




Research in Production and Operations Management
University of Isfahan E-ISSN: 2423-6950
Vol. 14, Issue 3, No. 34, Autumn 2023

 <https://doi.org/10.22108/POM.2023.137095.1505>

(Literature review)

Methods of Evaluating the Reliability of Multi-Component Systems: A Comprehensive and Practical Review

Majid Abbasi

Faculty of Management and Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran,
Iran, ma.abasi68@gmail.com

Karim Atashgar*

Faculty of Management and Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran,
Iran, atashgar@iust.ac.ir

Mostafa Khazaei

Faculty of Aerospace Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran,
khazaei_m@mut.ac.ir

Mehdi Karbasian

Faculty of Management and Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran,
Iran, mkarbasi@mut-es.ir

Purpose: This paper aims to analyze comprehensively and structurally the different methods proposed in the literature by researchers, and identify the new fields for future studies.

Design/methodology/approach: In this research, the methods proposed in the literature have been explained comprehensively and structurally focusing on mathematical functions, assumptions, functional objectives, results, weaknesses, and strengths. Different types of dependencies between system components have been also considered in this study.

Findings: In this paper, the methods in the literature were clustered by a new approach based on the system type, dependency, the method of considering the dependency and the objective. The different challenges of this field of study in the future were also investigated in this paper.

Research limitations/implications: Few practical studies in the field of multi-component systems have been performed in the literature.

* Corresponding author, Orcid: 0000-0003-3738-2703



Practical implications: Since the analysis of multi-component systems is considered an important and applied issue in the reliability field for different complex products, the discussion of this paper and the results can be used by technical experts in different industries.


Social implications: This paper can be used as a reference for increasing people's quality of life.

Originality/value: To the best of the authors' knowledge, this is the first time that a comprehensive analysis of multi-component systems is reported in considering its structure and applied approach.

Keywords: Reliability evaluation, Multi-Component Systems, Dependency between components



پژوهش در مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۴، شماره ۳، پیاپی ۳۴، پاییز ۱۴۰۲
دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۹ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۱ ص ۳۵-۶۴

 <https://doi.org/10.22108/POM.2023.137095.1505>

(مقاله مروری)

روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های چند جزئی: یک بررسی جامع و کاربردی

مجید عباسی^۱، کریم آتشگر^{۲*}، مصطفی خزایی^۳، مهدی کرباسیان^۴

۱- دانشجوی دکتری مجتمع مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، ma.abasi68@gmail.com

۲- دانشیار مجتمع مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، atashgar@iust.ac.ir

۳- استادیار مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، khazae_m@iust.ac.ir

۴- استاد مجتمع مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، mkarbasi@mut-es.ir

چکیده: ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های چند جزئی در شرایط وابستگی بین اجزا، یکی از حوزه‌های مطالعاتی جذاب و با اهمیت در مهندسی قابلیت اطمینان است که محققان در سال‌های اخیر به صورت جدی به آن توجه کرده‌اند. معمولاً سیستم‌های موجود در دنیای واقعی، از اجزای متعددی تشکیل شده‌اند، به طوری که وابستگی و آثار متقابل بین این اجزا، قابلیت اطمینان کل سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این مقاله در صدد است تا در یک بررسی جامع، ابعاد مختلف مطالعات انجام شده را برای شناسایی حوزه جدید به صورت ساختاریافته، تحلیل کند. در این مقاله ابتدا اهمیت ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم تشریح و سپس انواع وابستگی بین اجزای سیستم‌ها و رویکردهای مختلف در نظر گرفتن وابستگی بین اجزای سیستم‌ها بررسی شده است. در این بررسی، روش‌های ارائه شده در پیشینه، در قالب یک ساختار منسجم و کاملاً جامع از دیدگاه توابع ریاضیاتی، فرض‌ها، اهداف و نتایج عملکردی، ضعف و قوت، به تفکیک انواع وابستگی بین اجزای سیستم تشریح می‌شود. در این مقاله ضمن دسته‌بندی مطالعات انجام شده با رویکردی جدید، بر مبنای نوع سیستم، وابستگی، روش در نظر گرفتن وابستگی و اهداف روش‌های پیشنهادی و چالش‌های مختلف برای انجام مطالعات آتی بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی قابلیت اطمینان، سیستم‌های چند جزئی، وابستگی بین اجزا

۱- مقدمه

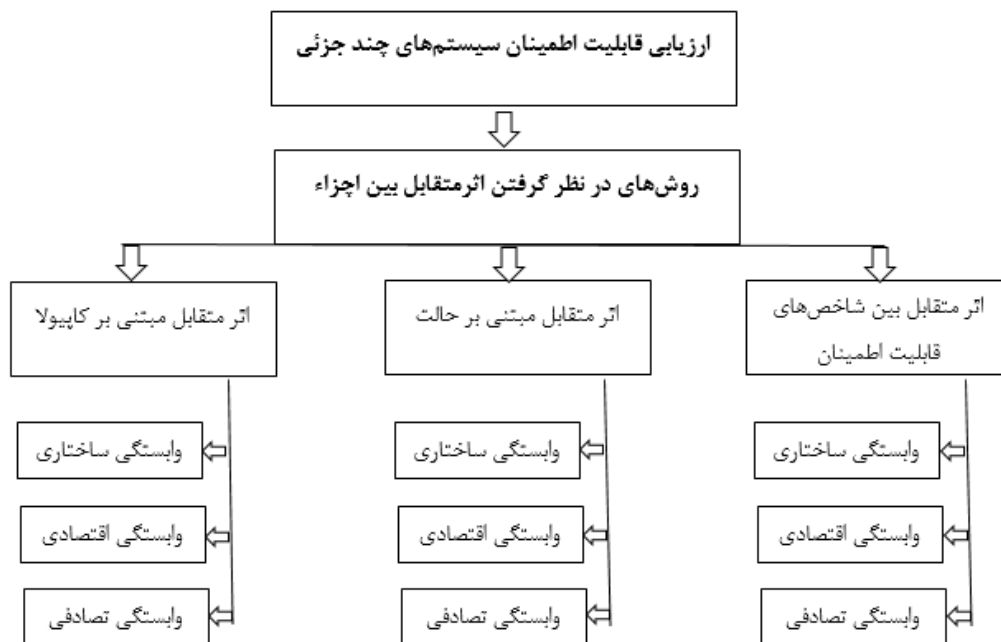
در بیشتر مدل‌های رایجی که برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها وجود دارد، معمولاً فرض کرده‌اند که اجزای سیستم نسبت به یکدیگر مستقل‌اند. این در حالی است که اجزای سیستم‌ها در دنیای واقعی، از هم مستقل نیستند. سیستم‌های موجود معمولاً از اجزای متعددی تشکیل شده‌اند، به طوری که آثار متقابل بین اجزای قابلیت اطمینان کل سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهند. واقعیت آن است که اجزای مرتبط با هر سیستم، در سطوح یکسانی عمل نمی‌کنند و به علاوه وابستگی نیز دارند؛ بنابراین واضح است که عملکرد سیستم به عملکرد اجزای مختلف در ارتباط باهم و به صورت توأم بستگی دارد (کایزر و همکاران^۱، ۲۰۱۷؛ ژانگ و همکاران^۲، ۲۰۱۴؛ بیان و جبرائیل^۳، ۲۰۱۴؛ تیان و لیاو^۴، ۲۰۱۱).

هنگامی که در یک سیستم خرابی رخ می‌دهد، ممکن است به علت یک عامل خارجی یا خرابی فیزیکی هر جزء در سیستم باشد. در هر دو مورد، حالت‌های خرابی یک جزء به صورت جزئی یا کلی، اصل استقلال بین اجزای سیستم را نقض می‌کند و موجب خرابی جزئی دیگر از سیستم می‌شود؛ از این رو برخی از مطالعات موجود در پژوهش‌ها، اثر متقابل خرابی را بررسی کرده‌اند که بیانگر اثر خرابی هر جزء بر خرابی دیگر اجزای سیستم است. با توجه به اهمیت و کاربرد شاخص قابلیت اطمینان در حوزه‌های مختلفی از قبیل نگهداری و تعمیرات، در سال‌های اخیر، پژوهش‌های مختلفی در حوزه ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های چند جزئی ارائه شده است که یکی از چالش‌های اساسی در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم، در نظر گرفتن وابستگی بین اجزای سیستم است (ونگ و همکاران^۵، ۲۰۲۱؛ لی و همکاران^۶، ۲۰۱۹؛ سانگ و همکاران^۷، ۲۰۱۴؛ لیو و همکاران^۸، ۲۰۱۵؛ راسمکومن و پارلیکاد^۹، ۲۰۱۶؛ چین و همکاران^{۱۰}، ۲۰۱۷).

وابستگی بین اجزای سیستم، در سه گروه دسته‌بندی می‌شود: (۱) وابستگی اقتصادی^{۱۱}؛ (۲) وابستگی ساختاری^{۱۲} و (۳) وابستگی تصادفی^{۱۳}.

وابستگی اقتصادی زمانی وجود دارد که ترکیبی از اقدامات متنوع نگهداری و تعمیرات بر اجزا، طوری انجام شود که هزینه‌های نگهداری و تعمیرات سیستم را به حداقل برساند. وابستگی ساختاری به معماری سیستم مربوط است. برخی از اجزا ممکن است به صورت انحصاری، عملکرد خاصی^{۱۴} داشته باشند؛ بنابراین به دلیل ساختار طراحی سیستم، نگهداری از یک جزء، نیازمند متوقف شدن یا خارج کردن اجزای دیگر سیستم است. وابستگی تصادفی زمانی وجود دارد که خرابی یک جزء بر شرایط یک جزء یا اجزای دیگر سیستم اثرگذار باشد. این نوع وابستگی به خرابی، بدون در نظر گرفتن معماری سیستم و یک رابطه بین حالت‌های اجزا به عنوان اصلی ذاتی، نشان‌دهنده آن است که خرابی یا افت^{۱۵} یک جزء، قابلیت اطمینان اجزای دیگر و در نتیجه قابلیت اطمینان کل سیستم را تغییر می‌دهد (دکر و همکاران^{۱۶}، ۱۹۹۷؛ ونگ و همکاران، ۲۰۲۲).

مقاله حاضر بر مرور و بررسی مدل‌های ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های چند جزئی با در نظر گرفتن وابستگی بین اجزا تمرکز دارد. این مقاله می‌کوشد تا طبقه‌بندی کاربردی و ساختاریافته‌ای از مطالعات انجام شده در پژوهش‌ها را مطابق با ساختار مفهومی شکل ۱ ارائه کند.



شکل ۱- ساختار مفهومی طبقه‌بندی و بررسی مطالعات انجام‌شده در پژوهش‌ها

Fig 1- The conceptual structure of classification and review of studies done in literature

این مقاله به صورت زیر سازمان‌دهی شده است: بخش ۲، در قالب زیربخش‌های مختلف، مطالعات انجام‌شده در زمینه قابلیت اطمینان و اثر متقابل بین اجزای سیستم را بررسی و طبقه‌بندی کرده و به تفکیک نوع وابستگی اختصاص یافته است. در بخش ۳ مطالعات انجام‌شده و بررسی شده در این مقاله ارزیابی شده است. در بخش ۴، نتیجه‌گیری تحقیق بیان شده است.

۲- روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان و وابستگی بین اجزا

وابستگی بین اجزای سیستم، از طریق اثر متقابل بین شاخص‌های قابلیت اطمینان^{۱۷} در نظر گرفته می‌شود. در این رویکرد، شاخص‌ها (مانند نرخ خرابی، میانگین زمان بین خرابی‌ها و...) معمولاً با روابط ریاضیاتی به یکدیگر مرتبط می‌شوند. همچنین پژوهش‌ها نشان می‌دهد که معمولاً در این رویکرد، وابستگی‌های ساختاری و اقتصادی بین اجزا در سیستم‌های با ساختار ساده بررسی شده است (ونگ و همکاران [۲۰۲۱](#)، دانگ و همکاران^{۱۸}، [۲۰۲۱](#)، کانگ و همکاران^{۱۹}، [۲۰۲۲](#)).

در رویکردی دیگر با عنوان اثر متقابل مبتنی بر حالت^{۲۰}، معمولاً از طریق تعریف و بررسی متغیرهای حالت، که بیانگر وضعیت عملکردی اجزای سیستم‌اند، وابستگی بین اجزا و تغییرات در وضعیت خرابی سیستم بررسی می‌شود. این رویکرد معمولاً ضمن در نظر گرفتن وابستگی‌های ساختاری و تصادفی بین اجزای سیستم، کاربردهای درخور توجهی در زمینه نگهداری و تعمیرات مشروط دارد (چن و همکاران^{۲۱}، [۲۰۱۱](#)؛ سانگ و همکاران، [۲۰۱۴](#)؛ جین و همکاران، [۲۰۱۸](#)).

در رویکرد اثر متقابل مبتنی بر کاپیولا^۲، یک تابع کاپیولا که مرتبط با قابلیت اطمینان اجزاست، چندین تابع توزیع تجمعی حاشیه‌ای تک متغیره را به یکدیگر متصل و یک تابع توزیع تجمعی توأم چند متغیره را ارائه می‌کند. درواقع کاپیولا مبتنی بر ارتباط و وابستگی غیرخطی بین متغیره‌ها و پیونددهنده توزیع توأم و توابع حاشیه‌ای است. به صورت کلی تابع توزیع تجمعی توأم کاپیولا مانند رابطه (۱) است:

$$C(u_1, u_2, \dots, u_p) = Pr(U_1 \leq u_1, U_2 \leq u_2, \dots, U_p \leq u_p) \quad (1)$$

تعداد زیادی کاپیولا وجود دارد که معمولاً محققان از کاپیولاهای گاوسی^۳، ارشمیدسی و بیضوی استفاده کرده‌اند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ فانگ و همکاران^۴، ۲۰۲۰؛ چن و سان^{۲۲}، ۲۰۲۲).

