Journal of Health and Safety at Work 2025; 15(4): 780-806

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Reliability Assessment of Gas Pressure Reduction Stations Based on Monte Carlo Markov Chain and Continuous-Time Markov Chain Methods: A Case Study of a City Gas Pressure Reduction Station

Ali Karimi[1], Esmaeil Zarei[2,3], Rajabali Hokmabadi[4*]

[1]*Department of Occupational Health, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran*
[2]*Department of Safety Science, College of Aviation, Embry-Riddle Aeronautical University, Prescott, AZ 86301, USA.*
[3]*Robertson Safety Institute (RSI), Embry-Riddle Aeronautical University, Prescott, AZ, 86301, USA*
[4]*Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, North Khorasan University of Medical Sciences, Bojnurd, Iran*

Received: 15-9-2025 Accepted: 3-12-2025

ABSTRACT

Introduction: A gas pressure reduction station is an important facility in gas transmission systems. These systems consist of various sections, the reliability of each section affecting the station's overall reliability. Therefore, this study aimed to assess the reliability of station sections using Markov chain Monte Carlo (MCMC) and the continuous-time Markov chain (CTMC) method.

Material and Methods: Equipment failure and repair rates were simulated using the MCMC method in WinBUGS14. Then, based on the failure and repair rates, the station reliability was evaluated using the CTMC. The results of the equipment failure rate simulation were validated using two criteria: MC Error and the Goleman-Rubin test. Also, the results of station reliability evaluation were validated using Reality Check and Partial Benchmark Exercise methods.

Results: Failures in the filtration and pressure reduction sections were more frequent than in other sections of the station. Therefore, these sections were considered the most critical sections in the reliability assessment. The posterior standard error was less than 0.01, indicating good convergence of the data for the parameter posterior distribution. The results of the Goleman-Rabin test showed values less than 1.2, indicating proper convergence of the chains. For all sections and stations, a systematic approach was determined using the Markov model. The results showed a strong correlation between the CTMC and the block diagram method (R2=0.9499).

Conclusion: The proposed approach combines failures of system components and can display multiple failures. It also accounts for time factors in its calculations and minimizes subjective expert evaluations.

Keywords: *Reliability; Continuous Time Markov Chain (CTMC) Method; Markov Chain Monte Carlo (MCMC) Method; National Gas Pressure Reducing Station*

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Karimi A., Zarei E., Hokmabadi R. Reliability Assessment of Gas Pressure Reduction Stations Based on Monte Carlo Markov Chain and Continuous-Time Markov Chain Methods: A Case Study of a City Gas Pressure Reduction Station. J Health Saf Work. 2025; 15(4): 780-806.

1. INTRODUCTION

The development of important, highly complex technologies across industries, especially in process systems, has shifted the safety philosophy from an after-the-event to a before-the-event approach. The new approach is based on identifying and controlling the root causes of accidents before they occur. Process systems used in the oil, gas, and petrochemical industries, and in most

* Corresponding Author Email: *abi.hse2006@gmail.com*

Copyright © 2025 The Authors.
Published by Tehran University of Medical Sciences

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]

manufacturing units, play a very important role in the economies and employment of most countries. One important facility in natural gas transmission systems is the city gas gate (CGS) pressure-reduction station. These stations perform several important operations, including removing pollutants, reducing pressure, increasing gas temperature, and adding odor. These stations are always the site of catastrophic accidents due to their specific operating conditions .

Pressure-reducing stations play a crucial role in providing timely, safe gas to residential, commercial, and industrial customers. Given the proximity or presence of natural gas transmission systems, especially CGS in urban areas, the consequences of any damage (accidental or intentional) to these systems can be catastrophic. In this respect, public safety and welfare largely depend on their safe operation, including CGS pressure-reducing stations. Therefore, it is important to assess the reliability of CGS stations to create safe conditions, prevent the occurrence of various failure modes and their consequences, and update maintenance programs.

Reliability has become more important in the design of engineering systems than ever before, as system satisfaction depends on it. Reliability assessment and failure analysis are challenging aspects of studying complex systems. Modeling techniques commonly used in reliability problems include reliability block diagram (RBD), failure mode and effects analysis (FMEA), fault tree analysis (FTA), event tree analysis (ETA), Petri nets, Bayesian networks, and Markov chains. For a complex repairable system that has a system structure and consists of many components and has complex interactions, including inputs, outputs, subsystems, and boundaries, it is logical that all these system components interact with each other directly or indirectly. Therefore, to estimate the probability of failure and evaluate the reliability of such systems, the interactions must be represented mathematically. The Markov model is a powerful and flexible technique for assessing system reliability. This model is a mathematical model that is performed by drawing state transition diagrams of the system and examining these diagrams to understand how undesirable states (failures) are reached and their relative probabilities. This model is a suitable tool for modeling complex systems that involve scheduling, sequencing, repair, and redundancy. Therefore, these models are widely used to determine availability and reliability.

Uncertainty parameters are usually introduced as random variables in reliability models, and their distribution must be specified. Typically, real data are used to estimate the distribution parameters. Real data between failures can be used to infer model parameters using the Markov Chain Monte Carlo (MCMC) simulation method. This method allows any statistical inference by generating random samples from statistical distributions and using MCMC methods.

Considering the mentioned points, the present study offers a systematic approach to the Markov model using simulated equipment failure rates for reliability analysis. In this approach, equipment failure rates were estimated using the MCMC method, and the failure rates of sections and stations were subsequently estimated using the CTMC method.

2. MATERIAL AND METHODS

In this research, the CGS station sections were first identified through consultation with designers, manufacturers, engineers, and gas company experts, review of operational drawings (PFD and P&ID), and field visits. Then, based on existing references, the probability density distribution function of equipment failure for each section was determined as an exponential function. Then, the station equipment failure rate was calculated via MCMC simulation in WinBUGS14, and the reliability of the sections and the CGS station was evaluated using the CTMC method. Generating random samples from statistical distributions through the Markov chain can be done in various ways. Since the Gibbs method is the best known, with an acceptance rate of 1 among these methods, and is more limited and simpler, it was selected as the desired method for simulation. Also, WinBUGS14 was used for simulation as one of the software packages that generates random samples using Gibbs sampling. This software calculates the full conditional distributions and generates random samples from the parameter posterior distributions using appropriate sampling techniques . The steps for determining the equipment failure rate were carried out using WinBUGS14, following the procedure outlined in Fig. 1.

For a given system, a Markov model consists of a list of possible states, possible transition paths between them, and rate parameters (failure and repair rates) for each transition. When graphically

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]

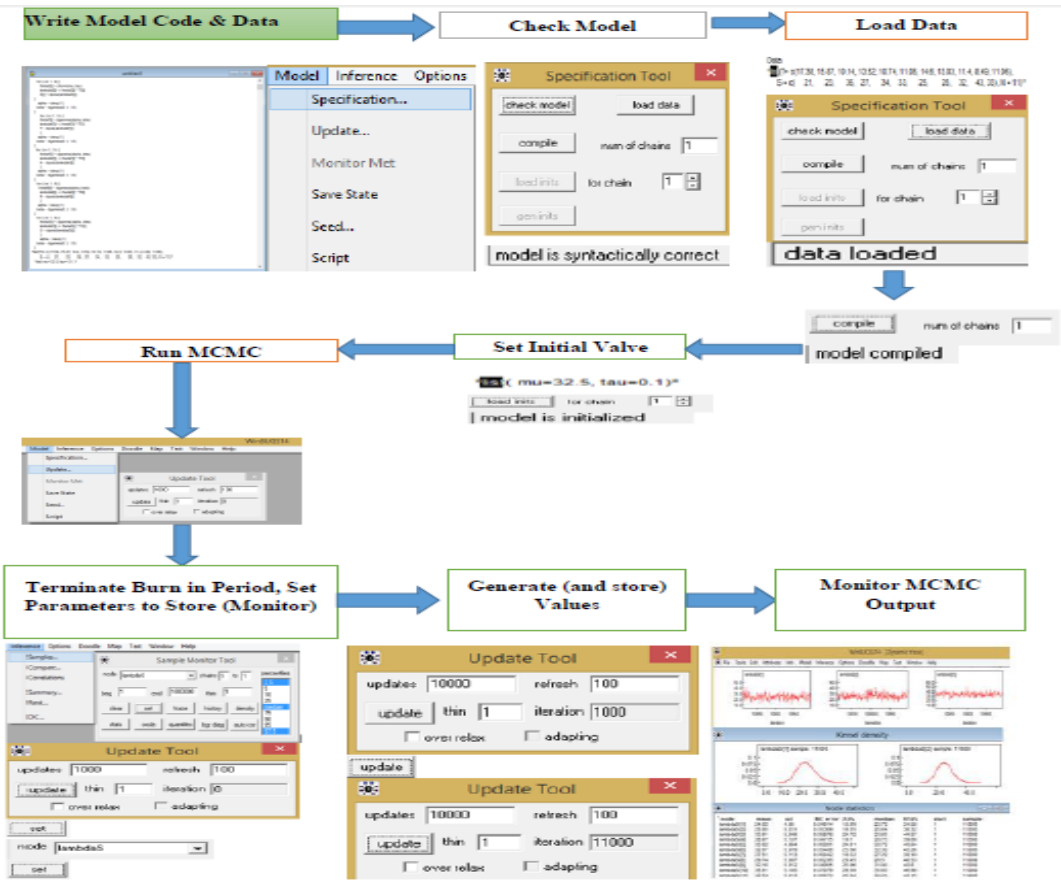


Fig. 1: Steps to determine equipment failure rates based on WinBUGS14 software

representing a Markov model, each state is usually depicted as a circle, with arrows denoting the transition paths between states (Fig. 2).

In Fig. 3, λ (failure rate) represents the rate parameter for the transition from state 0 to state 1, and μ (repair rate) represents the rate parameter for the transition from state 1 to state 0.

$Pj\ (t)$ shows the probability of the system being in state j at time t. It is usually assumed that the device is in the normal state at the initial time t=0, and therefore the initial probabilities of the two states ($P0(0)$ = 1 and $P1(0)$ = 0). Then, the probability of state 0 decreases at a constant rate of λ. In other words, if the system is in state 0 at any given time, the probability of transitioning to state 1 during the next time increment dt is λdt.

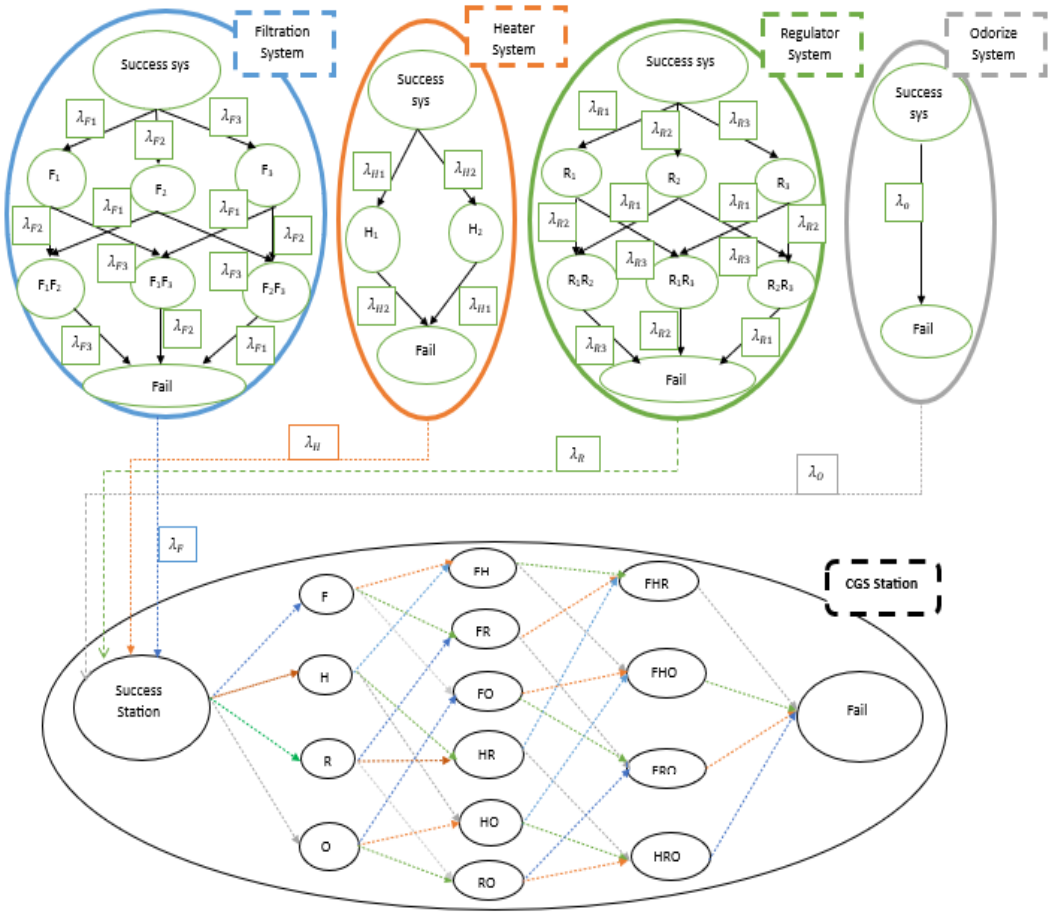
Similarly, if the system is in state 1, the probability of transitioning to state 0 during the next time increment dt is μdt. Therefore, the incremental change P_0 is the sum of the products P_0 and λdt and the products P_1 and μdt, as given by Eq. (1):

$$dP_0(t) = -P_0(t)\lambda dt + P_1(t)\mu dt \qquad (1)$$

Consider a system that is either operating or failing. If the device is operating at time t, then X(t)=1, and if it is failing, then X(t)=0. In this case, the random variable X is not a discrete-time random variable because. The explanation is that it stays there and then transitions to another state after entering a state for a period of time that is itself a random variable. Such processes are called continuous-time Markov chains (CTMCs). A continuous Markov chain is a transition rate matrix Q with dimensions equal to the state space, defined by a finite space or numerator. For i≠j, each element q_{ij} is nonnegative and describes the transition rate of the process from state i to state j. There are three definitions for continuous-time Markov processes:

