بدست می‌آید که درایه‌های ماتریس آن برعکس درایه‌های ماتریس رابطه (۷) می‌شود.

$$(P(0) \ P(1) \ P(2)) * \begin{bmatrix} (1-r)^2 & 2r(1-r) & r^2 \\ \beta(1-r) & r\beta + (1-\beta)(1-r) & r(1-\beta) \\ \beta^2 & 2\beta(1-\beta) & (1-\beta)^2 \end{bmatrix} = (P(0) \ P(1) \ P(2)) \quad (8)$$

$$\sum_{k=0}^n p_k = P(0) + P(1) + P(2) = 1 \Rightarrow P(0) = 1 - P(1) - P(2) \quad (9)$$

بعد از ساده‌سازی و حل معادلات رابطه (۸) با استفاده از روش کرامر در حل سه معادله سه مجهول و یا نرم افزارهای محاسباتی مانند متلب، میپل و به‌کارگیری رابطه (۹) که مجموع کلیه حالتها یک می‌شود، احتمال حالت‌ها و مقادیر پارامترها طبق رابطه (۱۰) به‌دست می‌آیند.

$$P(2) = \frac{r^2}{(\beta+r)^2}, \quad P(1) = \frac{2\beta r}{(\beta+r)^2}, \quad P(0) = \frac{\beta^2}{(\beta+r)^2} \quad (10)$$

مطلوب ما طبق رابطه (۱۰) در آن است که خرابی در حد صفر ( $\beta \approx 0$ ) و یا بر فرض اصلاً خرابی وجود نداشته باشد و در نتیجه نیاز به تعمیر و جایگزینی، در چنین مواقعی وجود ندارد؛ یعنی ( $r \approx 0$ ) و لذا هر دو ( $\beta, r \approx 0$ ) مطلوب ما می‌باشد که در این صورت  $P(2) = 1$  و خرابی در حد صفر در نتیجه مقادیر  $(1-\beta), (1-r)$  به یک نزدیک می‌شوند با جای‌گذاری  $\beta$  و  $r$  در رابطه (۱۰) احتمال حالت‌ها طبق رابطه (۱۱) به‌دست می‌آیند که شرایط اولیه و مطلوب ما می‌باشند.

$$P(2) = \frac{r^2}{(\beta+r)^2} = 1, \quad P(0) = \frac{\beta^2}{(\beta+r)^2} = 0, \quad P(1) = \frac{2\beta r}{(\beta+r)^2} = 0 \quad (11)$$



با جای گذاری احتمالات حالات ناچیز  $\beta$  و  $r$  و مقادیر  $r^2$  و  $\beta^2$  و  $\beta r$  بنا بر فرض، به صفر نزدیک تر می‌شوند. با جای گذاری آنها، احتمال حالت‌ها طبق رابطه (۱۲) و (۱۳) و (۱۴) به دست آمده و مشاهده می‌شود که مدل کاربردی کامل شکل (۹) با مدل مارکوف ساده‌تر شده شکل (۱۰) یکسان و مشابه می‌باشند. در نتیجه مدل جهت عملکرد مطلوب نرخ خرابی کم، خلاصه و ساده‌تر می‌شود.

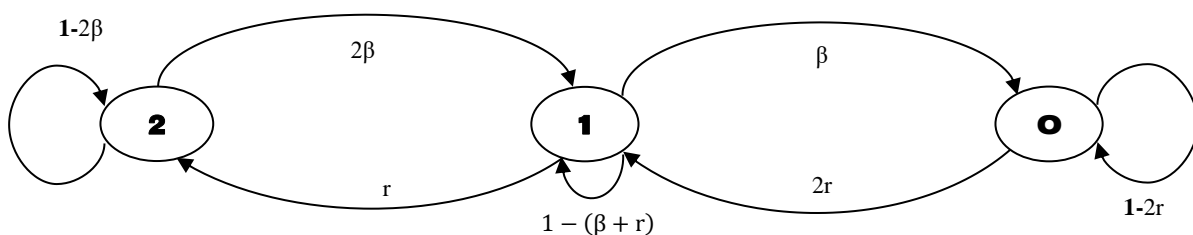
$$(1-\beta)^2 = 1 + \beta^2 - 2\beta = 1 - 2\beta \quad (12)$$

$$(1-r)^2 = 1 + r^2 - 2r = 1 - 2r \quad (13)$$

$$r\beta + (1-\beta)(1-r) = 2\beta r + 1 - (\beta+r) = 1 - (\beta+r) \quad (14)$$

در تحلیل مدل شکل (۱۰)، فضای حالت دارای سه عضو  $S = \{0, 1, 2\}$  که حالت ۲ حالت مطلوب و احتمال عملکرد حالت مطلوب برابر واحد یا  $P(2) = 1$  به عبارتی مطلوب است که همیشه حالت ۲ پیش بیاید و باقی بماند و حالت ۱ یک حسگر سالم و یدک آن خراب یا بالعکس و حالت صفر هر دو حسگر اصلی و کشیک یا آماده‌باش خراب شده‌اند و احتمال عملکرد هر دو حالت ۱ و صفر برابر صفر یا  $P(1) = P(0) = 0$  به عبارتی مطلوب نیست این حالات پیش بیایند و لذا احتمال هر دوی آنها نزدیک صفر فرض می‌شود [۱۷]. با توجه به اینکه دو حسگر یا تجهیز به صورت پشتیبان یکدیگر عمل می‌نمایند، اگر هر دو حسگر عملکرد مطلوبی داشته باشند با حالت ۲ نمایش داده می‌شود و با احتمال وقوع  $1 - 2\beta$  حالت ۲ به خودش برمی‌گردد و اگر احتمال وقوع  $1 - (\beta+r)$  حالت ۱ به خودش برمی‌گردد؛ یعنی با این احتمال یک حسگر مطلوب است و یک حسگر یدک خراب شده است و باز اگر مجدد یکی از حسگرهای سالم در اثر خطا یا خرابی از سرویس خارج شود، با احتمال  $\beta$  از حالت ۱ به حالت صفر می‌رود که در آن حالت هیچ حسگری عملکرد مطلوب ندارد و خراب شده‌اند و نیاز به تعمیر یا تعویض است که با احتمال وقوع  $1 - 2r$  در همان حالت بدون تعمیر و جایگزینی یا خراب می‌ماند و با احتمال وقوع  $2r$  یکی از حسگرها تعمیر یا جایگزین می‌شود و با احتمال  $r$  از حالت ۱ به حالت ۲ رفته که در آن حالت هر دو حسگر تعمیر یا جایگزین و عملکرد مطلوب دارند و از خرابی درآمده‌اند و نیاز به تعمیر یا تعویض دیگر نیست؛ یعنی هر دو حسگر تعمیر یا جایگزین شده‌اند. از روی شکل (۱۰) طبق معادله ماتریسی  $A^*P=A$  رابطه (۱۵) به دست می‌آید. بعد از ساده‌سازی و حل معادلات رابطه (۱۵) و به کارگیری رابطه (۹) که مجموع کلیه حالتها یک می‌شود احتمال حالت‌ها و مقادیر پارامترها مجدداً طبق رابطه (۱۰) به دست می‌آیند. در نتیجه نتایج برای احتمالات شکل (۹) و شکل (۱۰) یکسان و در نتیجه هر دو شکل در شبیه‌سازی قابلیت اطمینان، بعد از حل معادلات لاپلاس به کار می‌روند.

$$(P(0) \ P(1) \ P(2))^* \begin{pmatrix} 1-2r & 2r & 0 \\ \beta & 1-(\beta+r) & r \\ 0 & 2\beta & 1-2\beta \end{pmatrix} = (P(0) \ P(1) \ P(2)) \quad (15)$$



شکل (۱۰): مدل خلاصه مارکوف قابلیت اطمینان با دو حسگر مشابه پشتیبان و امکان تعمیر و تعویض یک تا دو خرابی با احتمال برگشت هر حالت

مدل قابلیت اطمینان شکل (۱۰) با مدل خلاصه مارکوف با دو حسگر مشابه پشتیبان و امکان تعمیر و تعویض یک تا دو خرابی بدون احتمال برگشت به صورت شکل (۱۱) نیز ساده‌تر می‌شود. برای حالتی که در هر ناحیه یک حسگر و یک یدک موازی باشد، اگر معادلات ماتریسی شکل (۱) را بر حسب گذر زمان بنویسیم و بعد از خلاصه‌نویسی و گرفتن تبدیل لاپلاس از روابط مشتق (۱۶) و اعمال شرایط اولیه طبق رابطه (۱۱) در حل سه معادله سه مجهول نتایج جواب احتمالات لاپلاس طبق روابط (۱۷) و (۱۸) و (۱۹) به دست می‌آیند.