۲-۱- وابستگی ساختاری

در مطالعه‌ای با در نظر گرفتن یک سیستم چند جزئی، استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات مقایسه شده است. در این رویکرد هر جزء i دچار یک خرابی جزئی^۵ با احتمال $1-P_i$ و یا دچار خرابی اصلی^۶ و مؤثر بر خرابی دیگر اجزای سیستم با احتمال P_i می‌شود. در مدل پیشنهادی $\{y_{1i} | 1 \leq i \leq N\}$ ، $Y = \min$ زمان تا اولین جایگزینی سیستم تعریف می‌شود، یعنی جایی که y_{1i} زمان تا خرابی جزء i و توقف سیستم است. تابع قابلیت اطمینان y_{1i} به صورت رابطه (۲) پیشنهاد شده است:

$$\bar{F}_{p_{sj}}(t) = \exp\left\{-\int_0^t [P_i(x)h_i(x)]dx\right\} \quad (2)$$

$$\bar{F}(t) = \exp\left\{-\int_{i=1}^N [P_i(x)h_i(x)]dx\right\}$$

نتایج ارزیابی نشان‌دهنده آن است که در نظر گرفتن اثر متقابل خرابی به پیش‌بینی بهتر هزینه‌های نگهداری و تعمیرات سیستم کمک می‌کند. مدل پیشنهادی مبتنی بر استراتژی‌های جایگزینی نگهداری و تعمیرات ارائه شده است که نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری و قوت روش پیشنهادی است (جانگ و شو^{۳۳}، ۲۰۰۰).

در مطالعه‌ای با در نظر گرفتن سیستم دو جزئی با یک جزء بحرانی و تعمیرشدنی و وابسته به جزء دیگر تعمیرشدنی و تحت اثر شوک‌های تصادفی، فرض کرده‌اند که جزء ۱ باعث خرابی فوری^۷ جزء ۲ می‌شود، یا با توجه به انباشت شوک‌های چندگانه، باعث خرابی جزء ۲ می‌شود، به گونه‌ای که سیستم باید در N -th امین خرابی، هر زمان که جزء ۲ دچار خرابی شد، جزء ۱ را جایگزین کرده باشد. محاسبه شاخص «میانگین زمان تا جایگزینی»^{۲۴} از طریق رابطه (۳) پیشنهاد شده است:

$$MTTR = \sum_{j=0}^{N-1} (1-p_1) \dots (1-p_j) \int_0^{\infty} \frac{[H(t)]^j}{j!} e^{-H(t)} dt \quad (3)$$

$$\text{Where } H(t) = \int_0^t h(u) du$$

درباره اثر متقابل آسیب شوک^{۲۵}، زمانی که آسیب کلی به سطح آستانه Z رسیده است، جزء ۱ باعث آسیب به جزء ۲ با توزیع $G(X)$ شده است؛ بنابراین محاسبه شاخص «میانگین زمان تا جایگزینی» از طریق رابطه (۴) پیشنهاد شده است:

$$MTTR = \sum_{j=0}^{N-1} G^j(Z) \int_0^{\infty} \frac{[h(t)]^j}{j!} e^{-h(t)} dt \quad (4)$$

مدل مذکور به منظور تعیین سیاست جایگزینی با هدف به حداقل رساندن هزینه، با توجه به سن سیستم (t) و آستانه (Z)، از شوک‌های انباشته شده به وسیله جزء ۲ پیشنهاد شده است (ساتو و اوساکی^{۲۶}، ۲۰۰۳). در مطالعه‌ای یک سیستم دو جزئی با یک جزء بحرانی و تعمیرشدنی و وابسته به جزء دیگر تعمیرشدنی و تحت اثر شوک‌های تصادفی، در نظر گرفته شده است. هدف از مدل پیشنهادی، مشخص کردن آستانه شوک‌های انباشته شده به وسیله جزء ۲ و نشان دادن تکامل زمان تعمیر Δn در چرخه N-th است. توابع توزیع Y_i, X_i و Z_n به ترتیب از طریق $F(t), H(t)$ و $G_n(t)$ نشان داده شده‌اند، به طوری که:

$$G_n(t) = G(b^{n-1}t) \quad (5)$$

$$\Delta_n = a\Delta_{n-1} = a^{n-1}\Delta \quad (0 < a, b \leq 1)$$

مدل پیشنهادی از طریق رابطه (۶) ارائه شده است:

$$P(V_i = k) = P(Z_1 + Z_2 + \dots + Z_{k-1} < a^{i-1}\Delta < Z_1 + Z_2 + \dots + Z_k) \quad (6)$$

$$P(V_i = k) = H^{(k-1)}(a^{i-1}\Delta - H^{(k)}a^{i-1}\Delta) \quad k = 1, 2, \dots$$

در مدل پیشنهادی T_i و V_i به ترتیب زمان بین خرابی‌ها و تعداد خرابی‌های جزء ۱ در چرخه عملیات i-th تعریف شده‌اند. Z_i نشان‌دهنده دامنه کل شوک‌های انباشته شده به علت خرابی جزء ۲ است. نتایج ارزیابی مدل پیشنهادی نشان می‌دهد مدل مذکور در تعیین یک رابطه بین سن سیستم و زمان تعمیرات، در حالی که شامل اثر متقابل آسیب شوک است، موفق بوده است. در حالی که در مدل پیشنهادی در واقعیت، طول زمان تعمیرات با توجه به دخالت عامل انسانی در فرآیند تعمیر و میزان تصادفی بودن، شدت هندسی توصیف نمی‌شود (وانگ و ژانگ^{۲۷}، ۲۰۰۹).

محققان در دو مطالعه، آثار متقابل با اثر فوری یا اثر تدریجی وابستگی بین سیستم‌های فیزیکی را بررسی و شناسایی کرده‌اند. در یک سیستم با N جزء، یک نرخ خرابی ذاتی مستقل برای هر جزء $i (i = 1, 2, \dots, N)$ در نظر گرفته شده است که عبارت است از $h_{ij}(t)$ و همچنین یک نرخ خرابی با اثر متقابل نیز دارد که برابر است با $h_i(t)$. محاسبه نرخ خرابی برای هر جزء، تحت تأثیر اثر متقابل دیگر اجزا از طریق رابطه (۷ و ۸) پیشنهاد شده است:

$$h_i(t) = \Phi_i [h_{ij}(t) + \bar{h}_{ij}(t)]_g \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

$$h_i(t) = h_{ij}(t) + \sum_{j \neq i} \theta_{ij}(t) \bar{h}_{ij}(t)_g \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

$\bar{h}_{ij}(t)_g$ برداری از نرخ خرابی، قبل از هرگونه اثر متقابل جزء i. در رابطه (۷)، θ_{ij} نشان‌دهنده ضرایب اثر متقابل بین اجزا و پارامتری بین * (بدون اثر متقابل) تا ۱ (اثر متقابل کامل) است. از قوت چنین رویکردی، بررسی آثار متقابل بین اجزا به صورت فوری یا تدریجی است. اما مشخص است که ایجاد ماتریس ضرایب اثر متقابل بین اجزا در دو حالت فوری یا تدریجی دشوار و نیازمند آزمایش‌ها و مدل‌های تخمین پیچیده است (سان و همکاران^{۲۸}، ۲۰۰۶؛ سان و ما^{۲۹}، ۲۰۱۰). در مطالعه‌ای، وابستگی بین حالات خرابی اجزای سیستم از طریق یک کاپیولا ρ_p برای یک سیستم با p حالت خرابی مدل بررسی شده است. در این رویکرد با توجه به اینکه متقابل ممکن است

مکانیزم‌های اثر تحت تأثیر تفاوت سطوح تنش مختلف قرار گیرد، کاپیولا تابع قابلیت اطمینان $C_p (R_{i1}(t), \dots, R_{ip}(t) | \theta)$ را پیشنهاد داده‌اند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۴).

در مطالعه‌ای، محاسبه قابلیت اطمینان هر جزء Π م در زمان t از طریق رابطه (۹) پیشنهاد می‌شود:

$$R^i(t) = P[T_f > t] = 1 - P(T_f > t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f_i(u) du \quad (9)$$

در رابطه فوق، T_f^i بیانگر متغیر تصادفی زمان خرابی جزء Π است. در استراتژی پیشنهادی از طریق مقایسه قابلیت اطمینان پیش‌بینی شده با حد آستانه‌ای، اجزای سیستم، که نیاز به اقدامات نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه دارند، شناسایی می‌شوند و در گام بعدی، اقدامات نگه‌داری و تعمیرات به صورت گروهی برای اجزای شناسایی شده انجام می‌شود که علاوه بر بهبود قابلیت اطمینان سیستم، باعث کاهش پذیرفتنی هزینه‌های نگه‌داری و تعمیرات می‌شوند (نگوین و همکاران^{۳۰}، ۲۰۱۴).

در مطالعه‌ای، دو فرآیند خرابی تحت وابستگی ساختاری از طریق تابع کاپیولا $H(x, y) = C\{F(x), G(y)\}$ به صورتی که $F(x)$ و $G(y)$ توابع چگالی متغیرهای تصادفی x و y و $H(x, y)$ تابع توزیع مشترک $F(x)$ و $G(y)$ است، مدل شده است. در مدل مذکور، تابع قابلیت اطمینان به صورت رابطه (۱۰) تعریف شده است:

$$R(t) = P\{Z_{i1} < \omega_1, Z_{i2} < \omega_2\} = C(R_1(\omega), R_2(\omega)) \quad (10)$$

نتایج ارزیابی مدل فوق با استفاده از داده‌های مربوط به خستگی و ترک^{۳۱} مربوط به دو ترمینال در یک قطعه الکترونیکی، نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی با ترکیب‌های مختلف فرآیند گاما، تحت آثار تصادفی از طریق روش فرانک کاپیولا^{۳۲}، مسیرهای افت را به صورت مناسبی نمایش می‌دهد و همچنین قابلیت اطمینان و عمر باقی‌مانده مطالعه شده را دقیق‌تر ارزیابی می‌کند (رودریگز پیکن^{۳۳}، ۲۰۱۷). رویکرد پیشنهادی (کیم و همکاران^{۳۴}، ۲۰۱۹) برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان سیستم، مبتنی بر فرآیند مدیریت رشد قابلیت اطمینان در مرحله اولیه توسعه سیستم، شامل هفت مرحله است: (۱) طبقه‌بندی مراحل مدیریت رشد قابلیت اطمینان بر اساس تغییرات طراحی اصلی است. از مرحله ۲ تا ۵، قابلیت اطمینان سیستم بر اساس قابلیت اطمینان پیش‌بینی شده زیرسیستم‌ها و مدل‌ها، پیش‌بینی می‌شود. در مرحله ۶، قابلیت اطمینان پیش‌بینی شده سیستم در هر مرحله با مرحله قبلی مقایسه و به این صورت، رشد قابلیت اطمینان بررسی می‌شود. در مرحله ۷، هنگامی که مقدار پیش‌بینی شده قابلیت اطمینان سیستم، قابلیت اطمینان هدف را برآورده نمی‌کند، برخی از گزینه‌های طراحی برای بهبود قابلیت اطمینان سیستم پیشنهاد می‌شود. نتایج نشان می‌دهد پیش‌بینی قابلیت اطمینان بر اساس مدیریت رشد قابلیت اطمینان، یک گزینه کارآمد برای ارزیابی رشد قابلیت اطمینان سیستم در مرحله توسعه اولیه است (کیم و همکاران، ۲۰۱۹). در مطالعه مدلی مبتنی بر ارتباطات ماتریسی برای تعیین کمیت اثر دمونتاژ کردن هر جزء دارای خرابی بر قابلیت اطمینان سیستم یک یا چند جزئی، با امکان در نظر گرفتن عوامل تأثیرگذار مختلف، مانند ویژگی‌های هر جزء، قدرت اتصال بین اجزا و همچنین میزان تخصص تکنسین و ابزار استفاده شده برای دمونتاژ کردن، فرموله شده است. نتایج حاصل از ارزیابی مدل پیشنهادی در قالب مثال عددی با داده‌های یک سیستم گیربکس، نشان‌دهنده کاربرد مدل ارائه شده در نگه‌داری و تعمیرات گروهی یا تک‌جزئی است (دینه و همکاران^{۳۵}، ۲۰۲۰). در مطالعه‌ای، مدلی برای ارزیابی نرخ خرابی

اجزای سیستم با هدف بهینه‌سازی و به حداقل رساندن هزینه‌های نگهداری و تعمیرات سیستم‌های چند جزئی با وابستگی ساختاری، تحت سیاست کاری توسعه دوره و اراتنی ارائه شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های عددی نشان می‌دهد مدل پیشنهادی در به حداقل رساندن هزینه و همچنین تجزیه و تحلیل تأثیر عملیات دمونتاژ اجزای سیستم بر استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات سیستم، عملکرد مناسبی دارد (وانگ و همکاران^{۳۶}، ۲۰۲۱). شیانگ و همکاران^{۳۷} (۲۰۲۳)، یک چارچوب تحلیل قابلیت اطمینان را برای سیستم‌های چند جزئی تولیدی وابسته به خرابی پیشنهاد داده‌اند که در آن از توابع کاپولا با پارامترهای بهینه، برای توصیف همبستگی‌های مختلف خرابی استفاده می‌شود. در رویکرد پیشنهادی، یک مدل استنتاج فازی برای تعیین قابلیت اطمینان هر زیرسیستم براساس اجزای آن ارائه شده است. در سطح وابستگی بین خرابی اجزا، از یک شبکه بیزی برای تحلیل قابلیت اطمینان سیستم براساس ساختار سیستم همراه با تأثیر وابستگی خرابی در داخل سیستم استفاده شده است. در مدل پیشنهادی، احتمال مشترک $P(X_1, X_2, \dots, X_n)$ براساس شبکه بیزین از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | P(X_i)) \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، $P(X_i)$ نشان‌دهنده گره والد و گره فعلی^{۳۸} است و $P(X_i | P(X_i))$ بیانگر احتمال شرطی گره فعلی است که با گره والد مشخص شده است. نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی نشان می‌دهد نتایج تحلیل قابلیت اطمینان سیستم در موارد مختلف معقول و مؤثر است. در مقایسه با روش شبکه بیزی کاپولا، روش پیشنهادی، سازگاری بهتری با سیستم‌های وابسته به خرابی مختلف نشان می‌دهد.