Based on the transition probability, for each value of n=0,1, 2, and times t_0, t_1, t_2, with states i_0, i_1,

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]



Success Station: Success of all four station sections, F: Failure of filtration section, H: Failure of heater section, R: Failure of pressure reduction section, O: Failure of odorizer section, λ_F: Failure rate of filtration section, λ_H: Failure rate of heater system, λ_R: Failure rate of pressure reduction section, λ_O: Failure rate of odorizer section, Fail: Failure of all four station sections

Fig. 2: Systematic approach for urban gas pressure reduction stations based on the Markov model

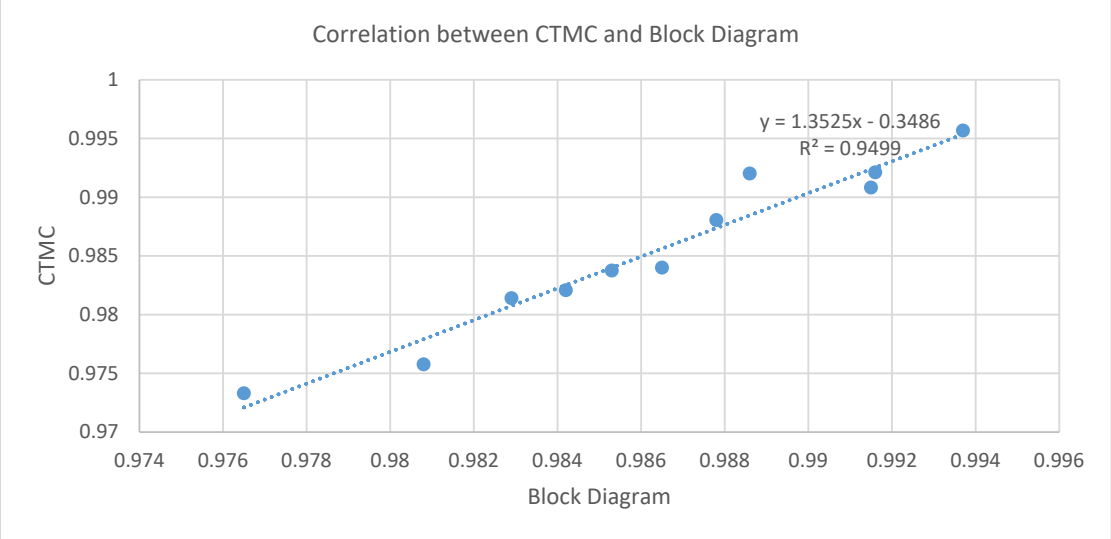


Fig. 3: Correlation between the station reliability based on the results of the proposed approach and operational conditions data

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]

Table 1: Results of station reliability parameters in operational conditions in different years

R	Year	Station reliability based on the proposed approach	Station reliability based on a block diagram
1	2012	0.9765	0.9733
2	2013	0.9865	0.984
3	2014	0.9886	0.992021
4	2015	0.9937	0.995682
5	2016	0.9842	0.982081
6	2017	0.9808	0.975764
7	2018	0.9915	0.990826
8	2019	0.9916	0.992117
9	2020	0.9853	0.983757
10	2021	0.9829	0.981394
11	2022	0.9878	0.988051

i_2, we have Eq. (2):

$$P_r\left(X_{n+1}=i_{n+1}\middle|X_{t_0}=i_0, X_{t_1}=i_1, \dots, X_{t_n}=i_n\right)= p_{i_n i_{n+1}}(t_{n+1}-t_n)$$

where p_{ij} applies to two sets of differential equations called Kolmogorov forward equations and Kolmogorov backward equations.

This study examines the validation of the obtained data in two stages, which are:

To validate the data calculated in the simulation using WinBUGS14, parameters such as Monte Carlo error and the Goleman-Robin test were used . To validate the proposed Markov model approach, there are various methods in the field of safety and reliability; one or more of these can be used. The results of the station reliability assessment were validated with Reality Check and Partial Benchmark Exercise methods.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The main function of the CGS station is to reduce gas pressure to suit subsequent uses. This station has specific physical and geometric details in its components due to the amount of gas pressure reduction (inlet-to-outlet pressure) and its capacity. However, in general, all these stations are the same in terms of appearance and type of components, which include the following main sections:

- Filtration section
- Heating section
- Pressure reduction section
- Deodorizing section

The systematic approach for the urban gas pressure reduction station was developed based on a Markov model for four non-corresponding sections: filtration, heater, pressure reduction, and odorizer, as shown in Fig. 2.

After determining the equipment's failure and repair rates, the station's reliability is assessed using the CTMC method in different years. Based on the space diagram of the city gas pressure reduction station and on the rates of failure and repair of the systems, the station's reliability was calculated in different years. The station's reliability was calculated using the equipment failure rate and the CTMC and block diagram methods; the results are shown in Table 1. The results showed that there was a strong correlation between the results calculated based on the proposed approach and the block diagram method (R^2=0.9499) (Fig. 3).

The Partial Benchmark Exercise method was also used to validate the proposed approach. Although it was difficult to find a similar study, a relatively similar investigation conducted in 2019 was selected, and the results obtained using this approach were compared with those of the study in question. The station reliability rate in the study in question, which used a Bayesian network, was 0.9743. The proposed approach in this study calculated a station reliability rate of 0.9759, indicating consistency with the results of the study in question.

4. CONCLUSIONS

The proposed approach combines failures of system components and can display multiple failures. It also accounts for time in its calculations and minimizes subjective expert evaluation. Using the MCMC stochastic simulation method, the failure rate of equipment can be estimated from its failure times, thereby minimizing uncertainty. Based on the calculated failure rate, an appropriate maintenance plan can be developed for the CGS city gas pressure reduction station equipment. The Markov model

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]

is a suitable tool for assessing system reliability. This study presents a systematic approach to building a Markov model for city gas pressure reduction stations, based on the failure rates of the station subsections. This approach reduces the need to build Markov models for the target system and provides an accurate solution for reliability assessment.

5. ACKNOWLEDGMENT

This study is part of a doctoral thesis and was approved by Ethics Committee of Tehran University of Medical Sciences. The authors appreciate and thank cooperation and financial support of Iran National Gas Company (North Khorasan Province) and Occupational Health Engineering Department, Tehran University of Medical Sciences.

6. ETHICAL CODE

IR.TUMS.SPH.REC.1400.151

7. FUNDING

National Iranian Gas Company (North Khorasan Province) and Occupational Health Engineering Department, Tehran University of Medical Sciences.

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]

ارزیابی قابلیت اطمینان ایستگاه تقلیل فشار گاز بر مبنای روش‌های مونت کارلو زنجیره مارکوف و زنجیره مارکوف زمان پیوسته: مطالعه موردی ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری

علی کریمی[۱]، اسماعیل زارعی[۲،۳]، رجبعلی حکم آبادی[۴*]

[۱]گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
[۲]گروه علوم ایمنی، دانشکده هوانوردی، دانشگاه هوانوردی امبری-ریدل، پرسکات، آریزونا، آمریکا
[۳]موسسه ایمنی رابرتسون، دانشگاه هوانوردی امبری-ریدل، پرسکات، آریزونا، آمریکا
[۴]گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی خراسان شمالی، بجنورد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۶/۲۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۱۲

چکیده

مقدمه: یکی از تاسیسات مهم در سیستم‌های انتقال گاز، ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز شهری می‌باشند که از بخش‌های مختلف تشکیل یافته اند. قابلیت اطمینان هر بخش از ایستگاه در قابلیت اطمینان کلی ایستگاه موثر می‌باشد. لذا این مطالعه با هدف ارزیابی قابلیت اطمینان بخش‌های مختلف ایستگاه بر مبنای روش‌های مونت کارلو زنجیره مارکوف و زنجیره مارکوف زمان پیوسته انجام گرفت.

روش کار: نرخ شکست و تعمیر تجهیزات با استفاده از روش شبیه سازی مونت کارلو زنجیره مارکوف با نرم افزار WinBUGS14 شبیه سازی گردید، سپس بر اساس نرخ شکست و تعمیر، قابلیت اطمینان ایستگاه توسط روش زنجیره مارکوف زمان پیوسته مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی نرخ شکست تجهیزات با دو معیار MC Error و آزمون گلمن-روبین و نتایج ارزیابی قابلیت اطمینان ایستگاه با روش‌های Reality Check و Partial Benchmark Exercise اعتبار بخشی گردید.

یافته‌ها: شکست در بخش‌های فیلتراسیون و تقلیل فشار بیشتر از سایر بخش‌های ایستگاه بود، لذا این بخش‌ها به عنوان بحرانی ترین بخش‌ها در ارزیابی قابلیت اطمینان محسوب می‌گردد. خطای معیار نمونه‌های پسین کمتر از ۰,۰۱ بود که نشان‌دهنده همگرایی خوب داده‌ها برای توزیع پسین پارامترها می‌باشد. نتایج آزمون گلمن-رابین، مقادیر کمتر از ۱,۲ را نشان داد، که نشان از همگرایی مناسب زنجیره‌ها بود. برای کلیه بخش‌ها و ایستگاه، رویکرد سیستماتیک بر اساس مدل مارکوف تعیین گردد که نتایج نشان داد همبستگی قوی بین نتایج محاسبه شده بر اساس روش زنجیره مارکوف زمان پیوسته و روش دیاگرام بلوکی (R^2=۰,۹۴۹۹) وجود داشت.

نتیجه گیری: رویکرد پیشنهادی، شکست اجزای سیستم را با هم ترکیب کرده و توانایی نمایش شکست‌های چندگانه را دارد. همچنین جنبه‌های زمانی را در محاسبه خود لحاظ نموده و ارزیابی ذهنی کارشناسان را به حداقل ممکن می‌رساند.