با توجه به آنکه رابطه قابلیت اطمینان برحسب زمان  $R(t) = 1 - P_0(t)$  می‌باشد، تابع لاپلاس قابلیت اطمینان طبق رابطه (۲۰) بدست می‌آید و باگرفتن عکس تبدیل لاپلاس از رابطه (۲۰)، روابط (۲۱) و (۲۲) و (۲۳) بدست می‌آیند که بعد از ساده‌سازی و حل معادلات به رابطه عدم قابلیت اطمینان  $U(t)$  طبق رابطه (۲۳) و یا قابلیت اطمینان  $R(t)$  طبق رابطه (۲۴) یا (۲۵) می‌رسیم [۷].

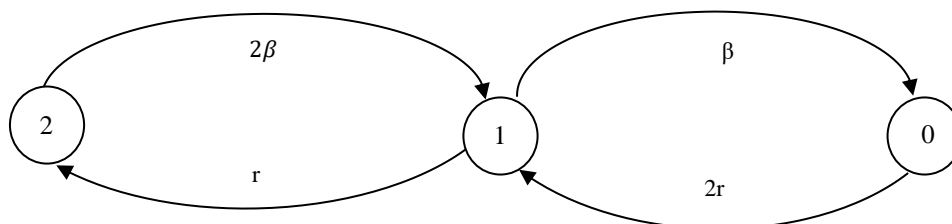
$$[P_2'(t) \quad P_1'(t) \quad P_0'(t)] = [P_2(t) \quad P_1(t) \quad P_0(t)] * \begin{bmatrix} -2\beta & 2\beta & 0 \\ r & -(\beta+r) & \beta \\ 0 & 2r & -2r \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$P_{2(s)} = \frac{(rP_{1(s)} + 1)}{s + 2\beta} \quad (17)$$

$$P_{1(s)} = \frac{2\beta(s + 2r)}{s(s^2 + 3(\beta+r)s + 2(\beta+r)^2)} \quad (18)$$

$$P_{0(s)} = \frac{\beta P_{1(s)}}{(s + 2r)} = \frac{2\beta^2}{s(s^2 + 3(\beta+r)s + 2(\beta+r)^2)} \quad (19)$$

$$L_x(S) = f_x(S) = sP_{0(s)} - P_{0(0)} = \frac{2\beta^2}{(s^2 + 3(\beta+r)s + 2(\beta+r)^2)} \quad (20)$$



شکل (۱۱): مدل خلاصه مارکوف قابلیت اطمینان با دو حسگر پشتیبان و امکان تعمیر و جایگزینی یک تا دو خرابی بدون احتمال برگشت هر حالت

$$P_2(t) = \frac{r^2}{(\beta+r)^2} + \frac{2\beta r}{(\beta+r)^2} e^{-(\beta+r)t} + \frac{\beta^2}{(\beta+r)^2} e^{-2(\beta+r)t} \quad (21)$$

$$P_1(t) = \frac{2\beta r}{(\beta+r)^2} + \frac{2\beta(\beta-r)}{(\beta+r)^2} e^{-(\beta+r)t} - \frac{2\beta^2}{(\beta+r)^2} e^{-2(\beta+r)t} \quad (22)$$

$$P_0(t) = U(t) = \frac{\beta^2}{(\beta+r)^2} - \frac{2\beta^2}{(\beta+r)^2} e^{-(\beta+r)t} + \frac{\beta^2}{(\beta+r)^2} e^{-2(\beta+r)t} \quad (23)$$

$$R(t) = P_2(t) + P_1(t) = \frac{(r^2 + 2\beta r)}{(\beta+r)^2} + \frac{2\beta^2}{(\beta+r)^2} e^{-(\beta+r)t} - \frac{\beta^2}{(\beta+r)^2} e^{-2(\beta+r)t} \quad (24)$$

$$R(t) = 1 - (P_0(t)) = 1 - \frac{\beta^2}{(\beta+r)^2} + \frac{2\beta^2}{(\beta+r)^2} e^{-(\beta+r)t} - \frac{\beta^2}{(\beta+r)^2} e^{-2(\beta+r)t} \quad (25)$$

که در این معادلات در زمان اولیه یعنی  $t=0$  هنوز خرابی وجود ندارد و به‌ازای زمان اولیه یعنی  $t=0$  جمع سطر اول و سطر دوم رابطه (۲۱) و (۲۲) یک، به مفهوم قابلیت اطمینان  $R(t)$  ۱۰۰٪ می‌باشد و رابطه (۲۳) صفر به مفهوم  $U(t) = 0$  می‌باشد و همچنین به‌ازای



هر زمانی جمع کل احتمالات روابط (۲۱) و (۲۲) و (۲۳) یک می‌شود و یا رابطه  $P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) = 1$  برقرار می‌باشد؛ در نتیجه اگر  $U(t) = P_0(t)$  محاسبه شود، عدم اطمینان پذیری طبق رابطه (۲۷) بدست می‌آید و اگر نتیجه حاصل از یک، کم شود، قابلیت اطمینان مدل  $R(t) = P_2(t) + P_1(t)$  طبق رابطه (۲۶) محاسبه می‌گردد که برای بررسی حساسیت قابلیت اطمینان شبکه و حسگرها نسبت به نرخ تعمیر و جایگزینی یا نرخ خرابی، استفاده می‌شود.

$$R(t) = P_2(t) + P_1(t) = \frac{r^2}{(\beta+r)^2} + \frac{2\beta r}{(\beta+r)^2} = \frac{(r^2 + 2\beta r)}{(\beta+r)^2} \quad (26)$$

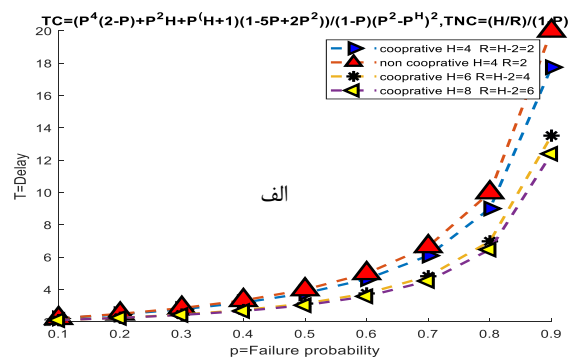
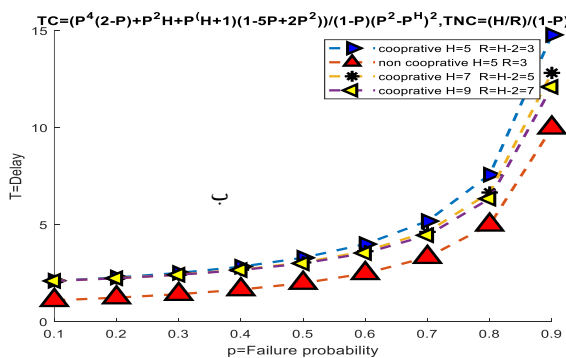
$$U(t) = P_0(t) = \frac{\beta^2}{(\beta+r)^2} \quad (27)$$