۲-۲- وابستگی اقتصادی

در مطالعه‌ای، یک سیستم دارای جزء ۲ تعمیرشدنی و جزء ۱ تعمیرنشده است، به طوری که هر خرابی جزء ۲ نرخ خرابی جزء ۱ را افزایش می‌دهد. به صورت معکوس، اگر جزء ۱ خراب شود، جزء ۲ بلافاصله دچار خرابی می‌شود. در این مدل، محاسبه نرخ خرابی جزء ۲ از طریق رابطه (۱۲) عبارت است از:

$$h_1(t) \sum_{j=0}^{\infty} h_1(t | N_2(t) = j) \times P(N_2(t) = j) \quad (12)$$

در رابطه فوق $N_2(t)$ برابر تعداد خرابی‌های جزء ۲ است. در مدل مذکور، مفهوم حداقل تعمیرات به جزء ۲ اعمال شده است، به صورتی که وابستگی‌های اقتصادی در یک سیستم، با تعیین یک سیاست جایگزینی با تعداد بهینه حداقل تعمیرات در نظر گرفته شده باشد (لای و یان^{۳۹}، ۲۰۱۶). در مطالعات مختلف، هیچ جزء غالب از پیش تعیین شده‌ای وجود ندارد. به علاوه فرض شده است که یک جزء، مجموعه محدودی از حالت‌ها $\{0, \dots, m\}$ را دارد. در این مدل فرض می‌شود که فرصت نگهداری و تعمیرات دیگر اجزا از فرآیند پواسون، با شدت $\mu = h_f + \mu_p$ پیروی می‌کند، یعنی جایی که h_f نرخ خرابی و μ_p نگهداری پیشگیرانه اجزای دیگر است. P_{ij} بیانگر احتمال انتقالی است که باعث می‌شود وضعیت یک جزء بدتر شود و از حالت i به حالت j و q_{ij} درآید و یک احتمال انتقال دیگر ناشی از خرابی‌های اجزای دیگر تعریف شود. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد

استفاده از روش زنجیره مارکوف برای تعیین ماتریس انتقال براساس داده‌های مشاهده‌شده، مفید است (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۵).

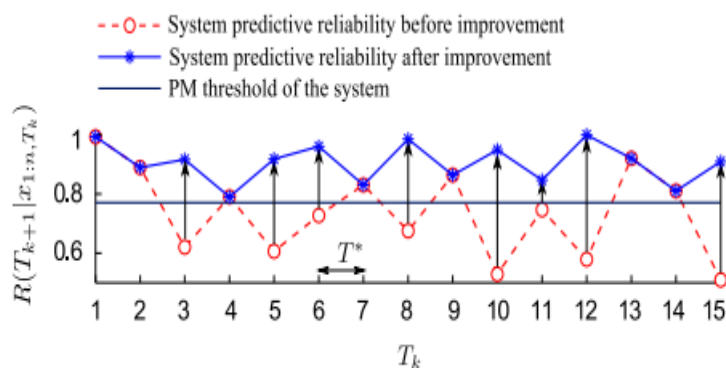
در مطالعه‌ای، اثر متقابل بین اجزا از طریق ماتریس احتمال $P=(P_{ij})$ با در نظر گرفتن اثر متقابل نوع ۱ بررسی شده است، به گونه‌ای که خرابی جزء i باعث خرابی فوری جزء j با احتمال P_{ij} و بدون هیچ تأثیری با احتمال $1-P_{ij}$ می‌شود. در این مطالعه، W را یک دوره وارانتهی سیستم و $P_i(w)$ احتمال خرابی برای یک جزء i در طول W و $\alpha_i(w)$ احتمال این تعریف کرده‌اند که خرابی جزء i باعث خرابی سیستم شود. مدل مذکور برای سیستمی با ساختار سری و موازی برای تنظیم هزینه گارانتی با توجه به تعداد خرابی ناشی از اثر متقابل نوع ۱ پیشنهاد شده است. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد اثر متقابل خرابی، قابلیت اطمینان سیستم را کاهش می‌دهد (لیو و همکاران، ۲۰۱۵). در مطالعه‌ای، محاسبه قابلیت اطمینان سیستم از طریق رابطه (۱۳) پیشنهاد می‌شود:

$$R(t) = 1 - \prod_{j=1}^{np} (1 - \prod_{i \in p_i} E(s_i(t))) = 1 - \prod_{j=1}^{np} (1 - \prod_{i \in p_i} R_i(t)) \quad (13)$$

در رابطه فوق $R_i(t)$ برابر قابلیت اطمینان جزء i ام در زمان t است و از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$R_i(t) = 1 - P(X_{i,t} \geq Z_i) = P(X_{i,t} < Z_i) = \int_0^{Z_i} f_i(u) du \quad (14)$$

در این مطالعه، روش اجرایی تصمیم‌گیری و تعیین گروهی از اجزا برای اقدامات نگهداری و تعمیرات براساس قابلیت اطمینان پیش‌بینی‌شده اجزا، وابستگی اقتصادی و همچنین محل اجزای موجود در سیستم ارائه می‌شود. ارزیابی مدل پیشنهادی نشان می‌دهد سیاست پیشنهادی، عملکرد مناسبی در تعیین اقدامات پیشگیرانه و کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات سیستم‌های با ساختار پیچیده دارد. چنانچه در شکل ۲ مشخص است، هر زمان که قابلیت اطمینان پیش‌بینی‌شده سیستم به زیر آستانه قابلیت اطمینان کاهش می‌یابد، از طریق شناسایی و جایگزینی گروهی اجزای سیستم، قابلیت اطمینان سیستم افزایش پیدا می‌کند (نگوین و همکاران، ۲۰۱۵).



شکل ۲- قابلیت اطمینان پیش‌بینی‌شده سیستم قبل و بعد از بهبود (نگوین و همکاران، ۲۰۱۵)

Fig 2- Predicted system reliability before and after improvement (Nguyen et al., 2015)

در مطالعه‌ای، یک مدل نگهداری و تعمیرات فرصت‌طلبانه^{۴۰} با هدف به حداقل رساندن هزینه‌ها، برای سیستم‌های چند جزئی با در نظر گرفتن وابستگی اقتصادی بین اجزا پیشنهاد شده است. در این رویکرد، اقدامات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه با هدف کاهش نرخ خرابی اجزا در قیاس با حد آستانه انجام می‌شود، به گونه‌ای که

اگر قابلیت اطمینان هر جزء کمتر از میزان آستانه باشد، باید جزء مذکور تعویض شود. قابلیت اطمینان هر جزء از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_i(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda_i(t) dt \right] \quad (15)$$

در رابطه فوق $\lambda_i(t)$ بیانگر تابع نرخ خرابی برای جزء i ام است. نتایج حاصل نشان می‌دهد به‌کارگیری مدل پیشنهادی در این مطالعه، با افزایش دسترس‌پذیری سیستم و همچنین کاهش درخور توجه هزینه‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه سیستم نسبت به زمانی همراه است که نگهداری و تعمیرات به تفکیک اجزا انجام شود (وانگ و همکاران، ۲۰۲۱).

۳-۲- وابستگی تصادفی

در مطالعه‌ای، مدلی برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان سیستم‌های چند جزئی مبتنی بر مسیرهای چندگانه افت^{۴۱} (رابطه ۱۶) ارائه شده است:

$$R(t) = Pr \{ X_1(t) \leq D_1, X_2(t) \leq D_2, \dots, X_n(t) \leq D_n \} \quad (16)$$

$$\int_0^{D_n} \dots \int_0^{D_2} \int_0^{D_1} f(x_{1t}, x_{2t}, \dots, x_{nt}) dx_{1t} dx_{2t} \dots dx_{nt}$$

در رابطه فوق $f(x_{1t}, x_{2t}, \dots, x_{nt})$ تابع چگالی مشترک $x_{1t}, x_{2t}, \dots, x_{nt}$ است. در این مدل، وابستگی بین اجزا از طریق ماتریس واریانس-کوواریانس^{۴۲} و مقادیر افت اجزا بررسی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی مدل پیشنهادی نشان می‌دهد فرض استقلال بین اجزا درباره سیستم چند جزئی، یک فرض نادرست است و ممکن است که ارزیابی قابلیت سیستم را به اشتباه بیندازد (وانگ و کویت^{۴۳}، ۲۰۰۴).

در مطالعه‌ای فرض شده است که یکی از اجزا، جزء غالب و تعمیرنشده‌ای باشد، در حالی که اجزای دیگر ثانویه‌اند و تعمیر می‌شوند، اما متقابلاً مستقل‌اند و از فرآیندهای پواسون غیر همگن پیروی می‌کنند. اجزای ثانویه به‌طور متقابل مستقل‌اند و از قوانین نمایی پارامترها پیروی می‌کنند.

$$h_n(t) < h_{n-1}(t) < \dots < h_2(t) < h_1(t) \quad (17)$$

در واقع خرابی‌های اجزای ثانویه، نرخ خرابی جزء غالب را افزایش می‌دهد که با $h_N(t)$ نشان داده شده است:

$$h_N(t) = h(t; k_1, k_1, \dots, k_i, \dots, k_n)$$

$$P(S_{ik} \leq t) = \sum_{j=k}^{\infty} \frac{[R_i(t)]^j e^{-R_i(t)}}{j!} = \sum_{j=k}^{\infty} P_{ij}(t) \quad (18)$$

$$h_N(t) = \sum_{k_1} \sum_{k_2} \dots \sum_{k_N} h_{Nk_i}(t) P_{Nk_n}(t) \dots P_{1k_1}(t)$$

در این مدل از فرآیندهای مارکوف برای برآورد احتمال خرابی استفاده کرده‌اند. چنانچه مشخص است، مدل‌سازی بر مبنای فرض در نظر گرفتن یک جزء غالب و نادیده گرفتن ماهیت متغیر آثار متقابل بین کلیه اجزای سیستم، در انطباق با سیستم‌های موجود در دنیای واقعی، مشخصاً برای سیستم‌هایی با یک ساختار پیچیده‌تر، محدودکننده است (لای^{۴۴}، ۲۰۰۷).

در مطالعه‌ای، محاسبه احتمال خرابی سیستم از طریق رابطه (۱۹) پیشنهاد شده است:

$$P(t) = \exp[\alpha(D(t) - D_t)] \quad (19)$$

$$h_s(t) = \lambda \cdot P(t)$$

در رابطه فوق، α پارامتر وابستگی است، زمان خرابی طبیعی^{۴۵} با T_d و زمان خرابی ناشی از شوک^{۴۶} با T_s نشان داده می‌شود. زمان‌های خرابی سیستم نیز با $T = \min(T_s \text{ و } T_d)$ تعریف شده است. تابع بقای^{۴۷} سیستم عبارت است از:

$$R_T(t) = P(T > t) = P(T_d > t) \times P(T_s > t | T_d > t) \\ = F_\theta\left(\frac{D_f}{t}\right) \times \int_{-\infty}^{\frac{D_f}{t}} \exp\left[-\int_0^t \lambda \exp[\alpha(\beta u - D_f)] du\right] = f_\theta(\beta) d\beta \quad (20)$$

مبتنی بر مدل مذکور، یک استراتژی بازرسی برای به حداقل رساندن هزینه طولانی مدت نگهداری و تعمیرات پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی، اثر تجمعی شوک‌ها و تغییرات دامنه آنها در نظر گرفته نشده است، به دلیل اینکه شوک‌ها باعث خرابی‌های ناشی از شوک می‌شوند یا هیچ تأثیری ندارند (چن و همکاران، ۲۰۱۱). در مطالعه‌ای، یک استراتژی نگهداری و تعمیرات برای سیستم‌های چند جزئی با وابستگی تصادفی و اقتصادی ارائه شده است. در این رویکرد فرض می‌شود که سیستم برای اجرای هر مأموریت کاری، به قابلیت اطمینان حداقلی نیاز دارد و بین هر دو مأموریت کاری باید اقدامات نگهداری و تعمیرات به‌گونه‌ای انجام شود که حداقل قابلیت اطمینان سیستم برای مأموریت کاری بعدی، با حداقل هزینه تأمین شود. در این مطالعه، قابلیت اطمینان سیستم از روش آنالیز درخت خرابی^{۴۸} محاسبه می‌شود (مرئوفی و همکاران، ۲۰۱۲).