کلمات کلیدی: *قابلیت اطمینان، روش زمان پیوسته زنجیره مارکوف (CTMC)، روش مونت کارلو زنجیره مارکوف (MCMC)، ایستگاه تقلیل فشار گاز طبیعی*

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: *abi.hse2006@gmail.com*

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]

مقدمه

توسعه فناوری‌های مهم و پیچیده در صنایع مختلف، بویژه در سیستم‌های فرآیندی سبب شده است که فلسفه ایمنی از رویکرد پس از وقوع به رویکرد پیش از وقوع تغییر یابد. رویکرد جدید بر پایه شناسایی و کنترل علل ریشه‌ای حوادث پیش از وقوع آنهاست (۱). سیستم‌های فرآیندی که در صنایع و واحدهای نفت، گاز و پتروشیمی و اغلب واحدهای تولیدی کاربرد دارند، نقش بسیار مهمی در اقتصاد و اشتغال اغلب کشور ایفاء می‌کنند (۲-۴). یکی از تاسیسات مهم در سیستم‌های انتقال گاز طبیعی، ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز شهری (CGS[1]) می‌باشد. این ایستگاه‌ها چندین عملیات مهم از جمله حذف آلاینده‌ها، تقلیل فشار، افزایش دمای گاز و افزودن بو را انجام می‌دهند. این ایستگاه‌ها به دلیل شرایط خاص عملیاتی خود همواره بستر حوادث فاجعه آمیزی می‌باشند. کشور ایران در یک دهه اخیر شاهد وقوع حوادثی از قبیل انفجار وآتش سوزی در این ایستگاه‌ها بوده است که می‌توان به حادثه ایستگاه تقلیل فشار سهند تبریز در سال ۱۳۹۵، آتش سوزی ایستگاه تقلیل فشار گاز نیروگاه علی آباد کتول در سال ۱۳۹۵ و همچنین نشت گاز در حین تست عملیات تعویض فیلتر در ایستگاه تقلیل فشار منطقه کوریجان همدان در سال ۱۳۹۶ اشاره کرد (۴-۶). این ایستگاه‌ها، نقشی اساسی در تأمین بموقع و ایمن گاز برای مشتریان مسکونی، تجاری و صنعتی دارد. با توجه به مجاورت و یا وجود سیستم‌های انتقال گاز طبیعی، بویژه CGS در مناطق شهری، عواقب هرگونه آسیب (تصادفی یا عمدی) به سیستم می‌تواند فاجعه بار باشد و امنیت و رفاه عمومی را به مخاطره بیاندازد. بنابراین، ارزیابی قابلیت اطمینان در ایستگاه‌های CGS به منظور ایجاد شرایط ایمن، پیشگیری از وقوع انواع حالات شکست و کاهش پیامدهای وقوع احتمالی آنها و بروز رسانی برنامه های تعمیر و نگهداری مهم می‌باشد (۷-۹).

به منظور به حداقل رساندن شکست در سیستم‌های مهندسی، طراح باید درک کند که شکست چرا و چگونه اتفاق می‌افتد، همچنین باید طراح بداند که چگونه شکست‌ها رخ می‌دهند که این امر مستلزم پیش بینی از نحوه شکست و احتمال رخ دادن آن است. پیشگیری از شکست و خرابی‌ها و درک چرایی و نحوه شکست، مستلزم آگاهی و شناخت از فیزیک شکست است. به طور کلی، بیشتر مکانیزم‌های شکست، اثرات آن‌ها و روند شکست در یک طراحی خاص به خوبی شناخته نشده است، بر این اساس، پیش بینی شکست قطعی نیست و در حقیقت یک فرایند احتمالی است. بنابراین، آنالیز قابلیت اطمینان با استفاده از فیزیک شکست یا داده‌های ثبت شده از شکست‌های قبلی یک فرایند احتمالاتی است و نیازمند استفاده از دانش متناسب با آن می‌باشد (۱۱-۱۰).

ارزیابی قابلیت اطمینان و تجزیه و تحلیل شکست یک جنبه مهم و چالش برانگیز در مطالعه سیستم‌های پیچیده است (۱۰). به طور معمول، تکنیک‌های مدلسازی که در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها مورد استفاده قرار میگیرند شامل نمودار بلوکی قابلیت اطمینان (RBD[2])، تجزیه و تحلیل شکست و اثرات آن(FMEA[3])، تجزیه و تحلیل درخت خطا (FTA[4])، تجزیه و تحلیل درخت رویداد (ETA[5])، شبکه‌های پتری[6]، شبکه‌های بیزین[7] و زنجیره‌های مارکوف[8] می‌باشند (۱۱-۱۲). از معایب روش نمودار بلوکی این است که احتمال شکست یا موفقیت اجزاء سیستم با زمان تغییر نمی‌کند (ثابت می‌ماند). این روش در مدل‌سازی قابلیت اطمینان سیستم‌های دینامیکی کارآمد نیست (۱۳-۱۴). تکنیک تجزیه و تحلیل حالات شکست و اثرات آن (FMEA[9]) به طور گسترده برای پیش بینی، شناسایی و حذف خطرات بالقوه، شناخته شده که می‌تواند در بهبود شاخص‌های ایمنی یک سیستم کمک کند (۱۵-۱۷). از محدودیت‌های روش FMEA می‌توان به ارزیابی ذهنی کارشناسان، عدم وجود مقادیر وزنی پارامترهای

1. City Gas Station

2. Reliability Block Diagram
3. Failure Mode and Effects Analysis
4. Fault Tree Analysis
5. Event Tree Analysis
6. Petri Networks
7. Bayesian Networks
8. Markov Chains
9. Failure Mode and Effect Analysis

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]

ریسک و در نظر نگرفتن شرطی بودن بین رویدادهای شکست اشاره کرد (۱۸-۲۰). روش‌های FTA و ETA رویکردهایی هستند که برای ارزیابی قابلیت اطمینان استفاده می‌شوند. مسائل ساده قابلیت اطمینان با استفاده از مدل‌های درخت خطا و علت به راحتی و به سرعت قابل حل می‌باشند، اما در مسائل پیچیده تر، فضای حالت به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد و این مدل‌ها مستعد خطا هستند. (۲۱-۲۳). روش شبکه پتری را می‌توان برای تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان سیستمهای پیچیده استفاده کرد. اما در این روش، جنبه‌های زمانی دیده نشده است (۲۴-۲۶). در دهه اخیر، شبکه‌های بیزین به ابزاری محبوب برای مدل‌سازی هر نوع مسأله آماری تبدیل شده است. همچنین به عنوان یـک روش تحلیلی، استفاده از آن در ارزیابی قابلیت اطمینان نیز رشد چشمگیری داشته است. اما چالش اصلی در شبکه‌های بیزین این است که داده‌های آماری برای تخمین احتمالات باید در دسترس باشند. همچنین برای سیستم‌های تعمیر پذیر ارزیابی قابلیت اطمینان و قابلیت دسترس پذیری با استفاده از شبکه بیزین امکان پذیر نمی‌باشد (۲۷-۲۹). لذا برای یک سیستم پیچیده قابل تعمیر که دارای ساختار سیستمی است و از اجزای زیادی تشکیل شده است و دارای تعاملات پیچیده می‌باشند و شامل ورودی‌ها، خروجی‌ها، زیرسیستم‌ها و مرزها می‌باشند، منطقی است که همه این اجزای سیستم به طور مستقیم یا غیر مستقیم با یکدیگر در تعامل باشند. همچنین موانع اصلی در آنالیز شکست سیستم‌های پیچیده، نحوه نمایش اجزای سیستم و احتمالات اساسی و مشروط آنهاست، به طوری که، مدل‌های مارکوف روش مناسبی را برای حل این موانع ایجاد کرده اند. این مدل، ابزار مناسبی برای مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده که شامل زمانبندی[1]، ترتیب بندی[2]، تعمیر[3] و افزونگی[4] است می‌باشند، بنابراین، این مدل‌ها به طور گسترده برای تعیین قابلیت دسترسی[5] و قابلیت اطمینان[6] مورد استفاده قرار می‌گیرند (۳۰-۳۲). مطالعاتی توسط حکم آبادی (۴) و کریمی (۶) در ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری با استفاده از داده‌های میدانی، تحلیل آماری و شبیه‌سازی مونت کارلو انجام گرفت که در این مطالعات عدم استفاده از توزیع پسین برای برآورد نرخ شکست تجهیزات و عدم در نظر گرفتن نرخ تعمیر برای محاسبه قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی ایستگاه از محدودیت‌های این مطالعات می‌باشند.

در سیستم‌های قابل تعمیر و سیستم‌های پیچیده ای که در آن پدیده شکست با عدم قطعیت همراه است، فرآیند شکست را میتوان با استفاده از مدل زمان پیوسته زنجیره مارکوف (CTMC[7]) توصیف کرد. مدلهای مارکوف هم برای اجزای منفرد و هم برای سیستم‌هایی با اجزای چند گانه وابسته استفاده میشوند. همچنین به طور معمول، طول عمر تجهیزات دارای توزیع نمایی هستند و مدل‌های مارکوف نیز برای ارزیابی قابلیت اطمینان بر اساس تابع توزیع نمایی مناسب می‌باشند. همچنین مطالعات نشان داده اند که مدل زمان پیوسته زنجیره مارکوف می‌توان با روش ادغام و تجمیع، ساده سازی و کوچک سازی سیستم را انجام داده و راه حل دقیقی را برای ارزیابی قابلیت اطمینان تعیین کند (۳۳-۳۵).

پارامترهای عدم قطعیت معمولاً به عنوان متغیرهای تصادفی در مدل‌های قابلیت اطمینان وارد می‌شوند و توزیع آنها باید مشخص شود. معمولاً از داده‌های واقعی برای تخمین پارامترهای توزیع استفاده می‌شود. داده‌های واقعی بین شکست‌ها را می‌توان برای استنتاج پارامترهای مدل با استفاده از روش شبیه سازی مونت کارلو زنجیره ی مارکوف (MCMC[8]) استفاده کرد. این روش با تولید نمونه تصادفی از توزیع‌های آماری و با استفاده از روش‌های زنجیره مارکوف مونت کارلو امکان هر گونه استنباط آماری را فراهم می‌آورند و یک ابزار توانمند برای شبیه سازی سیستم‌های پیچیده و تعیین سطح اطمینان خروجی مدل‌های قابلیت اطمینان است که بر مبنای مدل‌های

1. timing
2. sequencing
3. repair
4. redundancy
5. availability
6. reliability
7. continuous-time Markov chain
8. Monte Carlo Markov chain

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]

احتمال و تولید اعداد تصادفی کار می‌کند. همچنین روش زنجیره مارکف مونت کارلو یک کلاس از الگوریتم‌ها برای نمونه‌برداری از یک توزیع احتمالی را تشکیل می‌دهند. با ساخت یک زنجیره مارکف که توزیع مطلوب را به عنوان توزیع تعادل خود دارد، می‌توان نمونه‌ای از توزیع مطلوب را با مشاهده زنجیره بعد از چند مرحله بدست آورد. هر چه گام‌های بیشتری وجود داشته باشد، توزیع نمونه با توزیع مطلوب واقعی مطابقت بیشتری خواهد داشت. معمولاً انتقال از یک گره‌ی زنجیره به گره‌ی دیگر با استفاده از روش‌های قدم زدن تصادفی صورت می‌گیرد (۳۴).

بنابراین، در مطالعه حاضر، یک رویکرد سیستماتیک جهت مدل مارکوف با استفاده از نرخ شکست شبیه سازی شده تجهیزات به منظور تحلیل قابلیت اطمینان ارائه گردید. در این رویکرد، نرخ شکست تجهیزات بر اساس روش MCMC تعیین و در ادامه نرخ شکست بخش‌ها و ایستگاه با استفاده از روش CTMC تعیین گردید.

روش کار

در این مطالعه، ابتدا بخش‌های ایستگاه *CGS* بر اساس مشورت با طراحان، سازندگان، مهندسان و کارشناسان شرکت گاز، چک کردن نقشه‌های عملیاتی از جمله *PFD* و *P&ID*و بازدید میدانی شناسایی گردید. با توجه به این که هدف مطالعه، ارزیابی قابلیت اطمینان سخت افزاری و بر اساس رویکرد سیستمی بود، لذا مهمترین پارامتر جهت ارزیابی قابلیت اطمینان، تعیین نرخ شکست و تعمیرات تجهیزات می‌باشد، بنابراین داده‌های مربوط به نرخ شکست و تعمیر تجهیزات بر اساس زمان شکست و تعمیر آن‌ها در محیط واقعی و عملیاتی و از بخش‌های تعمیر و نگهداری و ابزار دقیق شرکت گاز جمع آوری گردید. سپس بر اساس رفرنس‌های موجود (۱۱، ۱۲، ۳۷-۳۶)، تابع توزیع چگالی احتمال شکست تجهیزات هر بخش، تابع نمایی تعیین گردید. سپس نرخ شکست و تعمیر تجهیزات ایستگاه بر اساس زمان‌های شکست و تعمیر تجهیزات و با استفاده از روش شبیه سازی *MCMC* توسط نرم افزار *WinBUGS14* محاسبه و قابلیت اطمینان بخش‌ها و ایستگاه CGS توسط روش *CTMC* مورد ارزیابی قرار گرفت. به طوری که توالی مراحل جهت ارزیابی سیستم‌ها و قابلیت اطمینان ایستگاه CGS در شکل ۱ نشان داده شده است.