## ۵- شبیه‌سازی و ارزیابی

### ۵-۱- شبیه‌سازی و ارزیابی پژوهش

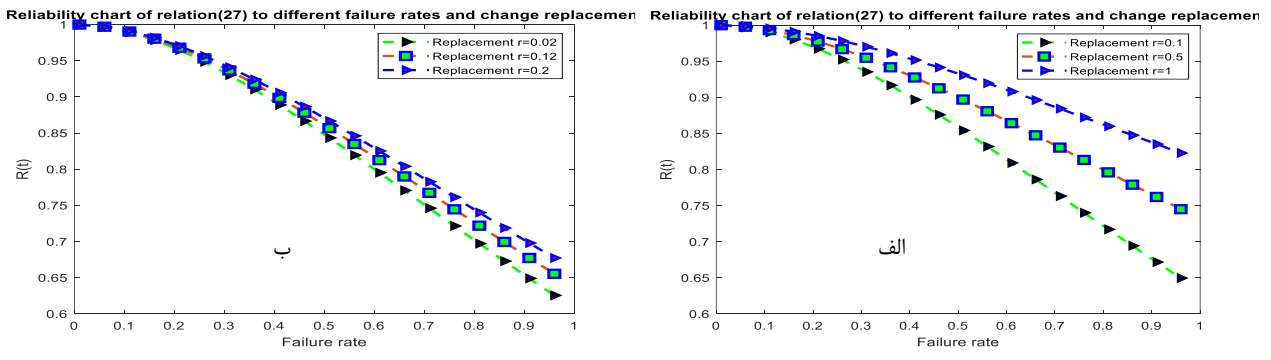
نتایج حاصل از شبیه‌سازی رابطه قابلیت اطمینان و عدم قابلیت اطمینان به ترتیب طبق رابطه (۲۴) یا (۲۵) و رابطه (۲۳) با استفاده از نرم‌افزار متلب با مشخصات مختلف به‌دست آمده و در شکل‌های مختلف رسم شده است. ارسال داده از نود مبدا تا مقصد توسط حسگرهای شبکه بصورت سیمی و بیسیم انجام می‌شود و این روش برای گره‌های در دسترس سیمی و اگر ارتباط شبکه مخابراتی، بصورت بیسیم مفروض باشد برای مناطق صعب‌العبور یا دسترس‌پذیری سخت و مناطق دور از دسترس صنعتی نیز بسیار پر کاربرد می‌باشد و کیفیت قابل قبولی را ارائه می‌دهد. و هدف از شبیه‌سازی شکل (۱۲-الف، ب) رابطه تاخیر با احتمال خرابی و خطا می‌باشد و در آنها  $H$  ارتباط و  $R$  شعاع پرش متبادل داده حسگر از یک گره به گره دیگر در نظر گرفته می‌شود. اگر در شبکه‌ای  $(H, R=H-2)$  مفروض به ترتیب شکل (۱۲-الف، ب) اعداد  $(2-4-6-4-6-8)$  و  $(3-5-7-5-7-9)$  در نظر گرفته شود. میزان تاخیر ارسال بسته نسبت به احتمال خرابی و خطای ارتباط طبق رابطه (۵) و (۶) در حالت مشارکتی و غیرمشارکتی بررسی می‌گردد و میزان تاخیر ارسال بسته حالت مشارکتی همیشه بیشتر از حالت غیرمشارکتی است اما در شعاع پرش ۲ تاخیر حالت غیرمشارکتی بیشتر از حالت مشارکتی در احتمال خرابی بالاتر می‌باشد و با بیشترین تاخیر مواجه است و هرچه احتمال خرابی و خطای ارتباط بیشتر شود میزان تاخیر ارسال بسته بیشتر نمایی می‌گردد و هرچه شعاع پرش بیشتر شود احتمال ارسال موفق داده بیشتر می‌گردد و بالعکس احتمال ارسال ناموفق و یا خرابی و خطای ارتباط و میزان تاخیر ارسال بسته، کمتر می‌گردد و نتیجه می‌گیریم تنها در شعاع پرش ۲ به علت تاخیر کمتر حالت مشارکتی، کارایی بیشتری دارد و در شعاع پرش بزرگتر از دو، حالت غیرمشارکتی میزان تاخیر کمتری دارد [۵].

طبق شکل (۱۳-الف، ب) نتایج شبیه‌سازی رابطه قابلیت اطمینان (۲۴) یا (۲۵) به نرخ خرابی مختلف و تغییر نرخ جایگزینی مقادیر بیشتر و کمتر را به ترتیب بررسی می‌کند. اگر رابطه قابلیت اطمینان با گذر زمان و همزمان تغییر نرخ خرابی یا نرخ جایگزینی بررسی شود، نتایج نشان می‌دهد که با گذر طول عمر تجهیزات، قابلیت اطمینان کاهش می‌یابد. در نرخ خرابی مختلف، نتایج قابلیت اطمینان با نرخ جایگزینی مختلف قابل مشاهده و به نتایج خوبی در مدل کاربردی می‌رسد و با جایگزینی به موقع بهبود خوبی، آشکار می‌شود و این نکته مهم در به‌کارگیری نتایج در تعمیر و جایگزینی خرابی و تدبیرات لازم در صنعت، باید لحاظ شود.



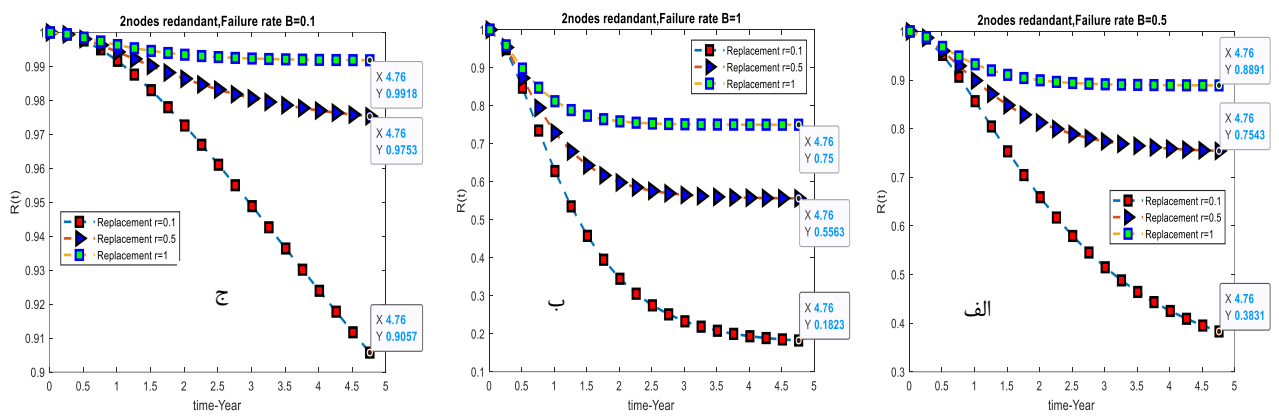
شکل (۱۲): نمودار شبیه‌سازی مقایسه میزان تاخیر ارسال بسته در حالت مشارکتی و غیرمشارکتی نسبت به احتمال خرابی و خطای ارتباط [۵]





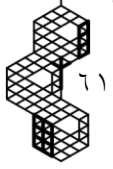
شکل (۱۳): نمودار قابلیت اطمینان رابطه (۲۷) به نرخ خرابی مختلف و تغییر نرخ جایگزینی با مقادیر بیشتر (الف) و مقادیر کمتر (ب)