در مطالعه‌ای فرض شده است که شوک‌های خارجی با پیروی از فرآیند پواسون غیر همگن، با شدت $I(t)$ رخ می‌دهد و باعث خرابی‌های جزئی با احتمال P و خرابی اصلی با احتمال $1-P$ به‌طور انحصاری بر جزء ۲ می‌شود. خرابی جزء ۲ شوک‌های داخلی نیز عمل می‌کند و نرخ خرابی جزء ۱ را افزایش می‌دهد. به‌عبارتی، نرخ خرابی سیستم به نرخ خرابی جزء ۱ غالب بستگی دارد و تعداد شوک‌های خارجی با جزء دیگر متحمل شده است؛ بنابراین محاسبه نرخ خرابی جزء غالب از طریق معادله (۲۱)، پیشنهاد شده است:

$$h_1(t) = \sum_{j=0}^{\infty} h_1(t | N_2(t) = j) \times P(N_2(t) = j) \quad (21)$$

تابع بقای سیستم نیز عبارت است از:

$$\bar{F}(t) = \exp\left\{-\int_0^t [h_1(x) + (1-p)r(x)] dx\right\} \quad (22)$$

روش پیشنهادی اجازه می‌دهد تا در یک مدل تحلیلی، اثر محیط بر سیستم بررسی شود. اما مشخص است که فرضیه خرابی سیستم‌ها از طریق جزء غالب محدود شده است؛ بنابراین روش پیشنهادی قابلیت تعمیم به سیستم‌های چند جزئی را ندارد که عملکردشان به عملکرد کلیه اجزا بستگی دارد (سانگ و همکاران، ۲۰۱۳). در مطالعه‌ای با توجه به دشواری محاسبه قابلیت اطمینان سیستم‌های توزیع آب، روشی جایگزین برای ارزیابی عملکردی سیستم‌های توزیع آب در شرایط عملیاتی و غیرعملیاتی بررسی شده است. در رویکرد پیشنهادی، آنتروپی جریان^{۴۹} جایگزین شاخص قابلیت اطمینان معرفی می‌شود. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد آنتروپی جریان، همبستگی بیشتری با

حالت‌های قابلیت اطمینان بالاتر دارد تا حالت‌های پایین‌تر، در نتیجه استنباط می‌شود که آنتروپی جریان، جایگزین مناسب شاخص قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع آب است (قیسی و ناصر^{۵۱}، ۲۰۱۴). در مقاله‌ای، از طریق ارائه یک مدل پایه، قابلیت اطمینان سیستم‌های چند جزئی مبتنی بر داده‌های افت، اثر عوامل محیطی (مانند افزایش دما و افزایش جریان) و همچنین وابستگی میزان افت هر جزء به افت دیگر اجزای سیستم ارزیابی شده است؛ از جمله ضعف‌های مدل پیشنهادی، نادیده گرفتن اثر شوک‌های خارجی بر عملکرد و قابلیت اطمینان سیستم است (لیو و همکاران، ۲۰۱۵).

در مطالعه‌ای، یک سیستم چند جزئی با فرض این مسئله در نظر گرفته شده است که هر جزء تحت تأثیر شوک، دو حالت خرابی دارد که با یکدیگر وابستگی تصادفی دارند. حد مقاومت شوک‌ها به جزء i برابر D_i است. یک جزء با پیروی از یک فرآیند $X_i(t)$ با آستانه خرابی H_i افت می‌کند. Y_{ij} ، W_{ij} ، $S_i(t)$ به ترتیب به‌عنوان دامنه j -th شوک روی جزء i ، نسبت ضربه شوک j -th روی جزء i و Y_{ij} شوک‌های تجمعی تعریف شده‌اند. تابع بقای سیستم به $F_{W_i}(w)$ ، $F_{X_i}(X_i \cdot t)$ بستگی دارد که به ترتیب توابع چگالی تجمعی W_{ij} و $X_{S_i}(t) = X_i(t) + S_i(t)$ هستند. تابع توزیع تجمعی از طریق رابطه (۲۳) عبارت است از:

$$F_{X_i}(X_i \cdot t) = P(X_{S_i}(t) < X_i) \\ = \sum_{m=0}^{\infty} \left(\int_0^{X_i} G_i(X_i - U_i t) f_{y_i}^m(u) du \right) P(N(t) = m) \quad (23)$$

در رابطه فوق $G_i(t)$ ، تابع چگالی تجمعی $X_i(t)$ و $f_{y_i}^m(u)$ تابع توزیع مجموع مستقل k متغیر توزیع شده Y_{ij} است. محاسبه قابلیت اطمینان سیستم (سری، موازی، سری-موازی) با استفاده از معادله (۲۴) پیشنهاد شده است:

$$R(t) = \sum_{m=0}^{\infty} \prod_{i=1}^n \left[P(w_i < D_i)^m P(X_i(t) + \sum_{j=1}^{N(t)} (Y_{ij} < H_i | N(t) = m) \right] \\ \times P(N(t) = m) \quad (24)$$

با محاسبه قابلیت اطمینان سیستم، یک استراتژی نگاه‌داری و تعمیرات، با هدف به حداقل رساندن هزینه و تعیین دوره بازرسی بهینه ارائه شده است. با این حال باید توجه داشت که مدل پیشنهادی، تعدادی از شوک‌های رایج برای همه اجزا را لحاظ کرده و همچنین آستانه خرابی را به صورت ثابت در نظر گرفته است، در حالی که در واقعیت، آستانه خرابی اجزا متغیر است (سانگ و همکاران، ۲۰۱۴).

در مطالعه‌ای، تابع اثر متقابل خرابی به صورت معادله (۲۵) پیشنهاد شده است:

$$P(X) = \prod_{i=1}^m C_i(x, \sigma_i) \prod_{j=1}^n P_j(x) \quad (25)$$

در رابطه فوق $C_i(x)$ نشان‌دهنده نرخ خرابی کلی مبتنی بر یک کاپیولا، با در نظر گرفتن اثر متقابل خرابی بین اجزاست و $P_j(x)$ نشان‌دهنده نرخ خرابی وابسته به جزء j و σ_i نشان‌دهنده ضریب اثر متقابل جزء i است. مدل قابلیت اطمینان مبتنی بر کاپیولا C با در نظر داشتن وابستگی متقابل و ادغام قابلیت اطمینان فرآیندهای خرابی R_1 و R_2 ، طبق رابطه (۲۶) پیشنهاد شده است:

$$R(t) = R_1(t) + R_2(t) - 1 + C(1 - R_1(t) \cdot 1 - R_2(t) \cdot \theta) \text{ or } R(t) \\ = C(R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \theta) \quad (26)$$

در رابطه فوق θ یک بردار از پارامترهای کاپیولاست که دامنه وابستگی را کنترل می‌کند. از روش حداکثر درست‌نمایی و با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده، برآورد شده است (خو و همکاران^{۵۴}، ۲۰۱۷). در مطالعه‌ای، مدلی برای محاسبه قابلیت اطمینان سیستم چند جزئی با اجزای وابسته، که تحت اثر مداوم فرآیندهای افت یا شوک‌های طبقه‌بندی شده^{۵۳} قرار دارند، مطابق با معادله (۲۷) ارائه شده است:

$$R_{c_{0j}.i}^{S*}(\theta, v) = \sum_{m=1}^k R_{c_{0j}.m}^{S*}(\theta, v) h_{c_{0j}.i}^{S*}(\theta, m, v) + r_{c_{0j}.i}^{S*}(\theta, v) \quad (27)$$

در مدل پیشنهادی فرض شده است که شوک‌های طبقه‌بندی شده با ایجاد پرش‌های ناگهانی^{۵۴} در میزان افت اجزاء، باعث تسریع در خرابی اجزای سیستم می‌شوند. نتایج بیانگر آن است که وابستگی بین اجزاء، به شدت بر میزان افت سیستم اثرگذار است و باید در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم به آن توجه کرد (شان و همکاران^{۵۵}، ۲۰۱۸). در مطالعه‌ای، مدلی عمومی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های چند جزئی با در نظر گرفتن دو حالت خرابی (جزئی^{۵۶} - شدید^{۵۷}) ارائه شده است. در حالت اول، خرابی جزئی به دلیل آسیب‌های داخلی ناشی از شوک‌های نامشخص خارجی و در حالت دوم، خرابی شدید به دلیل شوک‌های تصادفی شدید خارج از سیستم رخ می‌دهد. در این رویکرد، اثر عدم قطعیت‌های مؤثر بر سیستم‌های چند حالتی برای محاسبه اثر شوک‌های تصادفی نامشخص، در نظر گرفته شده است. به منظور اعتبارسنجی، مدل پیشنهادی مسئله با شبیه‌سازی مونت کارلو حل شده و نتایج نشان‌دهنده انطباق مدل پیشنهادی با شبیه‌سازی مونت کارلو بوده است (لی و همکاران، ۲۰۱۹). در مطالعه‌ای با هدف ارائه مدلی تصادفی مبتنی بر ارزیابی قابلیت اطمینان برای به حداقل رساندن هزینه‌های بلندمدت، اقدامات نگهداری و تعمیرات سیستم‌های چند جزئی پیچیده انجام شده است. در این رویکرد، دو استراتژی نگهداری و تعمیرات متفاوت، شامل استراتژی ارزیابی دوره‌ای و استراتژی مبتنی بر طول عمر یک سیستم ۴۲۶ جزئی، حمل و نقل هوایی مسافری بین‌المللی با وابستگی تصادفی و اقتصادی مقایسه می‌شود. نتایج حاصل نشان می‌دهد به کارگیری استراتژی مطابق با طول عمر سیستم، در کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات سیستم اثربخش‌تر است (مارتینود و همکاران^{۵۸}، ۲۰۱۸). در مطالعه‌ای، با در نظر گرفتن وابستگی بین اجزای سیستم و از طریق محاسبه احتمال انتقال حالت هر جزء، قابلیت اطمینان سیستم ارزیابی می‌شود. نتایج ارزیابی عددی نشان می‌دهد از طریق برنامه‌ریزی، اقدامات نگهداری و تعمیرات مبتنی بر وضعیت قابلیت اطمینان سیستم و هر جزء، هزینه‌ها در دوره گارانتی کاهش می‌یابد (جین و همکاران، ۲۰۱۸).

در مطالعه‌ای، قابلیت اطمینان سیستم از طریق رابطه (۲۸) محاسبه می‌شود:

$$R(t) = R_M^{(1)}(t) \times R_M^{(2)}(t) \dots \times R_M^{(m)}(t) \times P[N_2(t) = 0] \quad (28)$$

در رابطه G فوق $R_M^{(m)}(t)$ نشان‌دهنده قابلیت اطمینان حاشیه‌ای فرآیند افت M در زمان t است. در این رویکرد

برای لحاظ کردن وابستگی ساختاری بین اجزای سیستم روش کاپیولا از طریق رابطه (۲۹)، به کار گرفته می‌شود:

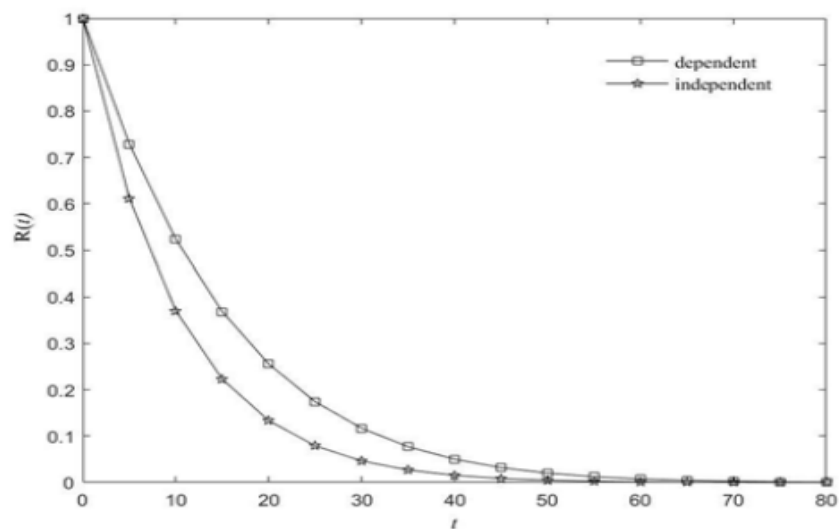
$$H(x_1, x_2, \dots, x_m) = C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_m(x_m)) \quad (29)$$

در رابطه فوق، $F_i(x_i)$ بیانگر تابع توزیع تجمعی حاشیه‌ای است. مطابق با رابطه فوق، تابع توزیع کاپیولا برای زمان خرابی فرآیندهای افت در یک سیستم سری به صورتی است که $F_i(t) = 1 - R_i(t)$. ($i = 1, 2, \dots, m$) از رابطه (۳۰) محاسبه می‌شود:

$$P(T_1 \leq t_1, T_2 \leq t_2, \dots, T_m \leq t_m) = H(t_1, t_2, \dots, t_m) \quad (30)$$

$$= C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_m(x_m))$$

ارزیابی مدل پیشنهادی با استفاده از داده‌های یک سیستم میکرو الکترونیکال مکانیکی، تحت تأثیر دو فرآیند افت و یک شوک عملیاتی در محیط ناپایدار انجام شده است. چنانچه در نمودار شکل ۳T مشخص است که قابلیت اطمینان سیستم در وضعیت در نظر گرفتن وابستگی بین اجزا، بهتر از حالت مستقل است.