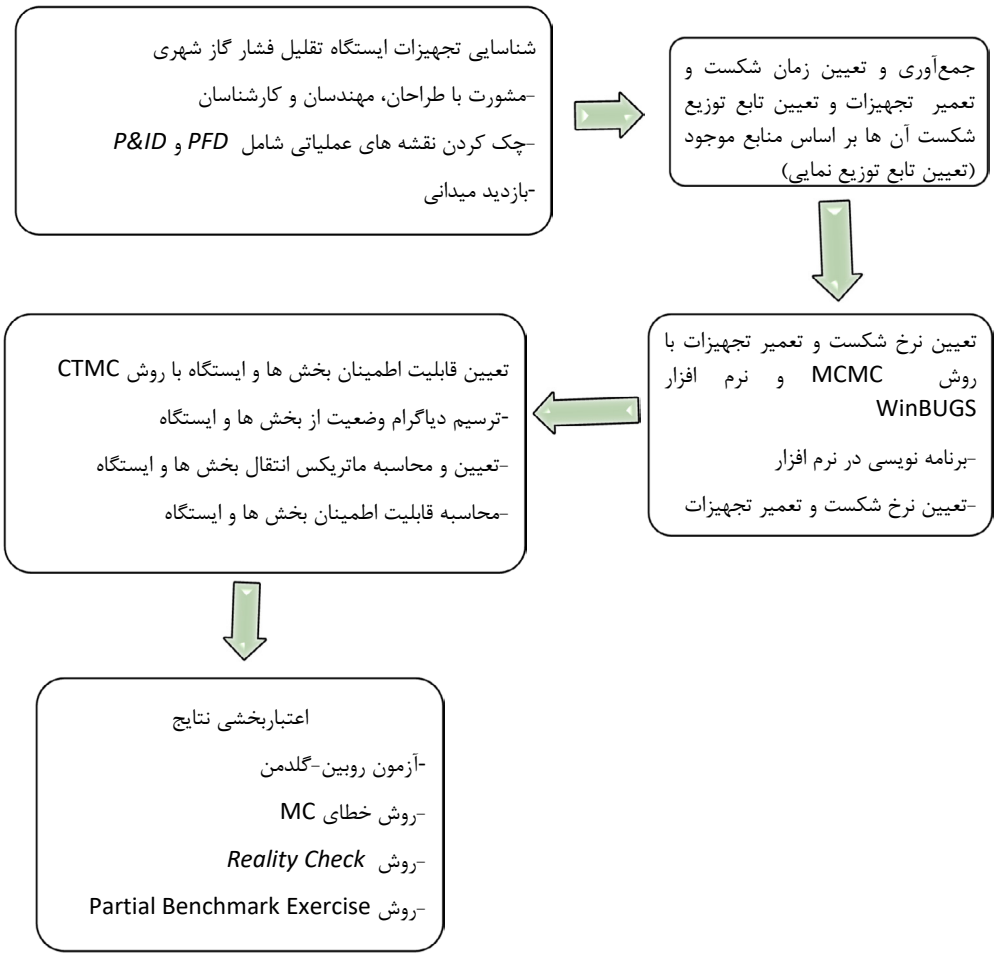
تولید نمونه‌های تصادفی از توزیع‌های آماری از طریق زنجیره مارکوف به روش‌های مختلفی قابل انجام می‌باشد که می‌توان به روش‌های متروپولیس-هاستینگز، نمونه گیری برشی، متروپلیس چندباره، جهش برگشت‌پذیر و گیبز اشاره نمود. با توجه به این که در بین این روش‌ها، روش گیبز از همه شناخته تر بوده و دارای نرخ پذیرش یک می‌باشد و با توجه به محدودتر و ساده تر بودن آن، این روش به عنوان روش موردنظر برای شبیه سازی انتخاب گردید همچنین یکی از نرم افزارهایی که با نمونه گیری گیبز، نمونه‌های تصادفی ایجاد می‌کند نرم افزار *WinBUGS14* بود که در این مطالعه از آن برای شبیه سازی استفاده گردید. این نرم افزار توزیع‌های شرطی کامل را محاسبه نموده و مبتنی بر تکنیک‌های نمونه گیری مناسب، نمونه‌های تصادفی را از توزیع‌های پسین پارامتر تولید می‌کند (۴۲-۳۸). مراحل تعیین نرخ شکست تجهیزات با نرم افزار *WinBUGS14* بر اساس مراحل شکل ۲ انجام گرفت.

برای یک سیستم معین، مدل مارکوف شامل فهرستی از حالتهای ممکن، مسیرهای انتقال ممکن بین این حالتها و پارامترهای نرخ (نرخ شکست و نرخ تعمیر) این انتقال‌ها است. هنگام نمایش گرافیکی مدل مارکوف، هر حالت معمولاً به صورت دایره ای با فلش‌هایی که مسیر انتقال بین حالت‌ها را نشان می‌دهد، نمایش داده می‌شود، همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است.

در شکل ۳، λ (نرخ شکست) پارامتر نرخ انتقال از حالت ۰ به حالت ۱ را نشان می‌دهد، و μ (نرخ تعمیر) پارامتر نرخ انتقال از حالت ۱ به حالت ۰ را نشان می‌دهد.

$P_j(t)$ نشان دهنده احتمال قرار گرفتن سیستم در حالت j در زمان t است. معمولاً فرض بر این است که دستگاه در زمان اولیه $t=0$ در حالت عادی قرار دارد و بنابراین احتمالات اولیه دو حالت($P_0(0) = 1$ و $P_1(0) = 0$) است. پس از آن، احتمال حالت ۰ با نرخ ثابت λ کاهش

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]



شکل ۱: رویکرد پیشنهادی برای تحلیل قابلیت اطمینان بخش‌ها و ایستگاه CGS با استفاده از MCMC و CTMC

می‌یابد، به این معنی که اگر سیستم در هر زمان معین در حالت ۰ باشد، احتمال انتقال به حالت ۱ در طول افزایش زمان بعدی dt است λdt.

به طور مشابه، اگر سیستم در حالت ۱ باشد، احتمال انتقال به حالت ۰ در طول افزایش زمان بعدی dt برابر μdt است. بنابراین، تغییر افزایشی P_0 با مجموع حاصل ضرب P_0 و λdt و حاصل ضرب P_1 و μdt به صورت رابطه ۱ بیان می‌شود:

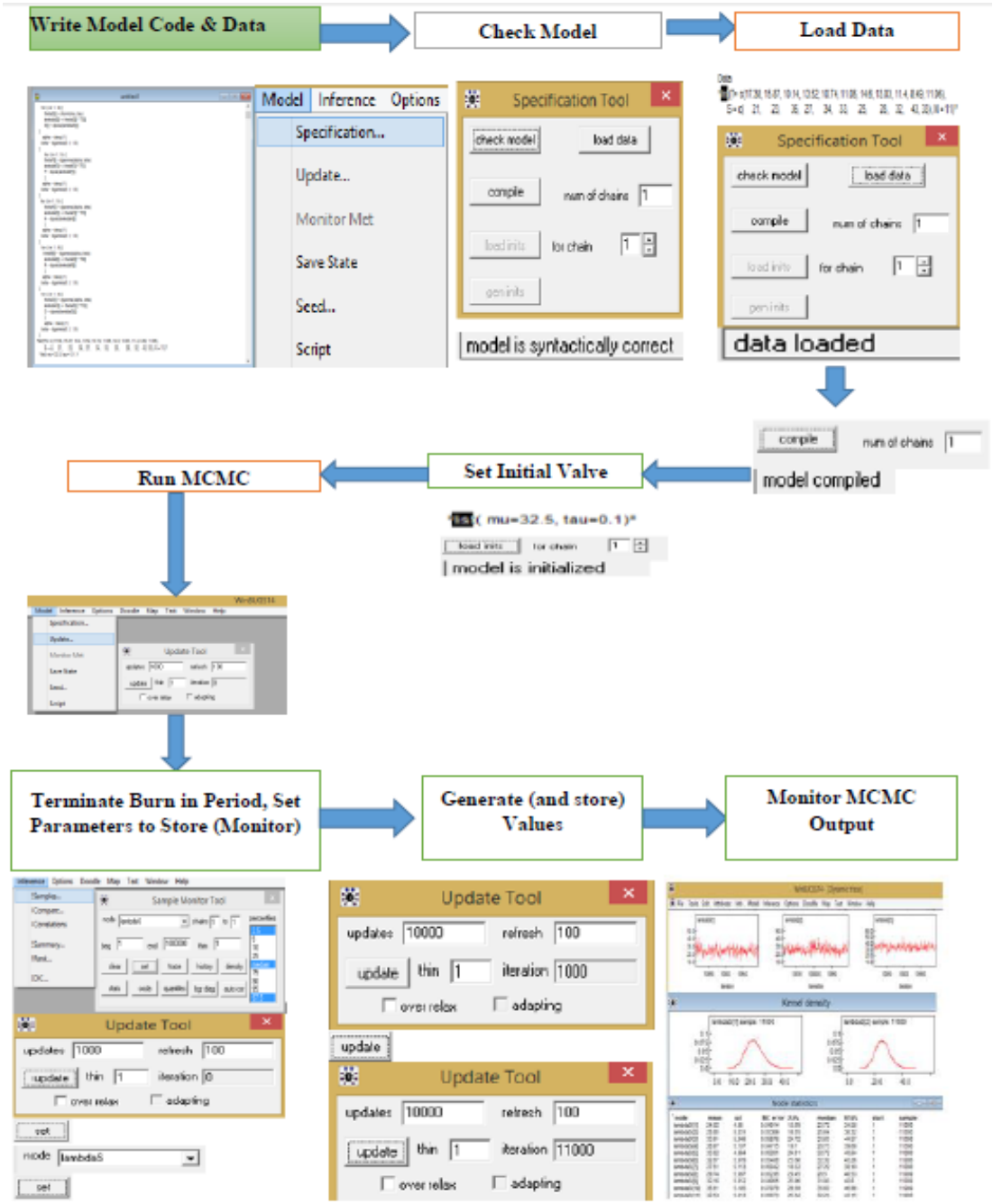
$$dP_0(t) = -P_0(t)\lambda dt + P_1(t)\mu dt \qquad (۱)$$

برای سیستم، معادلات را می‌توان به صورت ماتریسی بیان کرد. هر گاه $\propto$ نمایانگر بردار احتمالات حدی و P ماتریس احتمالات تغییر حالت اتفاقی باشد، در این صورت رابطه ۲ برقرار است.

$$\propto P = 0 \qquad (۲)$$

محاسبه قابلیت اطمینان بخش‌ها و ایستگاه به روش $CTMC$ ، مبتنی بر اصول فرآیندهای احتمالی که مبتنی بر اصول ریاضی است، استفاده شده است. بر اساس این روش، اگر فضای حالت دارای n رویداد مستقل باشد، احتمال وقوع یک سری از n رویداد متوالی در رابطه شماره ۳ زیر نشان داده می‌شود:

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]



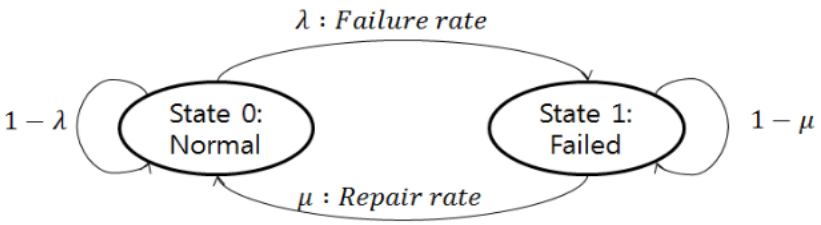
شکل ۲: مراحل تعیین نرخ شکست تجهیزات بر اساس با نرم افزار WinBUGS14

$$P(E_{j1}.E_{j2} \dots .E_{jn}) = P_{j_1}P_{j_2} \dots P_{j_n} \quad (۳)$$

مارکوف این فرض را به حالتی تعمیم می‌دهد که خروجی هر رویداد مستقیماً به خروجی رویداد قبلی وابسته باشد. در این حالت تعمیم‌یافته، احتمال شرطی Pij مرتبط با وقوع شرطی یک جفت خروجی یا حالت به شکل $(E_i.E_j)$ است و در رابطه ۴ تعریف می‌شود:

$$P_{ij} = P\{X_{n+1} = E_j I X_n = E_i\} \quad (۴)$$

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]



شکل ۳: مدل ساده مارکوف

$n = 0و1و2و \ldots$

فضای حالت θ برای تعریف فرآیند $X(t).t\geq 0$ استفاده می‌شود، به این معنی که فضای θ فضای تمام مقادیر ممکن X است که متغیر تصادفی $X(t)$ می‌تواند اختیار کند. در این فضا، E یکی از رویدادهای زیرمجموعه فضای θ $(E\subset\theta)$ است، اگر فضای حالت کاملاً از رویدادهایی تشکیل شده باشد که هیچ وجه مشترکی با یکدیگر ندارند و مکمل یکدیگر هستند، یعنی اجتماع همه آنها فضای حالت است، با استفاده از قوانین به احتمال زیاد، رابطه‌های ۵ و ۶ زیر برقرار خواهند بود.

$$[0 \leq P(E_i) \leq 1] \quad (۵)$$

$$P\left\{\sum_{i=0}^{N_{max}} E_i\right\} = \sum_{i=0}^{N_{max}} P(E_i) = 1 \quad (۶)$$

سیستمی را در نظر بگیرید که یا در حال کار یا شکست است. اگر دستگاه در زمان t در حال کار باشد $X(t)=1$ و اگر شکست باشد $X(t)=0$ در این صورت متغیر تصادفی X زمان گسسته نیست زیرا پس از ورود به حالتی برای یک مدت زمانی که خود متغیری تصادفی است، در آنجا می‌ماند و سپس به حالت دیگری منتقل می‌شود، این قبیل فرایندها را زنجیره مارکوف زمان پیوسته می‌نامند. یک زنجیره پیوسته مارکوف توسط یک فضای متناهی یا شمارا، یک ماتریس نرخ انتقال Q با ابعادی برابر با فضای حالت است. برای $i \neq j$، هر عنصر qij غیرمنفی است و نرخ انتقال فرایند را از حالت i به حالت j توصیف می‌کند. سه تعریف برای فرایندهای مارکوف زمان پیوسته وجود دارد:

احتمال انتقال، برای هر مقدار $n=0,1,2,\ldots$ و زمان‌های $t_0,t_1,t_2,\ldots$ با حالات $i_0,i_1,i_2,\ldots$ رابطه ۷ را داریم:

$$P_r\left(X_{n+1} = i_{n+1} \middle| X_{t_0} = i_0 و X_{t_1} = i_1 و \ldots و X_{t_n} = i_n\right) = p_{i_n i_{n+1}}(t_{n+1} - t_n) \quad (۷)$$

که در آن pij در دو مجموعه معادلات دیفرانسیلی به نام‌های معادلات پیشرو کولموگروف و معادلات پسرو کولموگروف صدق می‌کنند.