رابطه قابلیت اطمینان (۲۴) یا (۲۵) طبق شکل (۱۴-الف، ب، ج) به ترتیب برای نرخ خرابی  $B=0.1-0.5-1$  رسم و بیانگر آن است که در دوره ۵ ساله قابلیت اطمینان تا یک الی دو سال اول عمر مفید تجهیزات، بالای ۷۰٪ می باشد و از دوسال به بعد به علت شدت گرفتن خرابیها بایستی تدبیری در برنامه ریزی واحد تعمیر و نگهداری اندیشیده شود تا با افزایش نرخ جایگزینی مثلاً  $r=0.5$ ، نرخ خرابی  $B=0.5$  بالاتر نرود و قابلیت اطمینان با خرابی کمتر از ۵۰٪ عملاً با افت شدید مواجه نشود و در  $r=1$  در دوره ۵ ساله بالای ۸۸٪ تضمین می شود و عملاً قابلیت اطمینان تجهیزات بدون تدبیر لازم در برنامه ریزی واحد تعمیر و نگهداری ( $r=0$ ) در نرخ های خرابی بیشتر مثلاً ( $B=0.5$  خرابی ۵۰٪) و ( $B=1$  خرابی ۱۰۰٪) گسترش یابد افت بسیار شدید و تا حد صفر پیش می رود درحالی که می توان با برنامه ریزی تعمیرات تیمی و افزایش نرخ تعمیر و جایگزینی در زمان بندی مناسب، اقدام و از گسترش خرابی جلوگیری نمود.



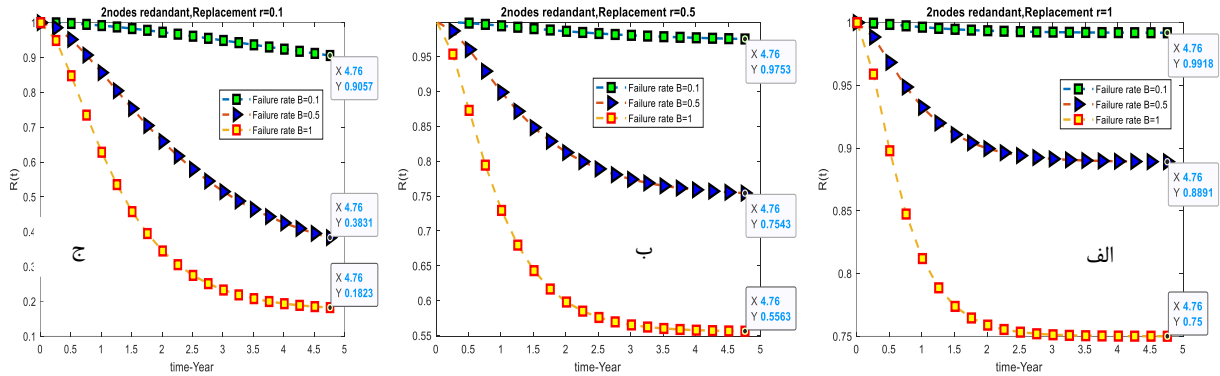
شکل (۱۴): رابطه قابلیت اطمینان با گذر زمان و تغییر همزمان سه نرخ خرابی و جایگزینی مختلف

در تشریح شکل (۱۵-الف، ب، ج) در یک دوره زمانی ۵ ساله عمر تجهیزات طبق رابطه قابلیت اطمینان (۲۴) یا (۲۵) که با زمان رابطه دارد شبیه سازی شده و نمودار افقی بیانگر قابلیت اطمینان که مابین ۰ تا یک می باشد، به ترتیب برای نرخ جایگزینی  $r=0.1-0.5-1$  رسم شده تا اهمیت و عملکرد واحد پشتیبانی تعمیرات در تعمیر و تجهیز قطعات یدک و پشتیبان گیری مشخص شود و  $r$  بیانگر طرز عملکرد واحد پشتیبانی تعمیرات و اهمیت دادن به این موضوع می باشد که طبق شکل (۱۵-الف) در دوره ۵ ساله هر چه به نرخ جایگزینی و تعمیرات، اهمیت داده و بالاتر ببریم ( $r=1$ ) می شود و این موضوع یعنی این واحد در تعمیر و تجهیز قطعات یدک و پشتیبان گیری با هر نرخ خرابی، به درستی عمل می نماید و یا موفقیت عملکرد واحد پشتیبانی در این حالت ۱۰۰٪ می باشد و حالا در این نمودارها با نرخ های خرابی مختلف مثلاً خرابی بیشتر از ۱۰٪ نشود ( $B=0.1$  خرابی ۱۰٪ منحنی سبز رنگ)، قابلیت اطمینان بالای ۹۹٪ تضمین می شود و عملاً با نرخ های خرابی بیشتر منحنی نارنجی رنگ، قابلیت اطمینان تا حد ۷۵٪ کم می شود؛ طبق شکل (۱۵-ب) در نرخ جایگزینی ( $r=0.5$ )، که به مفهوم موفقیت عملکرد واحد پشتیبانی ۵۰٪ می باشد، با نرخ خرابی کم منحنی سبز رنگ تا ۹۷٪ و با نرخ خرابی ۰.۵ تا یک، منحنی آبی و نارنجی رنگ به ترتیب، قابلیت اطمینان تا ۷۵٪ و ۵۵٪ افت می نماید و همینطور شکل