شکل ۳- قابلیت اطمینان سیستم (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸)

Fig 3- System reliability (Zhang et al, 2018)

در مطالعه‌ای، رویکردی دو مرحله‌ای برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم سری و موازی مبتنی بر روش کاپیولا برای لحاظ کردن وابستگی بین اجزا، مطابق با معادله‌های (۳۱ و ۳۲) ارائه شده است.

$$R_s(t) = P(Y_{1(t)} < \omega_1, Y_{2(t)} < \omega_2, \dots, Y_{M(t)} < \omega_M) \quad (31)$$

$$= C(R_1(t), R_2(t), \dots, R_M(t), \theta^{cop})$$

$$R_s(t) = 1 - P(Y_{1(t)} > \omega_1, Y_{2(t)} > \omega_2, \dots, Y_{M(t)} > \omega_M) \quad (32)$$

$$= 1 - C(R_1(t), \dots, R_M(t), \theta^{cop})$$

در رابطه فوق، θ^{cop} بیانگر مجموعه پارامترهای تابع کاپیولا است. قابلیت اطمینان سیستم مبتنی بر فرآیندهای تصادفی وینر، گاما و گوسین معکوس، به ترتیب مطابق با رابطه‌های (۳۳، ۳۴ و ۳۵) محاسبه شده است:

$$R(t) = P(T_w > t) = P(Y(t) < w) \quad (33)$$

$$= 1 - \Phi \left[\frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{\Delta(t, \gamma)}{h(s)}} (\alpha h(s) \Delta(t, \gamma) - 1) \right] - \exp\left(\frac{2\alpha w}{\beta^2}\right) \Phi \left[\frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{\Delta(t, \gamma)}{h(s)}} (\alpha h(s) \Delta(t, \gamma) + 1) \right]$$

$$R(t) = P(T_w > t) = P(Y(t) < w) = \left[\frac{1}{(\alpha h(s) \Delta(t, \gamma)) \gamma (\alpha h(s) \Delta(t, \gamma)) \cdot \beta w} \right] \quad (34)$$

$$R(t) = P(T_w > t) = P(Y(t) < w) = \Phi \left[\sqrt{\frac{\beta h(s)^2 \Delta(t, \gamma)^2}{w}} \left(\frac{w}{\alpha h(s) \Delta(t, \gamma)} - 1 \right) \right] + \exp\left(\frac{2\beta h(s) \Delta(t, \gamma)}{\alpha}\right) \Phi \left[- \sqrt{\frac{\beta h(s)^2 \Delta(t, \gamma)^2}{w}} \left(\frac{w}{\alpha h(s) \Delta(t, \gamma)} + 1 \right) \right] \quad (35)$$

ارزیابی مدل‌های پیشنهادی با استفاده از داده‌های مربوط به دو مورد مطالعاتی، تأییدکننده عملکرد مناسب مدل‌های پیشنهادی ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم، ضمن در نظر گرفتن وابستگی بین اجزاست (فانگ و همکاران، ۲۰۲۰).

در مطالعه‌ای، مبتنی بر سه سیاست نگه‌داری و تعمیرات تعیین شده دربارهٔ بازرسی، اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی، قابلیت اطمینان سیستم و دیگر شاخص‌ها از قبیل دسترس‌پذیری و میانگین زمان تا خرابی، محاسبه شده است. نتایج ارزیابی مدل پیشنهادی نشان می‌دهد وضعیت پیش‌بینی قابلیت اطمینان سیستم در صورت در نظر گرفتن وابستگی بین فرآیندهای خرابی و همچنین امکان تعیین دوره‌های زمانی بهینه، برای بازرسی و اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی در صورت استفاده از رویکرد پیشنهادی بهبود داشته است (دانگ و همکاران، ۲۰۲۰).

در مطالعه‌ای مدل ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های چند جزئی در شرایطی که هر جزء تحت تأثیر دو نوع فرآیند خرابی قرار دارد، پیشنهاد شده است. نوع اول فرآیند خرابی نرم^{۵۹} است که به صورت مشترک تحت تأثیر عملکرد اجزای داخلی سیستم ایجاد می‌شود و نوع دوم فرآیند خرابی سخت^{۶۰} است که معمولاً ناشی از شوک‌های تصادفی خارجی ایجاد می‌شود. مطابق با مدل پیشنهادی، قابلیت اطمینان سیستم از طریق رابطه ۳۶ محاسبه می‌شود:

$$R(t) = \sum_{n_1=0}^{\infty} \dots \sum_{n_m=0}^{\infty} R(t|N_1(t) = n_1, \dots, N_M(t) = n_m) \times P\{N_1(t) = n_1, \dots, N_M(t) = n_m\} \quad (36)$$

$$= \sum_{n_1=0}^{\infty} \dots \sum_{n_m=0}^{\infty} R(t|N_1(t) = n_1, \dots, N_M(t) = n_m) \prod_{m=1}^M P\{N_m(t) = n_m\}$$

در رابطه G فوق n_M بیانگر تعداد شوک‌های خارجی است. مدل تعدیل‌شده محاسبه قابلیت اطمینان برای سیستم‌های سری - موازی عبارت است از رابطه ۳۷:

$$R_s(t) = \sum_{n_1=0}^{\infty} \dots \sum_{\substack{n_m=0 \\ = n_m}}^{\infty} R(t|N_1(t) = n_1, \dots, N_M(t) = n_M) \prod_{m=1}^M P\{N_m(t)\} \quad (37)$$

$$= \sum_{n_1=0}^{\infty} \dots \sum_{n_m=0}^{\infty} \prod_{p=1}^n \left\{ 1 - \prod_{q=1}^{k_q} [1 - p_1 p_2] \right\} \prod_{m=1}^M P\{N_m(t) = n_m\}$$

در رابطه فوق

$$p_1 = P\{W_{pq}(t) \leq D_{pq}\}, p_2 = F_{Y_{pq1}}^{(m_1)} \times \dots \times F_{Y_{pq1Qpq1}}^{(m_1|Qpq1)} \times F_{pq}(t)(H_{pq}(t))$$

است. مدل تعدیل‌شده محاسبه قابلیت اطمینان برای سیستم‌های موازی سری عبارت است از رابطه ۳۸:

$$R_s(t) = \sum_{n_1=0}^{\infty} \dots \sum_{n_m=0}^{\infty} \left\{ 1 - \prod_{p=1}^n \left\{ 1 - \prod_{q=1}^{k_q} [1 - p_1 p_2] \right\} \right. \quad (38)$$

$$\left. \times \prod_{m=1}^M P\{N_m(t) = n_m\} \right\}$$

ارزیابی مدل‌های پیشنهادی با استفاده از داده‌های یک سیستم میکرو الکترومکانیکال^{۶۱} نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل‌های پیشنهادی در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم مبتنی بر یک سیاست نگهداری و تعمیرات جایگزینی بلوک براساس تعیین فواصل زمانی جایگزینی بهینه است (دانگ و همکاران، ۲۰۲۱).

در مطالعه‌ای، مدلی برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان سیستم‌های چند جزئی K از N، با در نظر گرفتن وابستگی تصادفی، مبتنی بر فرآیند تصادفی وینر به صورت رابطه (۳۹)، توسعه داده شده است.

$$X_j(t) = \mu_j \times t + \sigma_j \beta(t) \quad (39)$$

در رابطه فوق، $X_j(t)$ بیانگر میزان افت ذاتی جزء j م در زمان t ام است، μ_j بیانگر نرخ افت جزء j ، σ_j نشان‌دهنده پارامتر نوسان جزء j است. مبتنی بر رابطه (۳۹)، مدلی برای محاسبه میزان افت جزء j ام در زمان t با در نظر گرفتن آثار متقابل نرخ افت اجزا بر نرخ افت جزء j ام، مطابق رابطه (۴۰) پیشنهاد شده است:

$$\bar{X}_j(t + \Delta t) = \bar{X}_j(t) + \Delta X_j(\Delta t) + \sum_{h=1}^{n-1} \delta_{hj} \Delta X_h(\Delta t) \quad (40)$$

در رابطه فوق، $\Delta X_j(\Delta t)$ بیانگر سطح تغییرات افت جزء j ام در بازه Δt است. باقی‌مانده عمر مفید جزء j ام در زمان جاری u ، به عنوان یک متغیر تصادفی شرطی، از طریق معادله (۴۱)، محاسبه شده است:

$$r_j(u|\bar{x}_j) = \{(T_{Fj} - u | T_{Fj} > u, \bar{X}_j(u) = \bar{x}_j)\} \quad (41)$$

در رابطه فوق، T_{Fj} بیانگر اولین زمان خرابی است. با استفاده از مفهوم تابع بقای باقی‌مانده عمر مفید، جزء j ام در زمان v ، قابلیت اطمینان جزء j ام در زمان t به صورت رابطه (۴۲) مدل شده است:

$$\begin{aligned} Pr(r_j(u|\bar{x}_j) > v) &= Pr\{(T_{Fj} - u > v | T_{Fj} > u, \bar{X}_j(u) = \bar{x}_j)\} \\ &= Pr\{(T_{Fj} > u + v | T_{Fj} > u, \bar{X}_j(u) = \bar{x}_j)\} = R_j(t|\bar{x}_j) \end{aligned} \quad (42)$$

در رابطه فوق $t = u + v$ و $R_j(t|\bar{x}_j)$ قابلیت اطمینان پیش‌بینی شده جزء j ام در زمان آینده t است، به شرطی که $\bar{X}_j(u) = \bar{x}_j$ است. در گام بعدی با پیش‌بینی قابلیت اطمینان در سطح اجزا، روش محاسبه و پیش‌بینی قابلیت اطمینان در سطح سیستم به صورت ذیل ارائه شده است:

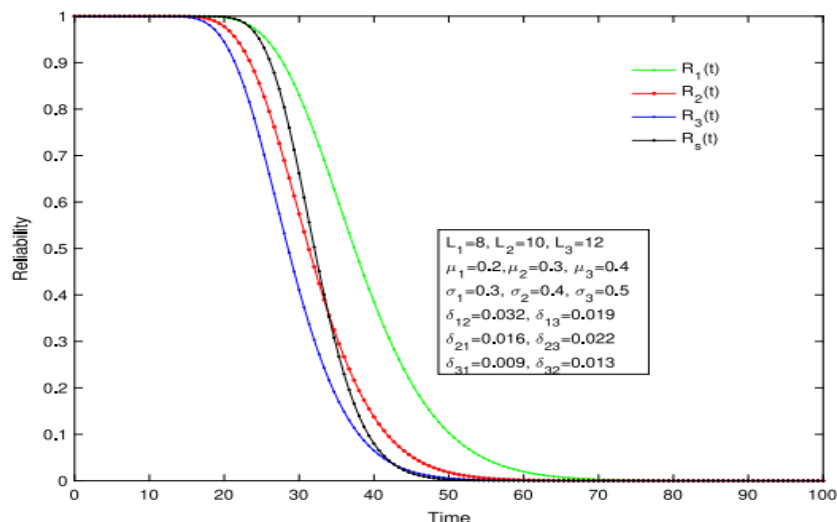
$S(t) = (s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t))$ به عنوان بردار صفر و یک، که نشان‌دهنده حالت اجزای سیستم است، در نظر گرفته شده است، به طوری که هر $s_j(t)$ نشان‌دهنده حالت جزء j ام در زمان t است. به صورت مشابه برای نشان دادن حالت کلی سیستم، یک تابع باینری به صورت $\square(S(t)) = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ تعریف شده است. بردار تصادفی $\bar{X}_{1:n}(t) = (\bar{X}_1(t), \bar{X}_2(t), \dots, \bar{X}_n(t))$ برای نشان دادن حالت افت کل سیستم و $T_s > t$ به عنوان زمان خرابی تصادفی کل سیستم در نظر گرفته است. روش محاسبه باقی مانده عمر مفید کل سیستم به صورت رابطه (۴۳) پیشنهاد شده است:

$$r_s(u|\bar{X}_{1:n}(u) = \bar{x}_{1:n}) = \inf\{(T_s - u | T_s > u, \bar{X}_{1:n}(u) = \bar{x}_{1:n})\} \quad (43)$$

مطابق با رابطه (۴۳) و با استفاده از مفهوم تابع بقای باقی مانده عمر مفید در زمان t ، قابلیت اطمینان کل سیستم در زمان t به صورت معادله (۴۴)، ارائه شده است:

$$\begin{aligned} Pr(r_s(u|\bar{X}_{1:n}(u) = \bar{x}_{1:n}) > v) &= Pr\{(T_s - u > v | \bar{X}_{1:n}(u) = \bar{x}_{1:n})\} \\ &= Pr\{(T_s > u + v | \bar{X}_{1:n}(u) = \bar{x}_{1:n})\} = Pr\{(T_s > t | \bar{X}_{1:n}(u) = \bar{x}_{1:n})\} \\ &= \sum_{q=0}^{n-k} Pr\{(N(t) = q | \bar{X}_{1:n}(u) = \bar{x}_{1:n})\} \\ &= \sum_{q=0}^{n-k} \sum_{\substack{C_n^q \\ C_n^q}} \prod_{y=1}^q F_{j_y}(t|\bar{x}_{j_y}) \prod_{y=q+1}^n R_{j_y}(t|\bar{x}_{j_y}) \\ &= R_s(t|\bar{x}_{1:n}) \end{aligned} \quad (44)$$

در رابطه فوق $R_s(t|\bar{x}_{1:n})$ تابع قابلیت اطمینان پیش‌بینی شده کل سیستم در زمان t است. نتایج شبیه‌سازی سطح افت اجزای سیستم نشان می‌دهد با توجه به سطح افت اجزا در مسیرهای مختلف در ۱۰۰ زمان گوناگون، در قیاس با آستانه خرابی هر جزء، اولین زمان‌های خرابی برای هر جزء بررسی شدنی است. در شکل ۴، نمودار قابلیت اطمینان سیستم و اجزای سیستم آورده شده است. همچنین سطح قابلیت اطمینان اجزا و کل سیستم در زمان‌های مختلف برای استفاده در تعیین استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات مشروط محاسبه شده است. برای بررسی تأثیر پارامترهای بحرانی بر قابلیت اطمینان سیستم، آنالیز حساسیت بر پارامترهای مختلف انجام شده است که نتایج نشان‌دهنده تأثیر پارامترهای آستانه خرابی اجزا، نرخ افت اجزا و پارامتر نوسان اجزا بوده است.