اگر متغیر تصادفی وضعیت زنجیره در لحظه t با Xt نشان داده شود و فرض شود زنجیره در زمان t در حالت i قرار دارد با توجه به این که $Xt=i$ و $Xt+h$ به مقادیر گذشته وابسته نیستند، هنگامی که h به سمت صفر میل می‌کند برای هر j و t رابطه ۸ را داریم:

$$P_r(X(t+h) = j|X(i) = i) = \delta_{ij} + q_{ij}h + o(h) \quad (۸)$$

که در این رابطه δ_{ij} دلتای کرونر است و همچنین از نماد o کوچک استفاده شده است q_{ij} می‌تواند معیاری از سرعت تغییر حالت از i به j باشد (۴۷-۴۳).

این مطالعه در دو مرحله اعتبار سنجی داده‌های بدست آمده را بررسی می‌کند که عبارتند از:

الف) به منظور اعتبار سنجی داده‌های محاسبه شده در شبیه سازی با نرم افزار *WinBUGS14* از پارامترهایی همچون خطای مونت کارلو[1] و آزمون گلمن-رابین[2]

1. MC Error
2. Goleman-Robin test

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]

استفاده گردید(۳۸-۴۲). در خطای مونت کارلو، برآورد خطای استاندارد میانگین نمونه ای محسوب می‌شود و میزان پیشنهادی آن کمتر از ۰٫۰۱ می‌باشد به طوری که هر چه مقادیر خطای مونت کارلو کوچک تر باشد نشان دهنده همگرایی به توزیع پسین پارامترهای می‌باشد و در آزمون گلمن-رابین، زمانیکه خروجی شبیه سازی در قالب چند زنجیر موازی تولید شود، این گزینه فعال شده و مقدار آماره آزمون گلمن-رابین را به همراه یک خروجی گرافیک گزارش می‌کند. با توجه به نزدیک بودن خطوط بهم نشاندهنده همگرایی داده‌های تولید شده می‌باشد. این آزمون واریانس درون زنجیره ای و واریانس بین زنجیره ای را مقایسه و ترکیب می‌کند به طوری که اگر زنجیره‌های تعریف شده به توزیع پسین یکسان همگرا شوند، تغییرپذیری بین زنجیره ای آن کمتر از تغییرپذیری درون زنجیره ای خواهد بود. پیشنهاد می‌گردد مقادیر آزمون گلمن-رابین کمتر از ۱٫۲ باشد که نشان دهنده همگرایی زنجیره‌ها می‌باشد.

در اعتبار سنجی رویکرد پیشنهادی مدل مارکوف، روش‌های مختلفی برای اعتبار سنجی مدل‌ها در حوزه ایمنی و قابلیت اطمینان وجود دارد که می‌توان از یک یا چند مورد از این روش‌ها برای اعتبار سنجی رویکرد پیشنهادی استفاده کرد. نتایج ارزیابی قابلیت اطمینان ایستگاه با روش‌های *Reality Check* و *Partial Benchmark Exercise* اعتبار بخشی گردید. به طوری که Reality Check در یک ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری و بر اساس داده‌های میدانی انجام گرفت. به طوری که ارزیابی قابلیت اطمینان ایستگاه بر اساس رویکرد پیشنهادی و روش دیاگرام بلوکی بر اساس نرخ شکست محاسبه و همبستگی نتایج آن‌ها ارزیابی گردید و از Partial Benchmark Exercise برای مقایسه نتایج یک مطالعه مشابه که در سال ۲۰۱۹ انجام گرفته بود (۳۶) با نتایج رویکرد پیشنهادی انجام گرفت (انجام رویکرد پیشنهادی بر اساس ساختاری بود که این مقاله آن را ارائه داده بود).

یافته ها

وظیفه اصلی ایستگاه CGS، تقلیل فشار گاز برای تطبیق آن با مصارف بعدی است. این ایستگاه به دلیل میزان کاهش فشار گاز (فشار ورودی به خروجی) و ظرفیت آن، جزئیات فیزیکی و هندسی خاصی در اجزای خود دارد. با این حال، به طور کلی، همه این ایستگاه‌ها از نظر ظاهر و نوع اجزا یکسان هستند که شامل بخش‌های اصلی به شرح ذیل است:

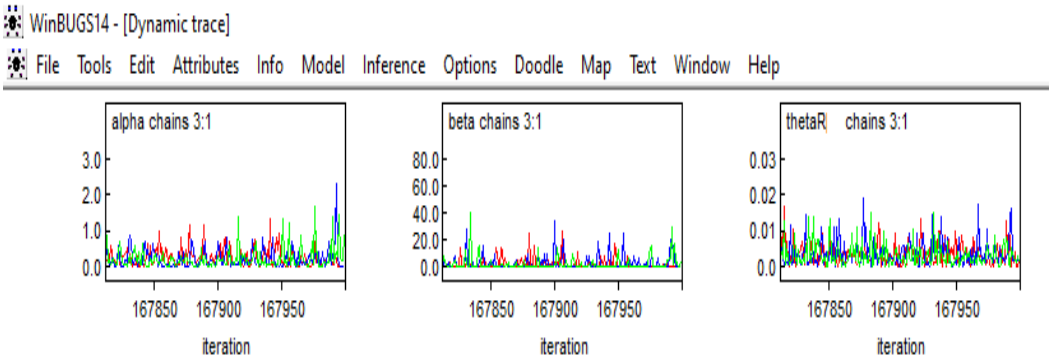
- بخش فیلتراسیون
- بخش گرمکن
- بخش تقلیل فشار
- بخش بودارکننده

شبیه سازی در کلیه تجهیزات ایستگاه با نرم افزار WinBUGS14 انجام گرفت که نمونه ای از نتایج شبیه‌سازی برای تجهیز رگلاتور در جدول ۱ و شکل‌های۴ و ۵ نشان داده شده است. در این خروجی نتایج استنباط‌های پسین برای سه پارامتر داده شده است. با فرض این که تابع زیان، مربع خطا باشد، در این صورت مقادیر ستون میانگین را می‌توان به عنوان برآورد بیزین پارامترها گزارش داد. بر مبنای ۵۰۴۰۰۳ نمونه پسین برآورد بیزین پارامتر آلفا، بتا و نرخ شکست رگلاتور بترتیب برابر ۰٫۲۳۶، ۲٫۳۵۷ و ۰٫۰۰۳۵۲۳ شکست در سال هستند. انحراف معیار نمونه‌های پسین آلفا، بتا و نرخ شکست رگلاتور بترتیب برابر ۰٫۲۳۰۶، ۲٫۲۳۵ و ۰٫۰۰۳۲۳۲ شکست در سال هستند. خطای معیار نمونه‌های پسین هر سه پارامتر کمتر از ۰٫۰۱ می‌باشد که نشاندهنده این است که داده‌ها از همگرایی خوبی برای توزیع پسین پارامترها برخوردار می‌باشند. اگر تابع زیان، قدر مطلق خطا باشد در این صورت مقادیر در ستون میانه را می‌توان به عنوان برآوردهای بیزین پارامترها گزارش داد. فاصله بین مقادیر ستون‌های صدک ۲٫۵ و ۹۷٫۵ برای هر پارامتر را می‌توان به عنوان فاصله اطمینان بیزین ۹۵ درصدی برای پارامتر مذکور در نظر گرفت. بر اساس نتایج فاصله اطمینان ۹۵ درصدی برای

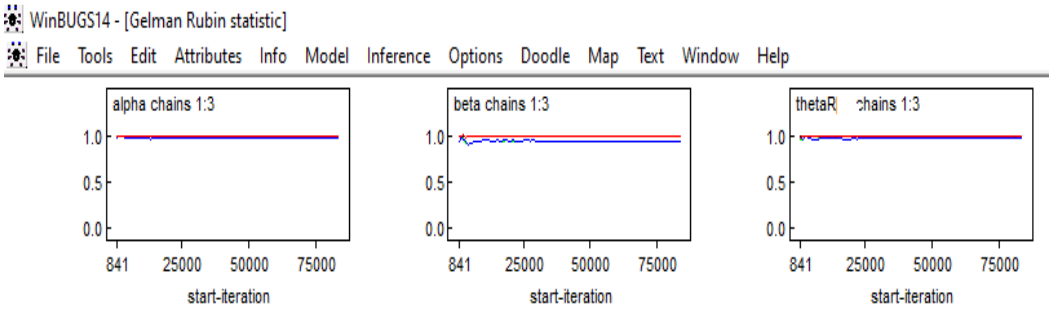
[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]

جدول ۱: نتایج پارامترهای تجهیز رگلاتور بر اساس شبیه سازی انجام شده با نرم افزار WinBUGS14

پارامتر	انحراف معیار± میانگین	خطای مونت کارلو	صدک ۲.۵	میانه	صدک ۹۷.۵	تعداد نمونه
آلفا	۰.۲۳۶±۰.۲۳۰۶	۰.۰۰۰۴۷۳۱	۰.۰۱۳۰۹	۰.۱۶۶۶	۰.۸۵۲۷	۵۰۴۰۰۳
بتا	۲.۳۵۷±۲.۲۳۵	۰.۰۰۹۲۶۲	۰.۰۶۹۳	۰.۱۴۷۶	۱۸	۵۰۴۰۰۳
نرخ شکست	۰.۰۰۳۵۲۳±۰.۰۰۳۲۳۲	۰.۰۰۰۰۰۴۷۲۸	۰.۰۰۰۱۳۷۳	۰.۰۰۲۶۰۱	۰.۰۱۲۰۵	۵۰۴۰۰۳



شکل ۴: نتایج ردیابی نرخ شکست تجهیز رگلاتور بر اساس شبیه سازی انجام شده با نرم افزار WinBUGS14



شکل ۵: نتایج آزمون گلمن رابین برای نرخ شکست تجهیز رگلاتور بر اساس شبیه سازی انجام شده با نرم افزار WinBUGS14

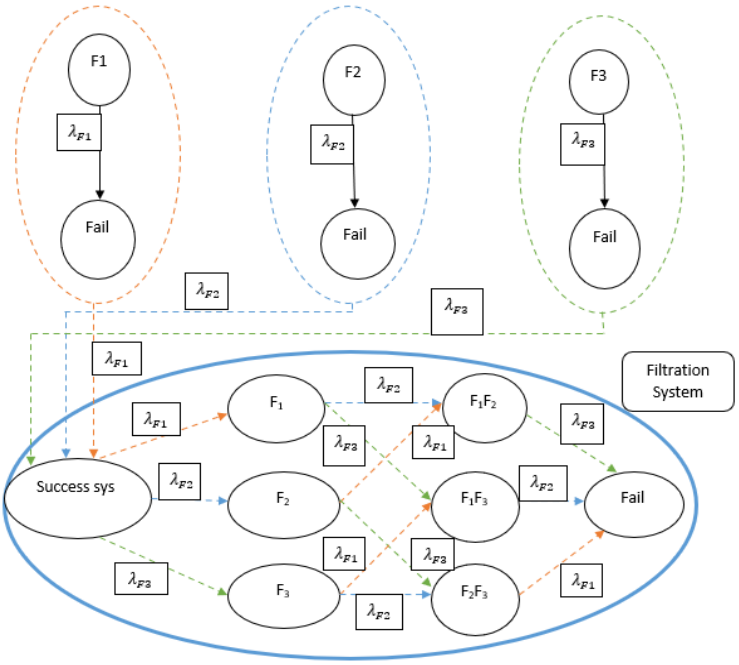
پارامتر نرخ شکست زیرسیستم رگلاتور از ۰,۰۰۰۱۳۷۳ تا ۰,۰۱۲۰۵ شکست در سال می‌باشد (جدول ۱). شکل۳ نمودارهایی با آمیختگی بالا با نوساناتی حول یک محور بدون تناوب نشان می‌دهد که نشان از وضعیت خوب زنجیره‌های تعیین شده می‌باشد. شکل ۴ نتایج مربوط به آزمون گلمن-رابین مربوط به سه پارامتر را نشان می‌دهد و با توجه به این که مقادیر تست کمتر از ۱,۲ می‌باشد، لذا همگرایی زنجیره‌ها مناسب می‌باشد و می‌توان به نتایج پسین بدست آمده از شبیه سازی اطمینان داشت.