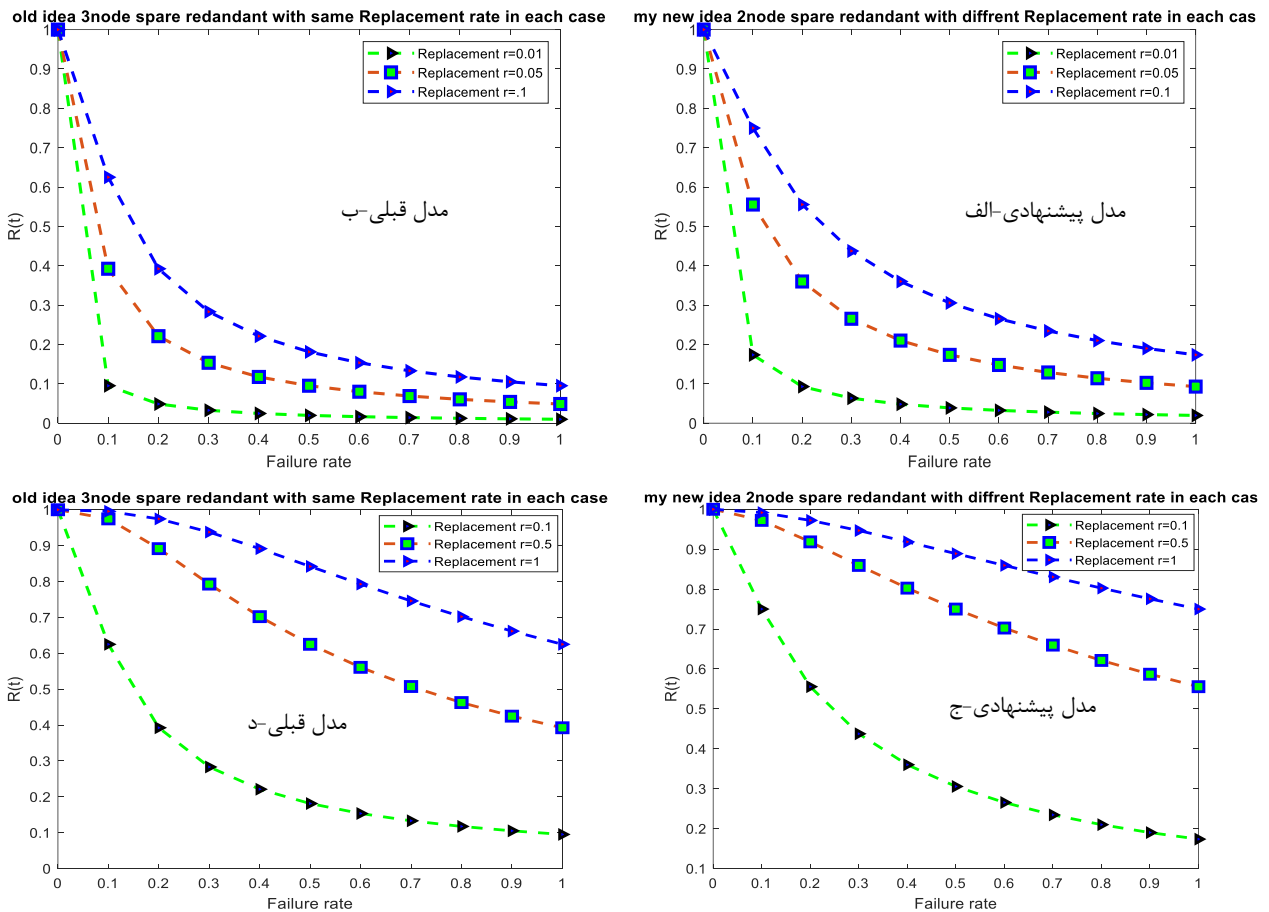




(۱۵-ج) در نرخ جایگزینی  $(r = 0.1)$  که عملکرد واحد تعمیرات مختل است، قابلیت اطمینان تا ۲۰٪ طبق منحنی نارنجی رنگ افت می‌نماید. لذا قابلیت اطمینان با افزایش نرخ جایگزینی و در نتیجه کاهش نرخ خرابی، بهبود بسیار مطلوبی پیدا می‌کند و آن هم به موفقیت عملکرد و برنامه‌ریزی واحد پشتیبانی مربوط می‌گردد.



شکل (۱۵): رابطه قابلیت اطمینان با گذر زمان و تغییر همزمان سه نرخ جایگزینی و خرابی مختلف



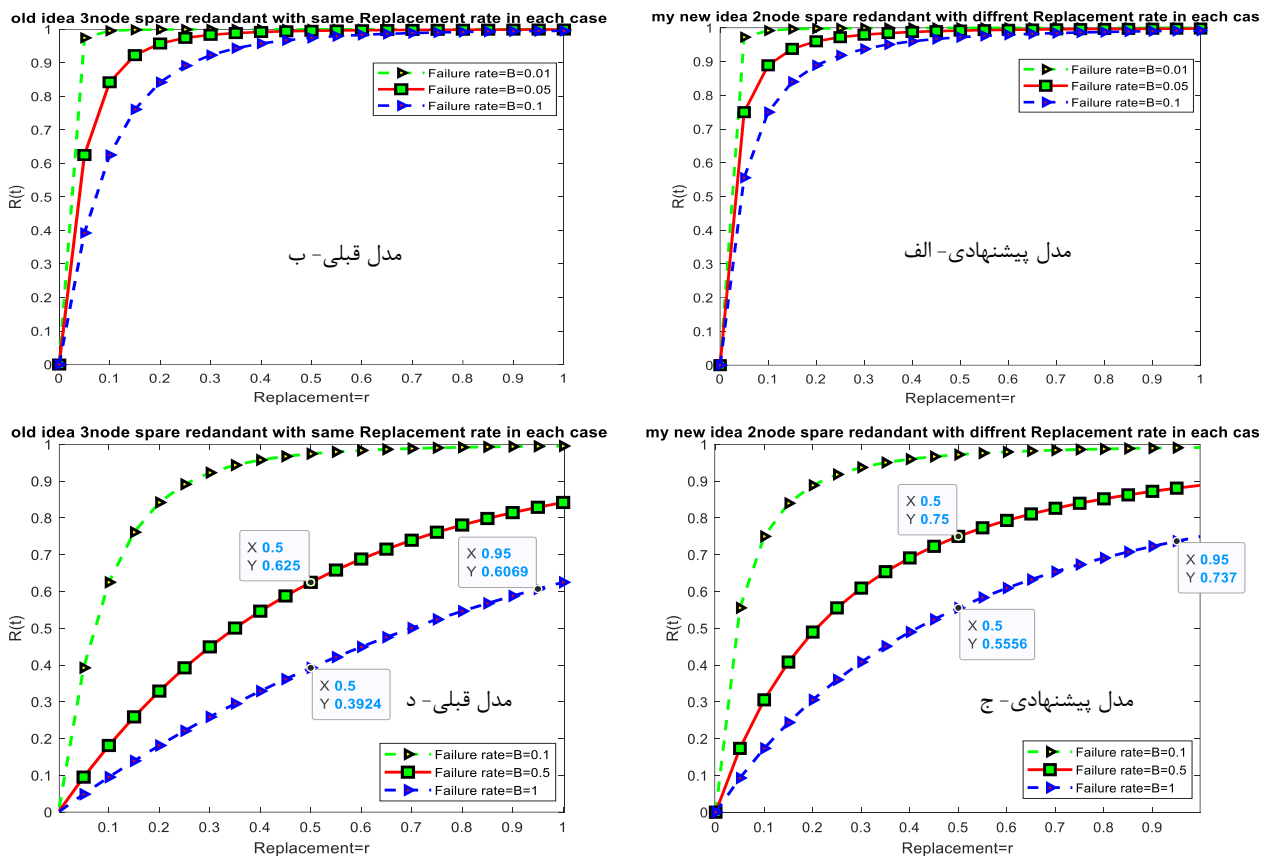
شکل (۱۶): مقایسه نتایج شبیه‌سازی قابلیت اطمینان مدل پیشنهاد شده [۱۸] با مدل پیشنهادی نسبت به نرخ خرابی و تغییر نرخ جایگزینی

## ۵-۲- مقایسه نتایج شبیه‌سازی

برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی پژوهش فعلی با پژوهش‌های گذشته طبق شکل (۱۶-الف، ج) شبیه‌سازی قابلیت اطمینان مدل پیشنهادی و شکل (۱۶-ب، د) مقاله پیشنهاد شده [۱۸]، نسبت به نرخ خرابی و تغییرات نرخ جایگزینی می‌توان پرداخت. با مقایسه نتایج مدل



پیشنهادی در نرخ خرابی مختلف و نرخ جایگزینی مشابه نقطه به نقطه، شیب کاهش قابلیت اطمینان مدل پیشنهادی نسبت به مدل قبلی کمتر است، و بهبود قابلیت اطمینان آشکار است. نتایج کمی طبق شکل (۱۶-الف) با شکل (۱۶-ب) در نرخ خرابی یک و نرخ جایگزینی ۰.۱ نمایانگر کاهش قابلیت اطمینان تا ۰.۲ در مدل پیشنهادی می‌باشد و در مدل [۱۸] تا ۰.۱ کاهش می‌یابد و نتایج کمی طبق شکل (۱۶-ج) با شکل (۱۶-د) در نرخ خرابی یک و نرخ جایگزینی یک نمایانگر کاهش قابلیت اطمینان تا ۰.۷۵ در مدل پیشنهادی می‌باشد و در مدل [۱۸] تا ۰.۶۲ کاهش می‌یابد و برای نرخ جایگزینی ۰.۵ یا ۰.۵٪ نمایانگر کاهش قابلیت اطمینان تا ۰.۵۷ در مدل پیشنهادی می‌باشد و در مدل [۱۸] تا ۰.۴ کاهش می‌یابد.