شکل ۴- قابلیت اطمینان سیستم و اجزا (وانگ و همکاران، ۲۰۲۲)

Fig 4- system and components Reliability (Wong et al, 2022)

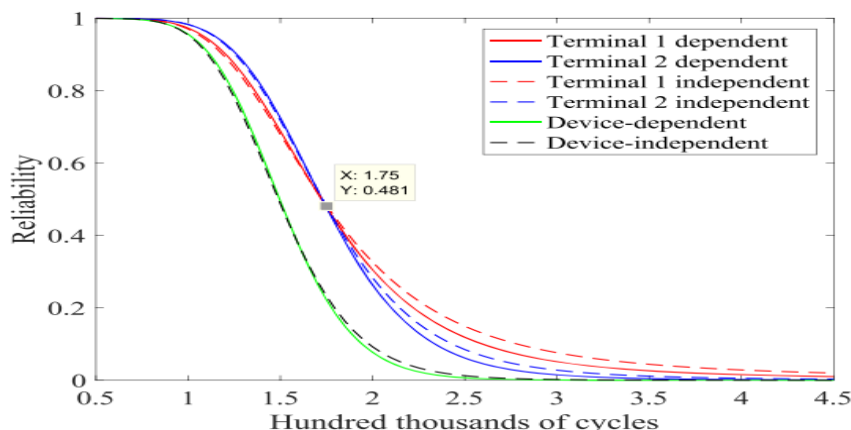
در مطالعه‌ای، رویکردی ترکیبی بر مبنای فرآیندهای تصادفی وینر، گاما و گوسین معکوس با در نظر گرفتن اثر متقابل بین اجزای سیستم، از طریق آنالیز فاکتور^{۶۲} ارائه شده است. در این رویکرد از طریق مدل‌سازی مفهوم باقی‌مانده عمر مفید، تابع قابلیت اطمینان سیستم برای سیستم‌های موازی، سری، موازی-سری و سری-موازی مدل شده است. نتایج حاصل از ارزیابی مدل‌های پیشنهادی با استفاده از داده‌های مربوط به باتری، نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل‌های پیشنهادی بوده است (کانگ و همکاران، ۲۰۲۲). در مطالعه‌ای، چهارچوبی برای مدل‌سازی فرآیندهای افت دو متغیره براساس ترکیبی از فرآیندهای تصادفی وینر و گوسین معکوس، برای سیستم‌هایی با دو ویژگی عملکردی و لحاظ کردن وابستگی از طریق تابع کاپیولای تک‌پارامتری ارائه شده است. در این چهارچوب، ناهمگونی بین اجزا و آثار تصادفی مختلف از طریق فرآیندهای تصادفی حاشیه‌ای^۲ در نظر گرفته می‌شود. تابع قابلیت اطمینان مدل پیشنهادی برای سیستم‌های سری از طریق رابطه ۴۵ و سیستم‌های موازی از طریق رابطه ۴۶ محاسبه می‌شود:

$$R(t|x.D) = \int_{\theta^F \theta^H \delta} R(t|\theta^F, \theta^H, \delta, D) p(\theta^F, \theta^H, \delta|x) d\theta^F d\theta^H d\delta \quad (45)$$

$$R(t|x.D) = 1 - \int_{\theta^F \theta^H \delta} F_T(t|\theta^F, \theta^H, \delta, D) p(\theta^F, \theta^H, \delta|x) d\theta^F d\theta^H d\delta \quad (46)$$

در رابطه فوق $F_T(t|\theta^F, \theta^H, \delta, D)$ بیانگر تابع توزیع تجمعی طول عمر فرآیندهای افت حاشیه‌ای و D بیانگر میزان آستانه خرابی است. در این مطالعه برای تخمین پارامترهای مدل پیشنهادی، از دو روش بیزین جامع^۳ و روش بیزین دو مرحله‌ای به صورت مقایسه‌ای، از طریق داده‌های مربوط به افت و رشد ترک در دو ترمینال یک سیستم الکترونیکی استفاده می‌شود. نتایج حاصل از ارزیابی مدل پیشنهادی مطابق با شکل ۵ نشان می‌دهد قابلیت اطمینان دستگاه با و بدون در نظر گرفتن وابستگی، تقریباً از ابتدا تا انتها با هم همپوشانی دارند؛ بنابراین، فرض وابستگی نداشتن در این باره ممکن است

پذیرفتنی باشد. اما مقایسه قابلیت اطمینان ترمینال‌های ۱ و ۲ در دو حالت وابسته و مستقل نشان می‌دهد وابستگی در قابلیت سیستم اثرگذار است (چن و سان، ۲۰۲۲).



شکل ۵- قابلیت اطمینان سیستم الکترونیکی و ترمینال ۱ و ۲ در حالت وابسته و مستقل (چن و سان، ۲۰۲۲).

Fig 5- Reliability of electronic system and terminal 1 and 2 in dependent and independent mode

در یک مطالعه مقایسه‌ای برای تخمین قابلیت اطمینان سیستم‌های چند جزئی، با در نظر گرفتن مقاومت-استرس^{۶۳} اجزا از الگوریتم‌های زنجیره مارکوف مونت کارلو، نیوتن-رافسون و روش بی‌زین استفاده شده است. نتایج ارزیابی و مقایسه روش‌های مختلف تخمین قابلیت اطمینان سیستم نشان می‌دهد روش بی‌زین در تخمین قابلیت اطمینان، عملکرد مناسب‌تری دارد (احمد و همکاران^{۶۴}، ۲۰۲۲). نیو و همکاران^{۶۵} (۲۰۲۳)، مدلی را برای تجزیه و تحلیل افت و پیش‌بینی باقی‌مانده عمر مفید سیستم چند جزئی پیشنهاد کرده‌اند. در مدل پیشنهادی ایشان، تابع چگالی احتمال باقی‌مانده عمر مفید در شرایطی تعیین شده است که آثار وابستگی تصادفی بین اجزا به صورت یکپارچه در نظر گرفته شده است. در این مطالعه، حالت افت وابسته و پارامترهای مدل به صورت هم‌زمان از طریق فیلتر کالمن^{۶۶} و الگوریتم حداکثرسازی درست‌نمایی با استفاده از داده‌های موتور توربین هواپیما و سیستم گیربکس برآورد شده‌اند. از جمله قوت‌های مدل پیشنهادی مذکور، یکپارچه‌کردن آثار وابستگی در مدل‌سازی و همچنین قابلیت پیش‌بینی مدل و از جمله ضعف‌های آن، بررسی نکردن تغییرپذیری فرآیندهای افت اجزاست (نیو و همکاران، ۲۰۲۳). کای و همکاران^{۶۷} (۲۰۲۳)، مدلی را برای ارزیابی قابلیت اطمینان یک سیستم مقاومت-تنش چند جزئی^{۶۸} پیشنهاد کرده‌اند. در مدل مذکور، اجزای سیستم در معرض یک تنش تصادفی مشترک قرار گرفته‌اند و وابستگی بین طول عمر اجزا با کاپیولای کلاپتون^{۶۹} با پارامتر جفت ناشناخته بررسی و فرض شده است سیستم تنها در صورتی دارای عملکرد است که متغیرهای مقاومت از میزان تنش تصادفی در سیستم فراتر باشند. در مطالعه مذکور، پارامترهای ناشناخته مدل پیشنهادی از طریق روش حداکثر درست‌نمایی برآورد و به منظور حل مدل پیشنهادی با یک مجموعه داده واقعی از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. از جمله قوت‌های مدل پیشنهادی، لحاظ‌کردن ویژگی‌های مقاومت-تنش در مدل‌سازی، مطابق با شرایط سیستم‌های موجود در دنیای واقعی است (کای و همکاران ۲۰۲۳). بو و همکاران^{۷۰} (۲۰۲۳)، به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم چند حالتی سری-موازی با در نظر گرفتن فرآیند نیمه مارکوف، از معادلات انتگرال برای محاسبه توزیع‌های احتمال حالت استفاده کرده‌اند. با این حال، با توجه به اینکه حل معادلات انتگرال فرموله شده، به پیچیدگی ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم منجر می‌شود،

یک روش مبتنی بر شبکه عصبی عمیق^{۷۱} برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم پیشنهاد شده است. در روش مذکور، برای یک جزء چند حالتی، پارامترهای قابلیت اطمینان، که توزیع‌های دلخواه را نشان می‌دهند، ابتدا ویژگی ورودی به DNN تعیین می‌شوند، در حالی که توزیع‌های احتمالی حالت متناظر، به‌طور طبیعی به‌عنوان خروجی DNN عمل می‌کنند. بر این اساس، DNN برای ایجاد رابطه نگاشت مستقیم بین پارامترهای قابلیت اطمینان و توزیع‌های احتمال حالت مستقر شده است. نتایج نشان‌دهنده آن است که به‌جای تکرار محاسبات پیچیده، مدل DNN آموزش‌دیده به‌طور مؤثر توزیع عملکرد اجزای چند حالتی را با توجه به پارامترهای قابلیت اطمینان متفاوت تعیین کند (بو و همکاران، ۲۰۲۳). ژنگ و ژانگ^{۷۲} (۲۰۲۳)، یک روش امضای بقا^{۷۳} را برای به دست آوردن راه‌حلی تحلیلی به‌منظور ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم، با در نظر گرفتن وابستگی بین اجزا پیشنهاد کرده‌اند. روش پیشنهادی شامل دو مرحله است: در مرحله اول، ساختار وابستگی با استفاده از تابع کاپیولا برای محاسبه ساختار احتمال تحلیلی ایجاد شده است، سپس با استفاده از قضیه اسکالر^{۷۴}، راه‌حل تحلیلی برای ساختار احتمال براساس اصل شمول - طرد تعیین شده است. تابع کاپیولای ارشمیدسی سلسله‌مراتبی برای ایجاد یک ساختار وابسته پیچیده‌تر استفاده می‌شود. همچنین نشان داده شده است که عملکرد ناشی از فرض تبادل‌پذیری در ساختارهای کاپیولای ارشمیدسی سلسله‌مراتبی، تنها به این بستگی دارد که آیا تابع احتمال توزیع مشترک اجزا در همان نوع با یک تابع کاپیولای ارشمیدسی منحصر به فرد ایجاد شده است یا خیر. به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادی، از اطلاعات وابسته نادقیق مربوط به سه سیستم مجزا در تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان استفاده شده است. یافته‌ها نشان‌دهنده آن است که با توجه به اینکه یک سیستم موازی- سری مستقیم با یک نوع جزء در نظر گرفته شده است، قابلیت اطمینان سیستم در ابتدا کاهش می‌یابد و سپس با افزایش پارامترهای وابستگی در تابع کاپیولا در هر نقطه زمانی افزایش می‌یابد.

جدول ۱- طبقه‌بندی مطالعات انجام‌شده

Table 1- Classification of the Conducted Studies

هدف	رویکرد در نظر گرفتن وابستگی			نوع وابستگی	نوع سیستم چند جزئی	مرجع
	مبتنی بر کاپیولا	مبتنی بر حالت	مبتنی بر شاخص‌های قابلیت اطمینان			
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم			✓	ساختاری	ساده	(وانگ و همکاران، ۲۰۲۱)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم			✓	تصادفی	ساده	(لی و همکاران، ۲۰۱۹)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم			✓	تصادفی	N از k	(وانگ و همکاران، ۲۰۲۲)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم میانگین زمان تا جایگزینی			✓	ساختاری	ساده	(جانگ و شو، ۲۰۰۰)
احتمال خرابی جزء غالب			✓	ساختاری	ساده	(ساتو و اوساکی، ۲۰۰۳)
نرخ خرابی			✓	ساختاری	ساده	(وانگ و ژانگ، ۲۰۰۹)
نرخ خرابی			✓	ساختاری	N از k	(سان و همکاران، ۲۰۰۶)
نرخ خرابی			✓	ساختاری	N از k	(سان و ما، ۲۰۱۰)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم	✓			ساختاری	ساده	(ژانگ و همکاران، ۲۰۱۴)
ارزیابی قابلیت اطمینان اجزاء			✓	ساختاری	ساده	(نگوین و همکاران، ۲۰۱۴)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم	✓			ساختاری	ساده	(رودریگز پیکن، ۲۰۱۷)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم			✓	ساختاری	ساده	(کیم و همکاران، ۲۰۱۹)

هدف	رویکرد در نظر گرفتن وابستگی			نوع وابستگی	نوع سیستم چند جزئی	مرجع
	مبتنی بر کاپیولا	مبتنی بر حالت	مبتنی بر شاخص‌های قابلیت اطمینان			
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم			✓	ساختاری	ساده	(دینه و همکاران، ۲۰۲۰)
نرخ خرابی			✓	اقتصادی	ساده	(لای و یان، ۲۰۱۶)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم			✓	اقتصادی	ساده	(ژانگ و همکاران، ۲۰۱۵)
نرخ خرابی			✓	اقتصادی	ساده	(لیو و همکاران، ۲۰۱۵)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم			✓	اقتصادی	N k از	(نگوین و همکاران، ۲۰۱۵)
ارزیابی قابلیت اطمینان اجزا			✓	اقتصادی	ساده	(وانگ و همکاران، ۲۰۲۱)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم			✓	تصادفی	ساده	(وانگ و کویت، ۲۰۰۴)
نرخ خرابی جزء غالب			✓	تصادفی	ساده	(لای، ۲۰۰۷)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم		✓		تصادفی	ساده	(چن و همکاران، ۲۰۱۱)
نرخ خرابی و تابع قابلیت اطمینان سیستم			✓	تصادفی	ساده	(سانگ و همکاران، ۲۰۱۳)
آتروپی جریان			✓	تصادفی	N k از	(قیسی و ناصر، ۲۰۱۴)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم			✓	تصادفی	ساده	(لیو و همکاران، ۲۰۱۵)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم		✓		تصادفی	ساده	(سانگ و همکاران، ۲۰۱۴)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم	✓			تصادفی	ساده	(خو و همکاران، ۲۰۱۷)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم			✓	تصادفی	ساده	(شان و همکاران، ۲۰۱۸)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم			✓	تصادفی	N k از	(مارتینود و همکاران، ۲۰۱۸)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم		✓		تصادفی	ساده	(چین و همکاران، ۲۰۱۸)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم	✓			تصادفی	ساده	(ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم	✓			تصادفی	ساده	(فانگ و همکاران، ۲۰۲۰)
ارزیابی قابلیت اطمینان و دسترس پذیری سیستم			✓	تصادفی	ساده	(دانگ و همکاران، ۲۰۲۰)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم			✓	تصادفی	ساده	(دانگ و همکاران، ۲۰۲۱)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم			✓	تصادفی	ساده	(کانگ و همکاران، ۲۰۲۲)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم	✓			تصادفی	ساده	(چن و سان، ۲۰۲۲)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم			✓	تصادفی	ساده	(احمد و همکاران، ۲۰۲۲)
پیش‌بینی باقی‌مانده عمر مفید سستم			✓	تصادفی	N k از	(نیو و همکاران، ۲۰۲۳)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم	✓			تصادفی	N k از	(کای و همکاران، ۲۰۲۳)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم		✓		تصادفی	سری-موازی	(بو و همکاران، ۲۰۲۳)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم	✓			ساختاری	چند جزئی شبکه‌ای	(شیانگ و همکاران، ۲۰۲۳)
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم	✓			تصادفی	سری-موازی	(ژنگ و ژانگ، ۲۰۲۳)