برای ساخت رویکرد سیستماتیک ارزیابی قابلیت اطمینان ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز شهری بر اساس مدل مارکوف، ابتدا باید مدل‌های مارکوف را برای بخش‌های آن ایجاد کرد. با توجه به این که ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز شهری از چهار بخش فیلتراسیون، گرمکن، تقلیل فشار و بودار کننده تشکیل یافته است، لذا رویکرد سیستماتیک بخش‌ها به صورت زیر تعیین گردید.

۱)رویکرد سیستماتیک برای بخش فیلتراسیون بر اساس مدل مارکوف: به طور معمول، زیربخش‌های شناسایی شده یک بخش فیلتراسیون شامل سه زیربخش F_1، F_2 و F_3 می‌باشد، که رویکرد سیستماتیک ارزیابی قابلیت اطمینان آن بر اساس مدل مارکوف به صورت شکل ۶ تعیین گردید.

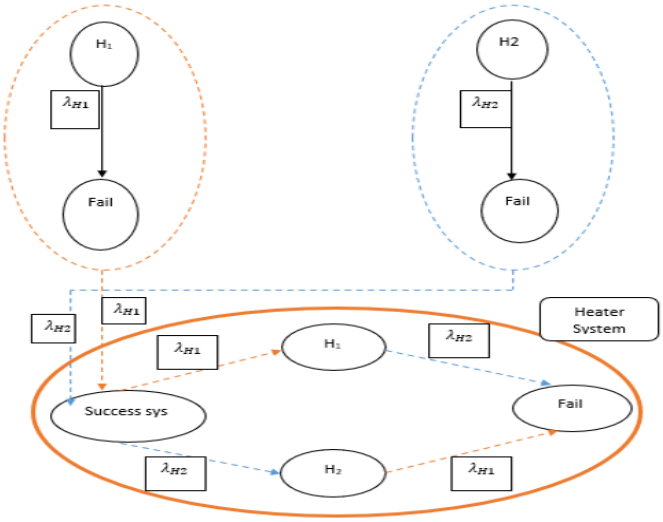
۲)رویکرد سیستماتیک برای بخش هیتر بر اساس مدل مارکوف: به طور معمول، زیربخش‌های شناسایی

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]



Success sys: موفقیت هر سه زیربخش فیلتر، F_1: زیربخش فیلتر 1، F_2: زیربخش فیلتر 2، F_3: زیربخش فیلتر 3، λ_{F1} : نرخ شکست زیربخش فیلتر 1، λ_{F2} : نرخ شکست زیربخش فیلتر 2، λ_{F3} : نرخ شکست زیربخش فیلتر 3، *Fail*: شکست هر سه زیربخش فیلتر

شکل ۶: رویکرد سیستماتیک برای بخش فیلتراسیون بر اساس مدل مارکوف



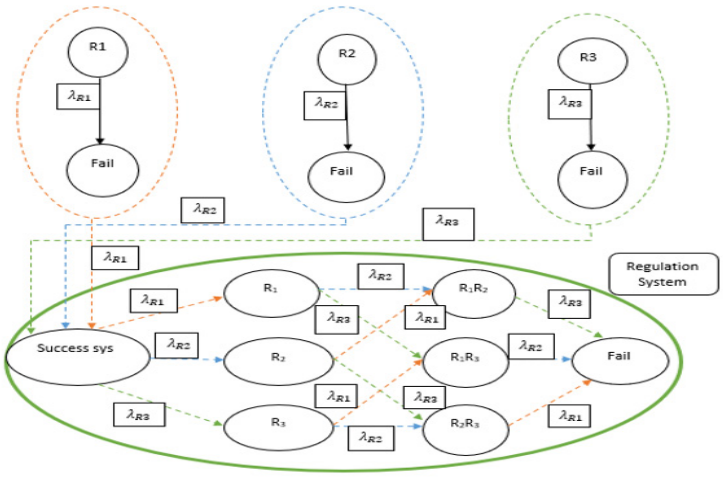
Success sys: موفقیت هر دو زیربخش هیتر، H_1: زیربخش هیتر 1، H_2: زیربخش هیتر 2، λ_{H1} : نرخ شکست زیربخش هیتر 1، λ_{H2} : نرخ شکست زیربخش هیتر 2، *Fail*: شکست هر دو زیربخش هیتر

شکل ۷: رویکرد سیستماتیک برای بخش گرمکن بر اساس مدل مارکوف

شده یک بخش هیتر شامل دو زیربخش H_1 و H_2 می‌باشد، که رویکرد سیستماتیک ارزیابی قابلیت اطمینان آن بر اساس مدل مارکوف به صورت شکل ۷ می‌باشد.

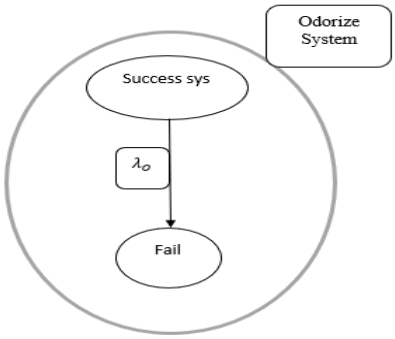
۳)رویکرد سیستماتیک برای بخش تقلیل فشار بر اساس مدل مارکوف: به طور معمول، زیر بخش‌های شناسایی شده یک بخش تقلیل فشار شامل سه زیربخش

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]



Success sys: موفقیت هر سه زیربخش رگلاتور، R_1: زیربخش رگلاتور 1، R_2: زیربخش رگلاتور 2، R_3: زیربخش رگلاتور 3، λ_{R1} : نرخ شکست زیربخش رگلاتور 1، λ_{R2} : نرخ شکست زیربخش رگلاتور 2، λ_{R3} : نرخ شکست زیربخش رگلاتور 3، *Fail*: شکست هر سه زیربخش رگلاتور

شکل۸: رویکرد سیستماتیک برای بخش تقلیل فشار بر اساس مدل مارکوف



Success sys: موفقیت زیر سیستم بودار کننده، λ_O : نرخ شکست زیر سیستم بودار کننده، *Fail*: شکست زیر سیستم بودار کننده

شکل۹: رویکرد سیستماتیک قابلیت اطمینان سیستم بودار کننده بر اساس مدل مارکوف

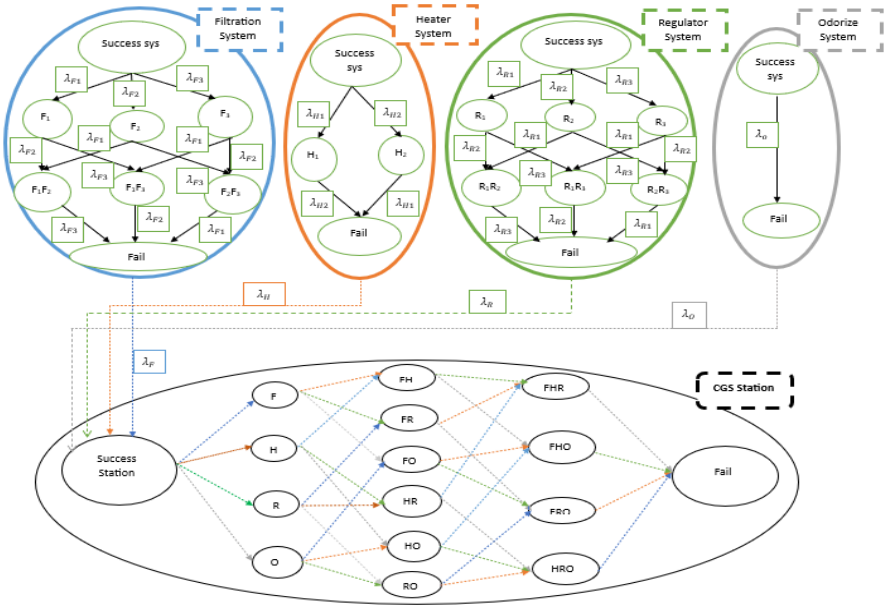
R_1، R_2 و R_3 می‌باشد، که رویکرد سیستماتیک ارزیابی قابلیت اطمینان آن بر اساس مدل مارکوف به صورت شکل ۸ می‌باشد.

۴) رویکرد سیستماتیک برای بخش بودار کننده بر اساس مدل مارکوف: با توجه به این که در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز شهری فقط یک زیربخش بودار کننده وجود دارد، لذا رویکرد سیستماتیک بخش بودار کننده به صورت شکل ۹ می‌باشد.

۵) رویکرد سیستماتیک برای ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری بر اساس مدل مارکوف: با توجه به این که ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری CGS یک ایستگاه قابل تعمیر شامل چهار بخش غیر متناظر فیلتراسیون، گرمکن، تقلیل فشار و بودارکننده می‌باشد، لذا رویکرد سیستماتیک ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری CGS بر اساس مدل مارکوف به صورت شکل ۱۰ می‌باشد.

با توجه به این که بخش‌های فیلتراسیون، هیتر، تقلیل فشار و بودار کننده در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز شهری به صورت سری می‌باشند، به نحوی که عملکرد همه آن‌ها

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]



Success Station: موفقیت هر چهار بخش ایستگاه، F: شکست بخش فیلتراسیون، H: شکست بخش گرمکن، R: شکست بخش تقلیل فشار، O: شکست بخش بودار کننده، λ_F : نرخ شکست بخش فیلتراسیون، λ_H : نرخ شکست سیستم گرمکن، λ_R : نرخ شکست بخش تقلیل فشار، λ_O : نرخ شکست بخش بودار کننده، Fail: شکست هر چهار بخش ایستگاه

شکل ۱۰: رویکرد سیستماتیک برای ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری بر اساس مدل مارکوف

برای موفقیت ایستگاه ضرورت است، لذا قابلیت اطمینان ایستگاه بر اساس رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$R_{sys} = P_{Success\ sys} = e^{-(\lambda_F+\lambda_H+\lambda_R+\lambda_O)t} \quad (۸)$$

λ_F : نرخ شکست بخش فیلتراسیون

λ_H : نرخ شکست بخش گرمکن

λ_R : نرخ شکست بخش تقلیل فشار

λ_O : نرخ شکست بخش بودار کننده

t: زمان

نرخ شکست تجهیزات و زیرسیستم‌های ایستگاه بر اساس زمان شکست تجهیزات بر اساس شبیه سازی تعیین گردید، همچنین قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها، سیستم‌ها و ایستگاه بر اساس روش CTMC در سال‌های مختلف محاسبه گردید، به طوری که بیشترین و کمترین میزان قابلیت اطمینان ایستگاه بترتیب مربوط به سیستم‌های بودار کننده و تقلیل فشار (رگلاتور) بود که نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

اعتبارسنجی نتایج روش CTMC با مقایسه آن با داده‌ها با استفاده از روش نمودار بلوکی انجام شد. قابلیت اطمینان ایستگاه بر اساس نرخ شکست بخش‌ها و بر اساس چیدمان و توزیع نمایی آنها با روش دیاگرام بلوکی، که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که بین نتایج محاسبه شده بر اساس روش CTMC و روش نمودار بلوکی همبستگی قوی (R^2=0.9499) وجود دارد (نمودار ۱).