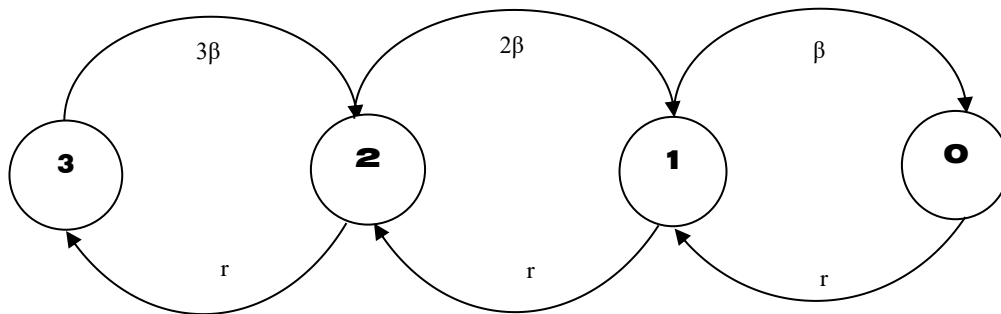
شکل (۱۷): مقایسه نتایج شبیه‌سازی قابلیت اطمینان مقاله پیشنهاد شده با مدل پیشنهادی نسبت به نرخ جایگزینی و تغییر نرخ خرابی

شکل (۱۷-الف، ج) شبیه‌سازی قابلیت اطمینان مدل پیشنهادی را با شکل (۱۷-ب، د) مقاله پیشنهاد شده [۱۸]، نسبت به نرخ جایگزینی و تغییر نرخ خرابی را نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج مدل پیشنهادی در نرخ جایگزینی مختلف و نرخ خرابی مشابه نقطه به نقطه، شیب افزایش قابلیت اطمینان مدل پیشنهادی نسبت به مدل قبلی بیشتر است و بهبود قابلیت اطمینان، کاملاً آشکار است. نتایج کمی طبق شکل (۱۷-الف) با شکل (۱۷-ب) در نرخ خرابی ۰.۱ و نرخ جایگزینی ۰.۲ منحنی آبی رنگ، نمایانگر افزایش قابلیت اطمینان تا ۰.۹ در مدل پیشنهادی می‌باشد و در مدل [۱۸] تا ۰.۷۵ افزایش می‌یابد و نتایج کمی طبق شکل (۱۷-ج) با شکل (۱۷-د) در نرخ جایگزینی ۰.۹۵ و نرخ خرابی یک منحنی آبی رنگ نمایانگر افزایش قابلیت اطمینان تا ۰.۷۳۷ در مدل پیشنهادی می‌باشد و در مدل [۱۸] تا ۰.۶ افزایش می‌یابد و برای نرخ خرابی ۰.۵ یا ۰.۵٪ منحنی سبز رنگ نمایانگر افزایش قابلیت اطمینان تا ۰.۸۹ در مدل پیشنهادی می‌باشد و در مدل [۱۸] تا ۰.۸۴ افزایش می‌یابد و در نرخ جایگزینی ۰.۵ و نرخ خرابی ۰.۵ منحنی سبز رنگ، نمایانگر افزایش قابلیت اطمینان تا ۰.۷۵ در مدل پیشنهادی می‌باشد و در مدل [۱۸] تا ۰.۶۲۵ افزایش می‌یابد. دلیل برتری روش ما با به کارگیری یک حسگر کمتر در حالت خواب و بیداری که از لحاظ هزینه اقتصادی، مقرون به صرفه‌تر، و مدیریت مصرف بهینه انرژی متناسب با شرایط عملیاتی حسگر و نیاز مصرف و قابلیت اطمینان بالاتر می‌باشد و این موضوع سبب نیل به فناوری اطلاعات سبز و رایانش سبز و در نتیجه انرژی سبز



می شود که با استفاده از سیستم هوش مصنوعی در کمک به افراد در کنار انسانها کلیه این موارد قابل پیاده سازی و اجرا می‌باشد و در تعمیر و نگهداری سیستم هوشمند نیز بسیار کاربردی می‌باشد.

مدل سه قسمتی پیشنهاد شده شکل (۱۸) در سال ۲۰۱۸ بررسی شده است. در این مدل سه قسمتی [۱۸] با سه حسگر مشابه پشتیبان با نرخ خرابی مختلف و نرخ جایگزینی یکسان مطرح شده می‌باشد و این مدل با مدل بررسی شده دوبلکس قابل تعمیر تا دو خرابی و مدل سه قسمتی با سه حسگر مشابه پشتیبان با نرخ خرابی و نرخ جایگزینی مختلف که توسط اینجانب در حال بررسی می‌باشد و به عنوان کار آینده مطرح می‌باشد، قابل مقایسه می‌باشد البته ذکر این نکته ضروریست که مدل شکل (۱۸) شامل استفاده و ایجاد سه خرابی می‌باشد ولی قابلیت تعمیر تنها یک خرابی را دارد و نه سه خرابی، درحالی که دو مدل دو قسمتی دو حسگر مشابه با نرخ تعمیر و جایگزینی مختلف که قابلیت پشتیبانی یک تا دو خرابی را دارد و مدل سه قسمتی سه حسگر مشابه با نرخ تعمیر و جایگزینی مختلف، قابلیت پشتیبانی یک تا سه خرابی را دارد و در شبیه سازی‌ها نتایج کاملا مشهود است.



شکل (۱۸): مدل قابلیت اطمینان پیشنهاد شده با سه حسگر مشابه پشتیبان با نرخ خرابی مختلف و نرخ جایگزینی یکسان [۱۸]

جدول (۳) ویژگی و چالشهای و نتایج مقاله پیشنهادی با دیگر تحقیقات مشابه و مرتبط در بهبود قابلیت اطمینان را مقایسه می نماید. در این جدول نتایج مقالات و مدل های قبل با مدل پیشنهادی دوبلکس به دلیل به کارگیری دو یدک با حالت خواب و بیداری، با دیگر تحقیقات مشابه مرتبط مقایسه شده و مزایا و معایب هر کدام بیان شده است. مقاله پیشنهادی چالشهایی مثل احتمال یک تا دو خرابی در جهت اینکه اگر یک حسگر پشتیبان خراب شود و دو حسگر پشتیبان اگر خراب شوند، در جهت پایداری سیستم چه کارهایی در واحد پشتیبانی می توان انجام داد، تا در زمان بندی مشخص با برنامه ریزی و ایجاد راه حل در اتاق های فکر بتوان یک و دو خطای پیش آمده، از خرابی بیشتر جلوگیری نمود و آنرا پوشش داد بطوریکه هیچ گونه خللی در روند کار پیش نیاید و خطاها پوشش داده شوند. در پی افزایش نرخ جایگزینی با مدیریت واحد پشتیبانی یدک، افزایش قابلیت اطمینان، دقت و حساسیت، با ایجاد زمان بندی مشخص در تعمیرات نود خراب، مانع وقفه در روند کار نیز می توان شد. از معایب این مدل مصرف انرژی و هزینه تعمیرات بالا و داشتن ریسک تاخیر و یا در سرویس نیامدن که این موارد بطوریکه با کاربرد حالت سرد یا خواب و بیداری، دو مورد اول یعنی مصرف انرژی و هزینه تعمیرات کاسته می شود و فقط ریسک تاخیر و یا در سرویس نیامدن از معایب این مدل می باشد و در حالت گرم یا بیداری دو نود پشتیبان یدک، مصرف انرژی، هزینه تعمیرات و خستگی کاری بالاست و در صنعت کاربرد آن بایستی قابل توجیه اقتصادی باشد و تحقیقات در این زمینه جهت کاهش ریسکها ادامه دارد ولی در عوض ریسک تاخیر و یا در سرویس نیامدن را ندارد.