۳- ارزیابی مطالعات انجام شده

مدل‌های ارزیابی قابلیت اطمینان، سیستم‌های چند جزئی ارائه شده در این مطالعه، دارای مزیت کلی در نظر گرفتن اثر متقابل و وابستگی بین اجزای سیستم‌اند، بنابراین از تمام مدل‌های کلاسیکی واقع‌بینانه‌ترند که وابستگی بین اجزا را نادیده گرفته و یا آنها را مستقل فرض کرده‌اند. مدل‌های مذکور، مزایا و محدودیت‌های دیگری از جنبه‌های مختلف مفاهیم، روش‌ها و کاربردها به شرح ذیل دارند:

❖ مفاهیم

تفاوت‌های مفهومی بین مدل‌ها، مربوط به مفروضات و مفهومی است که درباره فرضیه وجود وابستگی بین اجزای سیستم ایجاد شده است. استنباط می‌شود که مدل‌های مبتنی بر اثر متقابل شاخص‌های قابلیت اطمینان بر مفروضات مفصلی، درباره ساختار سیستم متکی‌اند. در بیشتر موارد، وابستگی یک طرفه است و برخی از اجزا از قبل، جزء غالب فرض می‌شوند. علاوه بر این، این مدل‌ها بیشتر درباره سیستم‌هایی با معماری‌های ساده (سری، موازی و غیره) اعمال می‌شوند. مسئله اصلی مدل‌های مبتنی بر اثر متقابل و حالت این است که اثر متقابل در سیستم‌های پیچیده، به ندرت با مجموعه محدودی از متغیرهای حالت اندازه‌گیری می‌شود؛ زیرا خود اثر متقابل به ندرت مشاهده‌شدنی است، به این دلیل که فقط اجزای حیاتی برای عملکرد اصلی سیستم نظارت خواهد شد. مدل‌های اثر متقابل مبتنی بر کاپیولا، در مواردی بسیار مفیدند که اطلاعات قبلی کمی درباره سیستم وجود دارد؛ اما این نوع از مدل‌ها بر توابع تحلیلی سخت و پیچیده‌ای متکی‌اند که از یک مجموعه محدود انتخاب شده‌اند.

❖ روش‌ها

تفاوت‌ها از نظر روش‌شناسی، مربوط به تکنیک‌های متنوع و فرآیند مطالعه انتخاب شده برای توسعه فرضیه‌هاست. روش‌های استفاده شده برای مدل‌های اثر متقابل مبتنی بر کاپیولا در مقایسه با روش‌های دیگر، پیچیدگی ریاضی درخور توجهی دارند. همچنین ارتباط دادن توزیع به پارامترها دشوار است، حتی اگر آنها از مجموعه وسیعی از روش‌ها و آزمون‌های یادگیری آماری استفاده کنند. مدل‌های اثر متقابل شاخص‌های قابلیت اطمینان برای سیاست‌های مختلف نگهداری پیشگیرانه، اجراشدنی‌اند. مدل‌های تعامل مبتنی بر حالت به حوزه نگهداری مشروط محدود می‌شوند، اما بهترین تفسیرپذیری را دارند. بیشتر مدل‌ها در پژوهش‌ها، به طرح‌های تجربی و داده‌های شبیه‌سازی شده تکیه می‌کنند، در حالی که مشخص است می‌تواند تنوع بیشتری در واقعیت وجود داشته باشد.

❖ کاربردها

وقتی از وابستگی بین خرابی‌های اجزا صحبت می‌شود، منظور روش‌های کاربردی متعددی است؛ اما روش‌های مذکور به چه میزان کارآمدند؟ معیارهایی که باید در نظر گرفته شوند، شامل عملکرد روش‌های به کار گرفته شده از نظر صرفه‌جویی مالی یا بهبود در دسترس بودن و سطح پیچیدگی روش است. تحقیقات بیشتر در معرض محدودیت‌های عملی کمتری نسبت به حوزه کاربرد است. معمولاً فضای صنعتی از نظر قابلیت‌های آزمایشی، سطح تخصص و محدودیت‌های زمانی محدودند؛ بنابراین مهم است که ببینیم کدام رویکردها در یک مجموعه کلی با ابزارهای اساسی یا عمومی اعمال می‌شوند. مدل‌های اثر متقابل مبتنی بر کاپیولا به دلیل پیچیدگی تحلیلی، کمترین کاربرد را به عنوان کاربردهای عملی دارند. مدل‌های اثر متقابل مبتنی بر شاخص‌های قابلیت اطمینان کمتر پیچیده‌اند،

اما به دلیل پیچیدگی محاسباتی بالا، کاربرد آن همچنان دشوار است. مدل‌های اثر متقابل مبتنی بر حالت، معمولاً کاربرد بیشتری در صنعت ارائه می‌دهند. جدول ۲، نشان‌دهنده خلاصه‌ای از مزایا و محدودیت‌های مدل‌های ارائه شده است.

جدول ۲ - خلاصه مزایا و محدودیت‌های مدل‌های ارائه شده

Table 2 - Summary of the advantages and limitations of the presented models

محدودیت	مزایا	مدل
<ul style="list-style-type: none"> ➤ ضرایب در مدل‌های مذکور معمولاً ثابت‌اند، در صورتی که پدیده اثر متقابل متغیر است؛ ➤ وابستگی در بیشتر موارد به صورت یکپارچه نسبت به جزء غالب در نظر گرفته شده است؛ ➤ مدل‌ها به معماری ساده (سیستم‌های سری، موازی) محدودند و سیستم‌های پیچیده را در نظر نگرفته‌اند؛ ➤ توسعه مدل بر اساس داده‌های آزمایشی و امکان وجود تفاوت‌های درخور توجه بین شرایط آزمایشی و واقعیت. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ در نظر گرفتن اثر متقابل خرابی‌ها برای برآورد قابلیت اطمینان؛ ➤ انطباق بیشتر مدل‌ها با دنیای واقعی نسبت به مدل‌های کلاسیک و کمک به بهینه‌سازی عملکرد سیستم 	<p>مدل‌های اثر متقابل شاخص‌های قابلیت اطمینان</p>
<ul style="list-style-type: none"> ➤ تأثیر عوامل ایجاد خرابی اجزاء به تفکیک لحاظ نشده و به صورت کلی در نظر گرفته شده است؛ ➤ آستانه خرابی به صورت ثابت برای کل سیستم در نظر گرفته شده است که در واقعیت برای هر جزء متغیر است. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ معمولاً حالت و خرابی سیستم به‌طور واقعی نشان داده می‌شود؛ ➤ معمولاً تفسیر مدل‌ها، استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات خاصی را نشان می‌دهد. ➤ در نظر گرفتن ارتباط بین سیستم و محیط. 	<p>مدل‌های اثر متقابل مبتنی بر حالت</p>
<ul style="list-style-type: none"> ➤ مدل‌های تحلیلی پیچیده‌اند؛ ➤ کاپیولا باید از یک مجموعه محدود توابع کاندید انتخاب شود؛ ➤ به دیتای خرابی ترکیبی نیاز دارد، در صورتی که تابع توزیع تجمعی ارائه دهد؛ ➤ پیچیدگی ریاضیاتی. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ حتی اگر اطلاعات محدودی موجود باشد، اثر متقابل نشان داده می‌شود. 	<p>مدل‌های اثر متقابل مبتنی کاپیولا</p>

با توجه به بررسی و ارزیابی انجام شده در این مقاله درباره مطالعات موجود در زمینه قابلیت اطمینان سیستم‌های چند جزئی و با در نظر گرفتن وابستگی بین اجزاء، اصلی‌ترین شکاف‌های تحقیقاتی در حوزه در موارد ذیل ارائه می‌شود.

❖ نیاز به انجام مطالعاتی با تمرکز بر محاسبه و ارزیابی میزان اثر متقابل بین اجزای سیستم به صورت یک متغیر تصادفی؛

❖ نیاز به انجام مطالعاتی با تمرکز بر محاسبه حدود آستانه خرابی اجزای سیستم به عنوان متغیر تصادفی، در انطباق با ماهیت کارکردی سیستم‌ها در دنیای واقعی؛

❖ نیاز به ارائه مدل‌هایی با قابلیت لحاظ کردن عدم قطعیت‌های ترکیبی و اثرگذار بر وضعیت خرابی و افت سیستم و اجزای آن؛

❖ نیاز به ارائه مدل‌هایی با امکان در نظر گرفتن خطای‌های اندازه‌گیری در مدل سازی فرآیندهای

تصادفی؛

❖ نیاز به ارائه روش‌هایی برای دستیابی به داده‌های مطمئن و واقعی مربوط به خرابی، افت و طول عمر

سیستم‌های واقعی و اجزای آن.

بنابراین استنباط می‌شود که ارائه مدل‌هایی با امکان رفع چالش‌های یادشده، همچنان حوزه‌ای با جذابیت پژوهشی روزافزون در زمینه ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های چند جزئی، با در نظر گرفتن وابستگی بین اجزا مطرح است.

۴- نتیجه‌گیری

ارزیابی قابلیت اطمینان، با انجام محاسبه شاخص‌های کمی، مهندسان را به سوی تشخیص عملکرد نسبی یک سیستم هدایت می‌کند. در ارزیابی قابلیت اطمینان، علاوه بر محاسبه شاخص‌ها، نیاز به انجام تحلیل‌های مختلفی برای بررسی قابلیت اطمینان سیستم است. با توجه به اینکه سیستم‌های چند جزئی از پرکاربردترین و بااهمیت‌ترین سیستم‌ها در صنایع و حوزه‌های مختلف در دنیای واقعی است، بنابراین این مقاله روش‌ها و مدل‌های ارائه‌شده در پژوهش ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های چند جزئی را در شرایط انواع وابستگی بین اجزای سیستم بررسی و طبقه‌بندی کرد. در این مقاله بررسی و مقایسه روش‌ها و مدل‌های متعددی که در رابطه با ارزیابی قابلیت اطمینان انواع مختلف سیستم‌ها ارائه شده است، نشان داد با وجود اینکه کاربرد روش‌های مختلف پیشنهادشده به مشخصات سیستم مطالعه‌شده، قابلیت‌های روش و اهداف مطالعاتی بستگی دارد، دارای مزیت کلی در نظر گرفتن اثر متقابل و وابستگی بین اجزای سیستم‌اند و از تمام مدل‌های کلاسیکی واقع‌بینانه‌ترند که وابستگی بین اجزا را نادیده گرفته و یا مستقل فرض کرده‌اند. اما با توجه به ویژگی‌ها و ضعف‌های روش‌های موجود که در مقاله به آنها اشاره شده است، روش واحدی وجود ندارد که پاسخگوی همه نیازها باشد.

بنابراین با توجه به اهمیت و کاربردی بودن موضوع و در راستای بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌ها و انطباق بیشتر مدل‌ها با سیستم‌های موجود در دنیای واقعی، استنباط می‌شود که همچنان چالش‌هایی در حوزه ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های چند جزئی و ارائه مدل‌هایی با ویژگی‌های بیان‌شده در بخش سه مقاله وجود دارد که بیانگر جذابیت پژوهشی این حوزه برای مطالعات آتی است.