همچنین روش Partial Benchmark Exercise برای اعتبار سنجی رویکرد پیشنهادی استفاده گردید، اگرچه یافتن مطالعه مشابه دشوار بود با این وجود مطالعه ای که در سال ۲۰۱۹ انجام گرفته بود و تا حدودی با این مطالعه مشابهت داشت انتخاب گردید و نتایج بدست آمده بر اساس این رویکرد با نتایج مطالعه موردنظر مقایسه گردید. میزان قابلیت اطمینان ایستگاه در مطالعه موردنظر (۳۶) که با استفاده از شبکه بیزین و بر اساس داده‌های شکل ۱۱ و جدول ۴ انجام شده بود برابر۰,۹۷۴۳ بود. بر اساس

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]

جدول ۲: پارامترهای نرخ شکست و قابلیت اطمینان سیستم‌ها و ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری در سال‌های مختلف

سال	زیر سیستم	نرخ شکست	قابلیت اطمینان زیرسیستم	قابلیت اطمینان سیستم	قابلیت اطمینان ایستگاه
۱۳۹۰	فیلتراسیون خط ۱	۰.۰۴۸۳۶	۰.۹۵۲۸	۰.۹۹۲	۰.۹۷۶۵
	فیلتراسیون خط ۲	۰.۰۵۳۰۳	۰.۹۴۸۳		
	فیلتراسیون خط ۳	۰.۰۵۳۰۳	۰.۹۴۸۳		
	هیتر ۱	۰.۰۰۳۶	۰.۹۹۶۴	۰.۹۹۵	
	هیتر ۲	۰.۰۰۳۶	۰.۹۹۶۴		
	تقلیل فشار خط ۱	۰.۰۰۴۱	۰.۹۹۵۹	۰.۹۹۰	
	تقلیل فشار خط ۲	۰.۰۰۴۲	۰.۹۹۵۸		
	تقلیل فشار خط ۳	۰.۰۰۳۹	۰.۹۹۶۱		
	بودار کننده	۰.۰۰۳۸	۰.۹۹۶۲	۰.۹۹۶	
۱۳۹۱	فیلتراسیون خط ۱	۰.۰۲۸۳	۰.۹۷۲۱	۰.۹۹۸	۰.۹۸۶۵
	فیلتراسیون خط ۲	۰.۰۵۳	۰.۹۴۸۳		
	فیلتراسیون خط ۳	۰.۰۵۴	۰.۹۴۷۴		
	هیتر ۱	۰.۰۰۳۶	۰.۹۹۶۴	۰.۹۹۹	
	هیتر ۲	۰.۰۱۲	۰.۹۸۸		
	تقلیل فشار خط ۱	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶	۰.۹۹۱	
	تقلیل فشار خط ۲	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶		
	تقلیل فشار خط ۳	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶		
	بودار کننده	۰.۰۰۳۸	۰.۹۹۶۲	۰.۹۹۶	
۱۳۹۲	فیلتراسیون خط ۱	۰.۱۵۹	۰.۸۵۳	۰.۹۹۸	۰.۹۸۸۶
	فیلتراسیون خط ۲	۰.۰۹۹	۰.۹۰۶		
	فیلتراسیون خط ۳	۰.۰۱۳۱	۰.۸۷۷		
	هیتر ۱	۰.۰۰۳۶	۰.۹۹۶۴	۰.۹۹۹	
	هیتر ۲	۰.۰۰۳۶	۰.۹۹۶۴		
	تقلیل فشار خط ۱	۰.۰۲۴	۰.۹۷۶	۰.۹۹۱	
	تقلیل فشار خط ۲	۰.۰۲۴	۰.۹۷۶		
	تقلیل فشار خط ۳	۰.۰۱۲	۰.۹۸۸		
	بودار کننده	۰.۰۰۳۸	۰.۹۹۶	۰.۹۹۶	
۱۳۹۳	فیلتراسیون خط ۱	۰.۰۷۶	۰.۹۲۷	۰.۹۹۸	۰.۹۹۳۷
	فیلتراسیون خط ۲	۰.۰۷۶	۰.۹۲۷		
	فیلتراسیون خط ۳	۰.۰۷۶	۰.۹۲۷		
	هیتر ۱	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶	۰.۹۹۹	
	هیتر ۲	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶		
	تقلیل فشار خط ۱	۰.۰۲۴	۰.۹۷۶	۰.۹۹۹	
	تقلیل فشار خط ۲	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶		
	تقلیل فشار خط ۳	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶		
	بودار کننده	۰.۰۰۳۸	۰.۹۹۶	۰.۹۹۶	
۱۳۹۴	فیلتراسیون خط ۱	۰.۰۹۷	۰.۹۰۷۵	۰.۹۹۹۶	۰.۹۹۳۷
	فیلتراسیون خط ۲	۰.۰۷۵	۰.۹۲۵		
	فیلتراسیون خط ۳	۰.۱۰	۰.۹۰		
	هیتر ۱	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶	۰.۹۹۹۸	
	هیتر ۲	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶		
	تقلیل فشار خط ۱	۰.۰۲۴	۰.۹۷۶	۰.۹۹۹۹	

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]

ادامه جدول ۲: پارامترهای نرخ شکست و قابلیت اطمینان سیستم‌ها و ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری در سال‌های مختلف

سال	زیر سیستم	نرخ شکست	قابلیت اطمینان زیرسیستم	قابلیت اطمینان سیستم	قابلیت اطمینان ایستگاه
	تقلیل فشار خط ۲	۰.۰۲۴	۰.۹۷۶		
	تقلیل فشار خط ۳	۰.۰۲۴	۰.۹۷۶		
	بودار کننده	۰.۰۱۲	۰.۹۸۸	۰.۹۹۶۲	
۱۳۹۵	فیلتراسیون خط ۱	۰.۰۷۵	۰.۹۲۵	۰.۹۹۹۶	۰.۹۸۰۸
	فیلتراسیون خط ۲	۰.۰۷۵	۰.۹۲۵		
	فیلتراسیون خط ۳	۰.۰۷۵	۰.۹۲۵		
	هیتر ۱	۰.۰۱۲	۰.۹۸۸	۰.۹۸۹	
	هیتر ۲	۰.۰۱۲	۰.۹۸۸		
	تقلیل فشار خط ۱	۰.۰۲۴	۰.۹۷۶	۰.۹۹۹	
	تقلیل فشار خط ۲	۰.۰۲۴	۰.۹۷۶		
	تقلیل فشار خط ۳	۰.۰۲۴	۰.۹۷۶		
	بودار کننده	۰.۰۱۲	۰.۹۸۸	۰.۹۸۸	
۱۳۹۶	فیلتراسیون خط ۱	۰.۰۵۴	۰.۹۴۷۴	۰.۹۹۹۸	۰.۹۹۱۵
	فیلتراسیون خط ۲	۰.۰۵۴	۰.۹۴۷۴		
	فیلتراسیون خط ۳	۰.۰۵۴	۰.۹۴۷۴		
	هیتر ۱	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶	۰.۹۹۶	
	هیتر ۲	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶		
	تقلیل فشار خط ۱	۰.۰۱۳۱	۰.۸۷۷	۰.۹۹۹	
	تقلیل فشار خط ۲	۰.۰۲۴	۰.۹۷۶		
	تقلیل فشار خط ۳	۰.۰۲۴	۰.۹۷۶		
	بودار کننده	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶	۰.۹۹۶	
۱۳۹۷	فیلتراسیون خط ۱	۰.۰۷۵	۰.۹۲۵	۰.۹۹۹۶	۰.۹۹۱۶
	فیلتراسیون خط ۲	۰.۰۷۵	۰.۹۲۵		
	فیلتراسیون خط ۳	۰.۰۷۵	۰.۹۲۵		
	هیتر ۱	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶	۰.۹۹۶۴	
	هیتر ۲	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶		
	تقلیل فشار خط ۱	۰.۰۱۳۱	۰.۸۷۷	۰.۹۹۹۹	
	تقلیل فشار خط ۲	۰.۰۱۳۱	۰.۸۷۷		
	تقلیل فشار خط ۳	۰.۰۱۳۱	۰.۸۷۷		
	بودار کننده	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶	۰.۹۹۶۲	
۱۳۹۸	فیلتراسیون خط ۱	۰.۱۳	۰.۸۷	۰.۹۹۹۱	۰.۹۸۵۳
	فیلتراسیون خط ۲	۰.۱۳	۰.۸۷		
	فیلتراسیون خط ۳	۰.۰۵۴۰	۰.۹۴۷		
	هیتر ۱	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶	۰.۹۹۶۴	
	هیتر ۲	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶		
	تقلیل فشار خط ۱	۰.۰۱۳۱	۰.۸۷۷	۰.۹۹۹۹	
	تقلیل فشار خط ۲	۰.۰۱۳۱	۰.۸۷۷		
	تقلیل فشار خط ۳	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶		
	بودار کننده	۰.۰۱۲	۰.۹۸۸	۰.۹۸۸۳	
	فیلتراسیون خط ۱	۰.۲۳۶	۰.۷۹	۰.۹۹۶۷	۰.۹۸۲۹
	فیلتراسیون خط ۲	۰.۲۳۶	۰.۷۹		
	فیلتراسیون خط ۳	۰.۰۷۸	۰.۹۲۶		
	هیتر ۱	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶	۰.۹۹۶۴	
	هیتر ۲	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶		

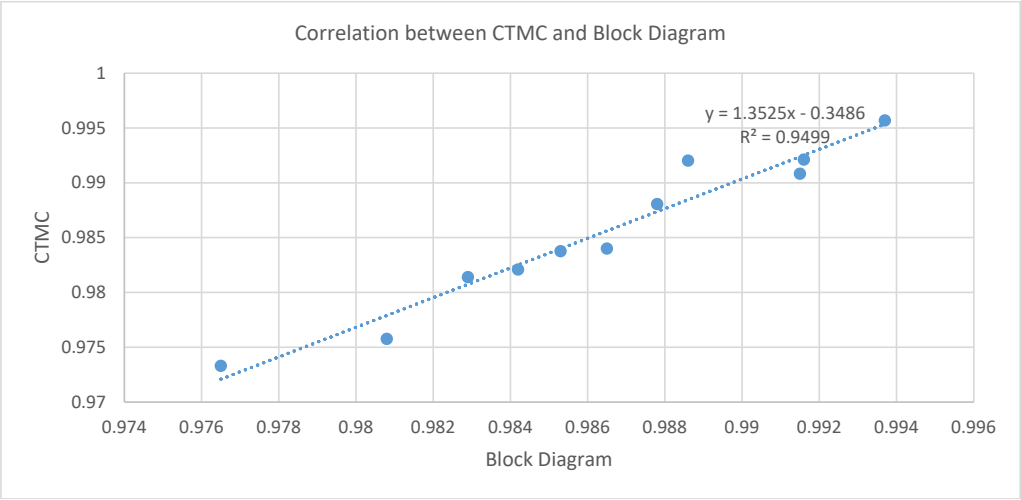
[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]

ادامه جدول ۲: پارامترهای نرخ شکست و قابلیت اطمینان سیستم‌ها و ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری در سال‌های مختلف

سال	زیر سیستم	نرخ شکست	قابلیت اطمینان زیرسیستم	قابلیت اطمینان سیستم	قابلیت اطمینان ایستگاه
۱۳۹۹	تقلیل فشار خط ۱	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶	۰.۹۹۹۹	
	تقلیل فشار خط ۲	۰.۰۱۳۱	۰.۸۷۷		
	تقلیل فشار خط ۳	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶		
	بودار کننده	۰.۰۱۲	۰.۹۸۸	۰.۹۸۸۳	
۱۴۰۰	فیلتراسیون خط ۱	۰.۱۳۴	۰.۸۷۴	۰.۹۹۷	۰.۹۸۷۸
	فیلتراسیون خط ۲	۰.۱۳۲	۰.۸۷۶		
	فیلتراسیون خط ۳	۰.۱۶۲	۰.۸۵		
	هیتر ۱	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶	۰.۹۹۶	
	هیتر ۲	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶		
	تقلیل فشار خط ۱	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶	۰.۹۹۹	
	تقلیل فشار خط ۲	۰.۰۱۳۱	۰.۸۷۷		
	تقلیل فشار خط ۳	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶		
	بودار کننده	۰.۰۰۴	۰.۹۹۶	۰.۹۹۶	