جدول (۳): مقایسه ویژگی و چالشهای مقاله پیشنهادی با دیگر تحقیقات مشابه

انواع مدلها - نتایج مقالات		ویژگی ها و چالشها و مشکلات	
پشتیبان	مدل یک حسگر بدون پشتیبان	نتیجه سیستم / مزایا / معایب	نا پایدار
	راه حل	یدک	یدک
	نتیجه سیستم	پایدار	نا پایدار
یدک	مدل دو حسگر با پشتیبان امکان جایگزینی یک	مزایا / معایب	معایب
	راه حل	دو جایگزین	دو جایگزین
	نتیجه سیستم	پایدار	پایدار
پشتیبان امکان جایگزینی دو یدک	مقاله پیشنهادی: مدل دو قسمتی با پشتیبان امکان جایگزینی دو یدک	مزایا / معایب	معایب
	راه حل	امکان جایگزینی دو یدک	امکان جایگزینی دو یدک
	نتیجه سیستم	پایدار	پایدار
پشتیبان حسگر گره حسگر قابل تعمیر سه قسمتی مقاله پیشنهادی ۲۰۱۸ [۱۸]	سیستم گره حسگر قابل تعمیر سه قسمتی مقاله	مزایا / معایب	معایب
	راه حل	تعمیر و پوشش یک و دو	تعمیر و پوشش یک و دو
	نتیجه سیستم	پایدار	پایدار

### ۶- نتیجه گیری

در شبکه‌هایی که نیاز به قابلیت اطمینان بسیار بالایی از انتقال داده دارند، می‌توان از روش گره آماده‌باش و تهیه نسخه گره پشتیبان برای هر گره، استفاده کرد. یک راه‌حل برای دستیابی به قابلیت اطمینان بهتر سیستم، بهبود کیفیت قطعات یدکی و دیگری، افزایش تعداد گره یدک تا حدودی و راه‌حل بهتر در هنگام وقوع خرابی، تعمیر و در صورت عدم تعمیر به دلایل مختلف، تعویض فوری و استفاده از لوازم یدکی است تا شرایط مطلوب، که تضمین سلامت دو حسگر می‌باشد، حاصل آید که معماری جدید مدل پیشنهادی، هر سه موضوع را پوشش می‌دهد. نرخ جایگزینی بیشتر، به معنای قابلیت تعمیر و جایگزینی دو خرابی می‌باشد که با افزایش نرخ خرابی یا



خطای تجهیزات، قابلیت اطمینان  $R(t)$  کاهش و از یک کمتر می‌شود که قبل از وقوع خرابی با افزایش نرخ جایگزینی، و هدایت حسگر به سمت تعمیر و یا در نهایت تعویض قطعه خراب شده، قابلیت اطمینان بهبود خوبی می‌یابد. افزایش تعداد گره‌های یدک جهت اطلاعات مشابه بیش از ۲ و یا نهایت ۳ جزء، صرف هزینه زیاد، تاثیر کمی در بهبود قابلیت اطمینان دارد و بایستی بیشتر بررسی گردد. بدلیل آنکه یک قطعه یدک، قابلیت اطمینان را تا حد زیادی افزایش می‌دهد ایده دو حسگر پشتیبان به نظر کافی می‌باشد و می‌توان با استفاده از مدل دو حسگر پیشنهادی و افزایش نرخ جایگزینی قابلیت اطمینان را بالاتر برد. با گذر زمان و یا طول عمر تجهیزات قابلیت اطمینان کاهش می‌یابد و منجر به ایجاد خطا و خرابی می‌شود با ارایه تدبیری در برنامه ریزی واحد تعمیر و نگهداری و انجام تعمیر و جایگزینی به موقع، باعث افزایش نرخ جایگزینی و کاهش نرخ خرابی شده از افت قابلیت اطمینان و گسترش خرابی می‌توان پرهیز نمود. همچنین نتایج احتمالات در شکل‌های دقیق و خلاصه شده برای گره اصلی و یک گره پشتیبان با یکدیگر مشابه می‌باشد. در روش پشتیبانی بیشتر با سه گره و نرخ جایگزینی مشابه علاوه بر صرف هزینه بیشتر، نسبت به مدل پیشنهادی مقاله دو حسگر، دارای قابلیت اطمینان کمتری نیز می‌باشد و چون خیلی هزینه‌بر می‌باشد اولویت، با به کار گیری مدل پیشنهادی می‌باشد چرا که نتایج کمی نمایانگر افزایش قابلیت اطمینان از ۰.۱ تا ۰.۲ در مدل پیشنهادی نسبت به مدل اصلی، در نرخ خرابی و نرخ جایگزینی مختلف می‌باشد. و روش سه گره با پشتیبانی بیشتر و نرخ جایگزینی مختلف نیز به عنوان کار آینده، مورد تحقیق و قابل بررسی می‌باشد. و برای WSN که اطلاعات خیلی حساس می‌باشند وجود دو گره پشتیبان کافیهست. همچنین برای بازدهی و کارایی بیشتر، به عمر مفید تجهیزات اهمیت داده لذا زودتر قطعات مستعمل را تعویض تا به عنوان یدک در دسترس باشند. همچنین نشان داده شد که شاخص  $R(t)$  نسبت به تغییرات  $\alpha, \beta$  بسیار حساس می‌باشد و تسهیلات تعمیر و تعویض یک و دو حسگر در وقوع خرابی، میانگین عمر شبکه و تجهیزات را افزایش می‌دهد و این مدل همه چالشها مثل احتمال یک تا دو خرابی و خطا، خستگی کاری، مصرف انرژی و هزینه تعمیرات بالا را پوشش می‌دهد و باعث افزایش قابلیت اطمینان، دقت و حساسیت، پشتیبانی یدک و نرخ جایگزینی می‌شود واز معایب این مدل داشتن ریسک تاخیر و یا در سرویس نیامدن که باعث ایجاد وقفه می‌شود و همچنین با برنامه ریزی از قبل زمان تعمیرات یک تا دو نود خراب را می‌توان به حداقل رساند و مانع وقفه در روند کار شد و به نوعی این عیب را نیز پوشش داد و نتایج حاصل از این مطالعه به عنوان یک تحقیق در تلاش برای کشف مسائل مربوط به تحمل پذیری خطا و قابلیت اطمینان در قیاس با مدل تریپلکس به عنوان کار آینده پیشنهاد گردید.

## مراجع

- [1] J. N. pour, M. A. Pourmina, M. N. Moghaddasi, and B. Ghalamkari, "An artificial intelligent network model to monitor the condition of a patient with a breast tumor based on fuzzy logic," *Health and Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 119-139, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s12553-023-00800-z>.
- [2] D. Bein, V. Jolly, B. Kumar, and S. Latifi, "Reliability modeling in wireless sensor networks," *International Journal of Information Technology*, vol. 11, no. 2, pp. 1-8, 2005, doi: 10.2174/1872212113666191209091947.
- [3] L. Xing, H. Li, and H. E. Michel, "Fault-tolerance and reliability analysis for wireless sensor networks," *International Journal of Performability Engineering*, vol. 5, no. 5, p. 419, 2009, doi: 10.23940/ijpe.09.5.p419.mag.
- [4] C. Vasar, O. Prosteian, I. Filip, R. Robu, and D. Popescu, "A reliability analysis for wireless sensor networks in a wind farm," in *2009 XXII International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies*, 2009: IEEE, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICAT.2009.5348408.
- [5] M. Chahine, C. Taddia, and G. Mazzini, "Reliable Data Forwarding in Wireless Sensor Networks: Delay and Energy Trade Off," *SCIYO. COM*, p. 289, 2010, doi: 10.5772/10168.
- [6] V. Kumar, R. Patel, M. Singh, and R. Vaid, "Markov model for reliable packet delivery in Wireless Sensor Networks," *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, vol. 8, no. 3, p. 429, 2011, doi: 10.1109/ICCP.2009.5284742.
- [7] R. Kim, J. Song, and B. F. Spencer Jr, "Reliability analysis of wireless sensor networks," in *Proceedings of the 6th international workshop on advanced smart materials and smart structures technology ANCRiSST2011*, 2011, pp. 1-12, doi: 10.1109/ICON.2008.4772586.
- [8] I. Silva, L. A. Guedes, P. Portugal, and F. Vasques, "Reliability and availability evaluation of Wireless Sensor Networks for industrial applications," *Sensors (Basel)*, vol. 12, no. 1, pp. 806-38, 2012, doi: 10.3390/s120100806.