References

- Ahmad, H. H., Almetwally, E. M., & Ramadan, D. A. (2022). A comparative inference on reliability estimation for a multi-component stress-strength model under power Lomax distribution with applications. *AIMS Math*, 7, 18050-18079. <https://doi.org/10.3934/math.2022994>
- Bian, L., & Gebraeel, N. (2014). Stochastic modeling and real-time prognostics for multi-component systems with degradation rate interactions. *Iie Transactions*, 46(5), 470-482. <https://doi.org/10.1080/0740817X.2013.812269>
- Bo, Y., Bao, M., Ding, Y., & Hu, Y. (2023). A DNN-based reliability evaluation method for multi-state series-parallel systems considering semi-Markov process. *Reliability Engineering & System Safety*, 109604. <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109604>

- Chen, L. P., Ye, Z. S., & Huang, B. (2011). Condition-based maintenance for systems under dependent competing failures. In *2011 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 1586-1590. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2011.6118184>
- Cai, J., Yang, J., & Zhang, Y. (2023). Reliability analysis of s-out-of-k multicomponent stress-strength system with dependent strength elements based on copula function. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 20(5), 9470-9488. <https://doi.org/10.3934/mbe.2023416>
- Chen, X., & Sun, X. (2022). Reliability assessment for products with two performance characteristics based on marginal stochastic processes and copulas. *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, 51(7), 3621-3644. <https://doi.org/10.1080/03610918.2020.1720734>
- Dinh, D. H., Do, P., & Iung, B. (2020). Degradation modeling and reliability assessment for a multi-component system with structural dependence. *Computers & Industrial Engineering*, 144, 106443. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106443>
- Dong, Q., Cui, L., & Si, S. (2020). Reliability and availability analysis of stochastic degradation systems based on bivariate Wiener processes. *Applied Mathematical Modelling*, 79, 414-433. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.10.044>
- Dong, W., Liu, S., Bae, S. J., & Cao, Y. (2021). Reliability modelling for multi-component systems subject to stochastic deterioration and generalized cumulative shock damages. *Reliability Engineering & System Safety*, 205, 107260. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107260>
- Dekker, R., Wildeman, R. E., & Van der Duyn Schouten, F. A. (1997). A review of multi-component maintenance models with economic dependence. *Mathematical methods of operations research*, 45, 411-435. <https://doi.org/10.1007/BF01194788>
- Fang, G., Pan, R., & Hong, Y. (2020). Copula-based reliability analysis of degrading systems with dependent failures. *Reliability Engineering & System Safety*, 193, 106618. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106618>
- Gheisi, A., & Naser, G. (2014). A surrogate measure for multi-component failure based reliability analysis of water distribution systems. *Procedia Engineering*, 89, 333-338. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.196>
- Jain, N., Rathore, A. P. S., Jain, R., & Yadav, O. P. (2018). Maintenance planning based on reliability assessment of multi-state multi-component system. In *2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 262-267. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2018.8607526>
- Jain, N., Yadav, O. P., Rathore, A. P. S., & Jain, R. (2017). Reliability assessment framework for a multi-state multi-component system. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 34(8), 580-589. <https://doi.org/10.1080/21681015.2017.1354086>
- Jhang, J. P., & Sheu, S. H. (2000). Optimal age and block replacement policies for a multi-component system with failure interaction. *International Journal of Systems Science*, 31(5), 593-603. <https://doi.org/10.1080/002077200290902>
- Keizer, M. C. O., Flapper, S. D. P., & Teunter, R. H. (2017). Condition-based maintenance policies for systems with multiple dependent components: A review. *European Journal of Operational Research*, 261(2), 405-420. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.02.044>
- Kim, S. B., Park, W. J., You, J. W., Lee, J. K., & Yong, H. Y. (2019). Reliability Prediction Based Reliability Growth Management: Case Study of Surveillance System. *Journal of the Korean Society for Quality Management*, 47(1), 187-198. <https://doi.org/10.7469/JKSQM.2019.47.1.187>
- Kong, X., Yang, J., & Li, L. (2022). Reliability analysis for multi-component systems considering stochastic dependency based on factor analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 169, 108754. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108754>
- Li, H., Yuan, R., & Fu, J. (2019). A reliability modeling for multi-component systems considering random shocks and multi-state degradation. *IEEE Access*, 7, 168805-168814. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953483>

- Liu, B., Wu, J., & Xie, M. (2015). Cost analysis for multi-component system with failure interaction under renewing free-replacement warranty. *European Journal of Operational Research*, 243(3), 874-882. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.01.030>
- Lai, M. T., & Yan, H. (2016). Optimal number of minimal repairs with cumulative repair cost limit for a two-unit system with failure rate interactions. *International Journal of Systems Science*, 47(2), 466-473. <https://doi.org/10.1080/00207721.2014.886749>
- Lai, M. T. (2007). Periodical replacement model for a multi-unit system subject to failure rate interaction. *Quality & quantity*, 41, 401-411. <https://doi.org/10.1007/s11135-006-9011-0>
- Liu, J., Li, X., & Peng, C. (2015). Reliability analysis for multi-component degraded system subject to multiple dependent competing failure process. In *2015 Prognostics and System Health Management Conference (PHM)*, 1-5. IEEE <https://doi.org/10.1109/PHM.2015.7380060>
- Maaroufi, G., Chelbi, A., & Rezg, N. (2012). A selective maintenance policy for multi-component systems with stochastic and economic dependence. In *9th International Conference on Modeling, Optimization & Simulation*. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108174>
- Martinod, R. M., Bistorin, O., Castañeda, L. F., & Rezg, N. (2018). Maintenance policy optimisation for multi-component systems considering degradation of components and imperfect maintenance actions. *Computers & Industrial Engineering*, 124, 100-112. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.07.019>
- Nguyen, K. A., Do, P., & Grall, A. (2015). Multi-level predictive maintenance for multi-component systems. *Reliability engineering & system safety*, 144, 83-94. <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.07.017>
- Nguyen, K. A., Do, P., & Grall, A. (2014). Condition-based maintenance for multi-component systems using importance measure and predictive information. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 1(4), 228-245. <https://doi.org/10.1080/23302674.2014.983582>
- Niu, H., Zeng, J., Shi, H., Zhang, X., & Liang, J. (2023). Degradation modeling and remaining useful life prediction for a multi-component system with stochastic dependence. *Computers & Industrial Engineering*, 175, 108889. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108889>
- Rodriguez-Picon, L. A. (2017). Reliability assessment for systems with two performance characteristics based on gamma processes with marginal heterogeneous random effects. *Eksplatacja i Niezawodność*, 19(1), 8-18. <https://doi.org/10.17531/ein.2017.1.2>
- Rasmekomen, N., & Parlikad, A. K. (2016). Condition-based maintenance of multi-component systems with degradation state-rate interactions. *Reliability Engineering & System Safety*, 148, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.11.010>
- Song, S., Coit, D. W., Feng, Q., & Peng, H. (2014). Reliability analysis for multi-component systems subject to multiple dependent competing failure processes. *IEEE Transactions on Reliability*, 63(1), 331-345. <https://doi.org/10.1109/TR.2014.2299693>
- Satow, T., & Osaki, S. (2003). Optimal replacement policies for a two-unit system with shock damage interaction. *Computers & Mathematics with Applications*, 46(7), 1129-1138. [https://doi.org/10.1016/S0898-1221\(03\)90128-3](https://doi.org/10.1016/S0898-1221(03)90128-3)
- Sun, Y., Ma, L., Mathew, J., & Zhang, S. (2006). An analytical model for interactive failures. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(5), 495-504. <https://doi.org/10.1016/j.res.2005.03.014>
- Sun, Y., & Ma, L. (2010). Estimating interactive coefficients for analysing interactive failures. *Eksplatacja i Niezawodność*, 2(46), 67-72.
- Sung, C. K., Sheu, S. H., Hsu, T. S., & Chen, Y. C. (2013). Extended optimal replacement policy for a two-unit system with failure rate interaction and external shocks. *International Journal of Systems Science*, 44(5), 877-888. <https://doi.org/10.1080/00207721.2011.626905>

- Song, S., Coit, D. W., Feng, Q., & Peng, H. (2014). Reliability analysis for multi-component systems subject to multiple dependent competing failure processes. *IEEE Transactions on Reliability*, 63(1), 331-345. [https:// DOI: 10.1109/TR.2014.2299693](https://doi.org/10.1109/TR.2014.2299693)
- Shen, J., Elwany, A., & Cui, L. (2018). Reliability analysis for multi-component systems with degradation interaction and categorized shocks. *Applied Mathematical Modelling*, 56, 487-500. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.12.001>
- Tian, Z., & Liao, H. (2011). Condition based maintenance optimization for multi-component systems using proportional hazards model. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(5), 581-589. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.12.023>
- Xu, L., Chen, Y., Briand, F., Zhou, F., & Givanni, M. (2017). Reliability measurement for multistate manufacturing systems with failure interaction. *Procedia CIRP*, 63, 242-247. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.124>
- Xiang, S., Lv, Y., Li, Y., & Qian, L. (2023). Reliability Analysis of Failure-Dependent System Based on Bayesian Network and Fuzzy Inference Model. *Electronics*, 12(4), 1026. <https://doi.org/10.3390/electronics12041026>
- Wang, R., Cheng, Z., Dong, E., & Rong, L. (2021). Condition-Based Maintenance Modeling and Reliability Assessment for Multi-Component Systems with Structural Dependence under Extended Warranty. *Complexity*, 1-14. <https://doi.org/10.1155/2021/8938767>
- Wang, Y., Li, X., Chen, J., & Liu, Y. (2022). A condition-based maintenance policy for multi-component systems subject to stochastic and economic dependencies. *Reliability Engineering & System Safety*, 219, 108174. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108174>
- Wang, G. J., & Zhang, Y. L. (2009). A geometric process repair model for a two-component system with shock damage interaction. *International Journal of Systems Science*, 40(11), 1207-1215. <https://doi.org/10.1080/00207720903038010>
- Wang, R., Cheng, Z., Dong, E., Guo, C., & Rong, L. (2021). Reliability-based opportunistic maintenance modeling for multi-component systems with economic dependence under base warranty. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 1-16. <https://doi.org/10.1155/2021/5541902>
- Wang, P., & Coit, D. W. (2004). Reliability prediction based on degradation modeling for systems with multiple degradation measures. In *Annual Symposium Reliability and Maintainability, 2004-RAMS*, 302-307. IEEE. [https://DOI: 10.1109/RAMS.2004.1285465](https://doi.org/10.1109/RAMS.2004.1285465)
- Zhang, Z., Wu, S., Lee, S., & Ni, J. (2014). Modified iterative aggregation procedure for maintenance optimisation of multi-component systems with failure interaction. *International Journal of Systems Science*, 45(12), 2480-2489. <https://doi.org/10.1080/00207721.2013.771759>
- Zhang, X. P., Shang, J. Z., Chen, X., Zhang, C. H., & Wang, Y. S. (2014). Statistical inference of accelerated life testing with dependent competing failures based on copula theory. *IEEE Transactions on Reliability*, 63(3), 764-780. [https://DOI: 10.1109/TR.2014.2314598](https://doi.org/10.1109/TR.2014.2314598)
- Zhang, Z., Wu, S., Li, B., & Lee, S. (2015). Type maintenance policy for multi-component systems with failure interactions. *International Journal of Systems Science*, 46(6), 1051-1064. <https://doi.org/10.1080/00207721.2013.807386>
- Zhang, Y., Ma, Y., Liu, L., & Ouyang, L. (2018). A novel reliability model for multi-component systems subject to multiple dependent competing risks with degradation rate acceleration. *Eksplotacja i Niezawodność*, 20(4). <https://doi.org/10.17531/ein.2018.4.9>
- Zheng, Y., & Zhang, Y. (2023). Reliability analysis for system with dependent components based on survival signature and copula theory. *Reliability Engineering & System Safety*, 109402. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109402>

¹ Keizer et al.

² Zhang et al.

- ³ Bian & Gebraeel
- ⁴ Tian & Liao
- ⁵ Wang et al.
- ⁶ Li et al.
- ⁷ Song et al.
- ⁸ Liu et al.
- ⁹ Rasmekomen & Parlikad
- ¹⁰ Jain et al.
- ¹¹ Economic Dependence
- ¹² Structural Dependence
- ¹³ Stochastic Dependence
- ¹⁴ Specific Function
- ¹⁵ Degradation
- ¹⁶ Dekker et al.
- ¹⁷ Reliability Indexes Interaction
- ¹⁸ Dong et al.
- ¹⁹ Kong et al.
- ²⁰ State-Based Interaction
- ²¹ Chen et al.
- ²¹ Copula -Based Interaction
- ²¹ Gaussian
- ²¹ Fang et al.
- ²¹ Minor Failure
- ²¹ Major Failure
- ²¹ Instant Failure
- ²² Chen & Sun
- ²³ Jhang & Sheu
- ²⁴ The Mean Time to Replacement
- ²⁵ Shock Damage Interaction
- ²⁶ Satow & Osaki
- ²⁷ Wang & Zhang
- ²⁸ Sun et al.
- ²⁹ Sun & Ma
- ³⁰ Nguyen et al.
- ³¹ fatigue-crack
- ³² Frank Copula
- ³³ Rodriguez-Picon
- ³⁴ Kim et al.
- ³⁵ Dinh et al.
- ³⁶ Wang et al.
- ³⁷ Xiang et al.
- ³⁸ the parent node of the current node
- ³⁹ Lai & Yan
- ⁴⁰ Opportunistic Maintenance
- ⁴¹ Degradation
- ⁴² Variance-Covariance Matrix
- ⁴³ Wang & Coit
- ⁴⁴ Lai
- ⁴⁵ Natural Failure
- ⁴⁶ Traumatic Failure
- ⁴⁷ Survival Function
- ⁴⁸ Fault Tree Model
- ⁴⁹ Maaroufi et al.
- ⁵⁰ Flow Entropy
- ⁵¹ Gheisi & Naser
- ⁵² Xu et al.
- ⁵³ Categorized Shocks
- ⁵⁴ Sudden Jump
- ⁵⁵ Shen et al.
- ⁵⁶ Nonfatal

- 57 Catastrophic
- 58 Martinod
- 59 Soft Failure Process
- 60 Hard Failure Process
- 61 Micro-Electro-Mechanical
- 62 Factor Analysis
- 62 Marginal Stochastic Processes
- 62 Holistic Bayesian
- 63 Stress-Strength
- 64 Ahmad et al.
- 65 Niu et al.
- 66 Kalman filter
- 67 Cai et al.
- 68 multicomponent stress-strength system
- 69 Clayton copula
- 70 Bo et al.
- 71 Deep neural network (DNN)
- 72 Zheng & Zhang
- 73 survival signature theory
- 74 Sklar's theorem