- [9] L. Venkatesan, S. Shanmugavel, and C. Subramaniam, "A survey on modeling and enhancing reliability of wireless sensor network," *Wireless Sensor Network*, vol. 5, no. 03, p. 41, 2013, doi: 10.4236/wsn.2013.53006.
- [10] M. Kumar, R. Tripathi, and S. Tiwari, "A reliable real-time routing protocol for industrial wireless sensor networks," in *2014 International Conference on Power, Control and Embedded Systems (ICPCES)*, 2014: IEEE, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICPCES.2014.7062831.
- [11] C. Wang, L. Xing, V. M. Vokkarane, and Y. L. Sun, "Reliability and lifetime modeling of wireless sensor nodes," *Microelectronics Reliability*, vol. 54, no. 1, pp. 160-166, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2013.08.001>.
- [12] A. Munir, J. Antoon, and A. Gordon-Ross, "Modeling and analysis of fault detection and fault tolerance in wireless sensor networks," *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, vol. 14, no. 1, pp. 1-43, 2015, doi: 10.1145/2680538.
- [13] M. Kumar, R. Tripathi, and S. Tiwari, "Critical data real-time routing in industrial wireless sensor networks," *IET Wireless Sensor Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 144-150, 2016, doi: 10.1049/iet-wss.2015.0060.
- [14] M. Kumar, R. Tripathi, and S. Tiwari, "QoS guarantee towards reliability and timeliness in industrial wireless sensor networks," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 77, no. 4, pp. 4491-4508, 2018, doi: 10.1007/s11042-017-4832-5.
- [15] D. Deif and Y. Gadallah, "A comprehensive wireless sensor network reliability metric for critical Internet of Things applications," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2017, pp. 1-18, 2017, doi: 10.1186/s13638-017-0930-3.
- [16] I. Kabashkin and J. Kundler, "Reliability of sensor nodes in wireless sensor networks of cyber physical systems," *Procedia Computer Science*, vol. 104, pp. 380-384, 2017, doi: 10.1016/j.procs.2017.01.149.
- [17] P. Zhou *et al.*, "A comprehensive technological survey on dependable self-managing CPS: The decade of researches on correctness and dependability," 2017, doi: 10.20944/preprints201707.0044.V1.
- [18] P. A. Wumnaya, S. Musyoki, and W. Mwangi, "Reliability and Availability Analysis of a Triplex Sensor Node System with Shared Repair," *International Journal for Modern Trends in Science and Technology*, vol. 4, no. 06, pp. 79-83, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/s120100806>.
- [19] R. M. Ostberg, "Investing in a Better World: A Study of Country-Level Factors on Investment Outcomes," 2013.
- [20] S. Zoppi, S. P. Shantharam, and W. Kellerer, "Delay-reliability model of industrial WSN for networked control systems," in *GLOBECOM 2020-2020 IEEE Global Communications Conference*, 2020: IEEE, pp. 1-7, doi: 10.1109/GLOBECOM42002.2020.9348072.
- [21] M. Catelani, L. Ciani, A. Bartolini, C. Del Rio, G. Guidi, and G. Patrizi, "Reliability Analysis of Wireless Sensor Network for Smart Farming Applications," *Sensors (Basel)*, vol. 21, no. 22, p. 7683, Nov 18 2021, doi: 10.3390/s21227683.
- [22] H. Yang, F. Li, D. Yu, Y. Zou, and J. Yu, "Reliable data storage in heterogeneous wireless sensor networks by jointly optimizing routing and storage node deployment," *Tsinghua Science and Technology*, vol. 26, no. 2, pp. 230-238, 2020, doi: 10.26599/TST.2019.9010061.
- [23] L. Xing, "Reliability modeling of wireless sensor networks: a review," *Recent Patents on Engineering*, vol. 15, no. 1, pp. 3-11, 2021, doi: 10.3390/s120100806.
- [24] J. Persis, "A novel routing protocol for underwater wireless sensor network using pareto uninformed and heuristic search techniques," *Wireless Personal Communications*, vol. 121, no. 3, pp. 1917-1944, 2021, doi: 10.1007/s11277-021-08747-y.
- [25] H. Zhang *et al.*, "Delay-reliability-aware protocol adaption and quality of service guarantee for message queuing telemetry transport-empowered electric Internet of things," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 18, no. 5, p. 15501329221097815, 2022, doi: 10.1177/15501329221097815.
- [26] F. Joglar, "Reliability, availability, and maintainability," *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, pp. 2875-2940, 2016, doi: 10.1007/978-1-4939-2565-0\_74.
- [27] M. Rentschler and P. Laukemann, "Performance analysis of parallel redundant WLAN," in *Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012)*, 2012: IEEE, pp. 1-8, doi: 10.1109/ETFA.2012.6489647.



- [28] S. S. Gill and R. Buyya, "Failure management for reliable cloud computing: a taxonomy, model, and future directions," *Computing in Science & Engineering*, vol. 22, no. 3, pp. 52-63, 2018, doi: 10.1109/MCSE.2018.2873866.
- [29] M. Atif *et al.*, "Soft computing techniques for dependable cyber-physical systems," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 72030-72049, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2920317.
- [30] A. Zamani, M. A. Pourmina, and R. S. Kandovan, "Improving the Mean Time to Failure of the System with the New Architecture of the Main Node with the Replacement Node of Industrial Wireless Sensor Networks for Monitoring and Control using Markov Model," *Majlesi Journal of Telecommunication Devices*, vol. 11, no. 3, pp. 143-153, 2022, doi: 10.30486/mjtd.2022.695924.

### زیر نویس ها

- 
- <sup>1</sup> Green IT
  - <sup>2</sup> Artificial intelligence
  - <sup>3</sup> machine vision
  - <sup>4</sup> robotics
  - <sup>5</sup> expert systems
  - <sup>6</sup> machine learning
  - <sup>7</sup> Automatic repeat request
  - <sup>8</sup> Field devices
  - <sup>9</sup> Industrial Automation and Process Control
  - <sup>10</sup> Reliable Realtime Routing
  - <sup>11</sup> Fault-Tolerant
  - <sup>12</sup> Not Fault-Tolerant
  - <sup>13</sup> Industrial Wireless Sensor Networks
  - <sup>14</sup> Sensitive
  - <sup>15</sup> Mean time between failure
  - <sup>16</sup> Machine learning
  - <sup>17</sup> Steady-state availability
  - <sup>18</sup> Networked Control Systems
  - <sup>19</sup> Quality of Control
  - <sup>20</sup> Continuous-Time Markov Chain
  - <sup>21</sup> Mean-Time-To-Failure
  - <sup>22</sup> wireless smart sensor network
  - <sup>23</sup> Reliability Centered Maintenance
  - <sup>24</sup> Internet of Things
  - <sup>25</sup> Cyber-physical system
  - <sup>26</sup> Replacement Rate
  - <sup>27</sup> Failure
  - <sup>28</sup> sensor
  - <sup>29</sup> Actuators
  - <sup>30</sup> Over hearing
  - <sup>31</sup> Awake
  - <sup>32</sup> Stand By
  - <sup>33</sup> False positive
  - <sup>34</sup> Sensor sense delay
  - <sup>35</sup> Backoff delay
  - <sup>36</sup> Transmission delay
  - <sup>37</sup> Propagation delay
  - <sup>38</sup> Queuing delay
  - <sup>39</sup> Processing delay