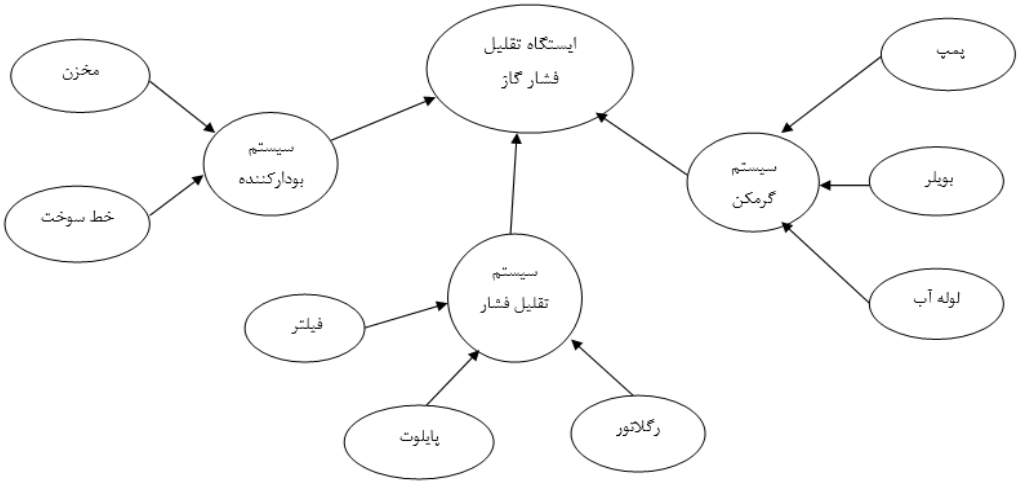
جدول ۳: نتایج پارامترهای قابلیت اطمینان ایستگاه در شرایط عملیاتی در سال‌های مختلف

ردیف	سال	قابلیت اطمینان ایستگاه بر اساس روش CTMC	قابلیت ایستگاه بر اساس روش دیاگرام بلوکی
۱	۲۰۱۲	۰.۹۷۶۵	۰.۹۷۳۳
۲	۲۰۱۳	۰.۹۸۶۵	۰.۹۸۴۰
۳	۲۰۱۴	۰.۹۸۸۶	۰.۹۹۲۰
۴	۲۰۱۵	۰.۹۹۳۷	۰.۹۹۵۷
۵	۲۰۱۶	۰.۹۸۴۲	۰.۹۸۲۱
۶	۲۰۱۷	۰.۹۸۰۸	۰.۹۷۵۸
۷	۲۰۱۸	۰.۹۹۱۵	۰.۹۹۰۸
۸	۲۰۱۹	۰.۹۹۱۶	۰.۹۹۲۱
۹	۲۰۲۰	۰.۹۸۵۳	۰.۹۸۳۸
۱۰	۲۰۲۱	۰.۹۸۲۹	۰.۹۸۱۴
۱۱	۲۰۲۲	۰.۹۸۷۸	۰.۹۸۸۱



نمودار۱: همبستگی بین قابلیت اطمینان ایستگاه بر اساس نتایج روش CTMC و دیاگرام بلوکی

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]



شکل ۱۱: نتایج مطالعه مشابه انجام شده در سال ۲۰۱۹ (۳۶)

جدول ۴: نرخ شکست تجهیزات ایستگاه تقلیل فشار گاز بر اساس مطالعه انجام شده در سال ۲۰۱۹ (۳۶)

تجهیز	زمان شکست (ساعت)	نرخ شکست (در ساعت)
رگلاتور فشار	۶۰۸۸۲	۰.۰۰۰۰۱۶۴
پایلوت	۴۵۸۱۴.۸	۰.۰۰۰۰۲۱۸
فیلتر	۱۰۳۳۶.۸	۰.۰۰۰۰۹۶۷
مخزن بودارکننده	۹۲۵۹۳.۲	۰.۰۰۰۰۱۰۸
خط لوله سوخت بودارکننده	۱۳۲۳۶۳.۶	۰.۰۰۰۰۰۷۵۵
پمپ هیتر	۲۰۸۴۸.۸	۰.۰۰۰۰۴۸
بویلر هیتر	۳۱۶۲۳.۶	۰.۰۰۰۰۳۱۶
خط لوله هیتر	۱۳۵۱۶۶.۸	۰.۰۰۰۰۰۷۴

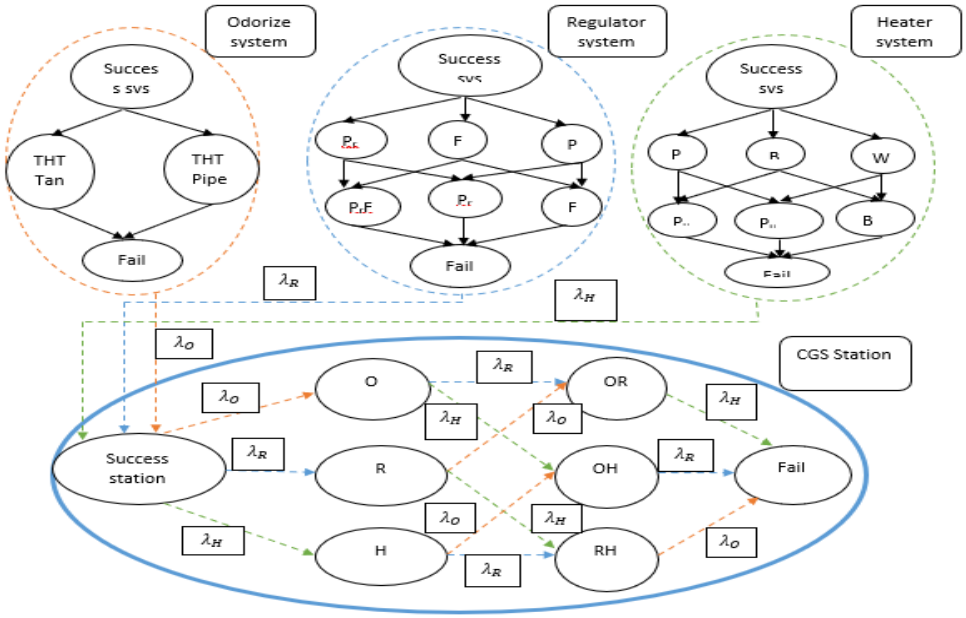
رویکرد پیشنهادی، ابتدا فضای حالت برای این ایستگاه ترسیم (شکل ۱۲) و محاسبه میزان قابلیت اطمینان ایستگاه تعیین گردید. رویکرد پیشنهادی این مطالعه، میزان قابلیت اطمینان ایستگاه را ۰,۹۷۵۹ محاسبه کرد که نشان دهنده همخوانی نتایج این رویکرد پیشنهادی با نتایج مطالعه موردنظر می‌باشد.

بحث

به طور کلی شاخه‌های اصلی در قابلیت اطمینان شامل قابلیت اطمینان سخت افزاری، قابلیت اطمینان نرم افزاری و قابلیت اطمینان انسانی می‌باشد که در این مطالعه با توجه به اهداف و روش کار مطالعه، ارزیابی قابلیت اطمینان سخت افزاری می‌باشد و با توجه به این که قابلیت اطمینان سخت افزاری بر اساس دو رویکرد فیزیکی و سیستمی انجام می‌گردد و با توجه به اهداف مطالعه که تعیین قابلیت اطمینان بر اساس نرخ شکست تجهیزات تشکیل دهنده ایستگاه می‌باشد، لذا ارزیابی قابلیت اطمینان در این مطالعه به صورت سخت افزاری و با رویکرد سیستمی می‌باشد.

مطالعات BahooToroody و همکاران (۳۶، ۳۷) و مطالعه Leoni و همکاران (۴۸) که در سیستم‌های تقلیل فشار و مترینگ ایستگاه‌های گاز انجام شده بود، بر اساس رویکرد سخت افزاری سیستمی می‌باشد، با این تفاوت که در این مطالعه، نرخ شکست تجهیزات بر اساس زمان شکست تجهیزات که در بانک‌های اطلاعاتی وجود دارد تعیین و با استفاده از شبکه بیزین، قابلیت اطمینان

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]



Success station: موفقیت هر سه بخش ایستگاه، THT Tank: شکست زیربخش مخزن بودار کننده، THT Pipe: شکست زیربخش خط لوله مخزن بودار کننده، Pr: شکست زیربخش تقلیل فشار، F : شکست زیربخش فیلتراسیون، P: شکست زیربخش پایلوت، Pu: شکست زیربخش پمپ گرمکن، B: شکست زیربخش بویلر گرمکن، Wp: شکست زیربخش خط لوله آب گرمکن، Fail: شکست هر سه بخش ایستگاه

شکل ۱۲: رویکرد سیستماتیک بر اساس مدل مارکوف برای ایستگاه تقلیل فشار شکل ۱۱

ایستگاه محاسبه شده بود، که با توجه به موقعیت جغرافیایی، شرایط محیطی، نوع تجهیزات و ... می‌تواند نرخ شکست واقعی تجهیزات در سیستم انتخابی نباشد و در ارزیابی قابلیت اطمینان تاثیرگذار باشد، همچنین بهترین داده‌ها آن است که در محیط واقعی و عملیاتی جمع آوری شود، زیرا به تمام ویژگی‌های قابل استناد آن آگاهی وجود دارد.

بر اساس نتایج، بالاترین نرخ شکست و کمترین زمان تا شکست مربوط به سیستم‌های تقلیل فشار و فیلتراسیون می‌باشد که به عنوان سیستم‌های بحرانی ایستگاه در نظر گرفته شد، به طوری که باید برنامه تعمیر و نگهداری مناسب برای این سیستم‌ها تدوین و اجرایی گردد تا این سیستم‌ها دچار شکست نشود. همچنین سیستم تقلیل فشار شامل چهار زیر سیستم رگلاتور، شیر اطمینان، شیر قطع کن و کنتور می‌باشد که رگلاتور کمترین قابلیت اطمینان این سیستم را تشکیل داد که شکست این تجهیز ناشی از پارگی قطعات پلیمری مانند دیافراگم، اسلیو، سیت و اوریفیس می‌باشد و به عنوان بحرانی ترین تجهیز این سیستم شناسایی و برای افزایش قابلیت اطمینان، بهینه کردن نگهداری و تعمیرات بموقع و مناسب این تجهیز پیشنهاد گردید. همچنین تست لاک آپ برای رگلاتور در زمان‌های بیشتری از سال و به صورت دوره ای سبب می‌شود که بعدها نیازی به باز و بسته کردن زیاد رگلاتور نباشد و در نتیجه، شکست‌های جانبی در سایر سیستم‌ها کمتر و ایمنی بیشتری تضمین شود.نتایج مطالعه زارعی و همکارانش (۳) نشان داد که شکست رگلاتور به عنوان بدترین سناریوی خطر در ایستگاه‌های تقلیل فشار CGS است که با نتایج این مطالعه همخوانی داشت به طوری که شکست رگلاتورها باعث افزایش فشار گاز در خطوط لوله ایستگاه شده که می‌تواند در صورت عدم عملکرد شیر ایمنی و شیر قطع کن باعث بروز حوادث از جمله انفجار گردد.

نتایج نشان داد رفتار شکست تجهیزات ایستگاه از تابع نمایی تبعیت می کنند که نشان دهنده این است

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]

که بر اساس الگوی نولان در الگو E قرار داشتند که با مطالعات BahooToroody و همکاران (۳۷،۳۶) و مطالعه Leoni و همکاران (۴۸) که محاسبه نرخ شکست تجهیزات ایستگاه تقلیل فشار را بر اساس تابع نمایی انجام داده بودند، همخوانی داشت. در این مطالعه زمان شکست تجهیزات براساس داده‌های ثبت شده در بخش تعمیر و نگهداری انجام گرفت. به طوری که در مطالعه Leoni و همکاران (۴۸) نرخ شکست بر اساس بانک‌های اطلاعاتی تعیین شده است که با توجه به موقعیت جغرافیایی، شرایط محیطی، نوع تجهیزات و ... می‌تواند نرخ شکست واقعی تجهیزات در سیستم انتخابی نباشد و در ارزیابی قابلیت اطمینان تاثیرگذار باشد.

جهت تعیین نرخ شکست تجهیزات با توجه به رفرنس‌های موجود و وجود زنجیره مارکوف (تخمین فرآیندهای تصادفی در وضعیت بعدی بر اساس آخرین وضعیت) بر اساس روش MCMC انجام گرفت. این روش، یکی از بهترین روش‌ها برای تعیین تابع توزیع پسین می‌باشد که با تولید زنجیره‌های مختلف، بهترین مقادیر از توزیع‌های پسین را برای تعیین نرخ شکست ایجاد می‌کند(۴۹-۵۱). در مطالعات BahooToroody و همکاران (۳۶) ، Karras و همکاران (۴۹)، Chen و همکاران (۵۰)، Magni و همکاران (۵۱) ، Łatuszyński و همکاران (۵۲) و Lin و همکاران (۵۳) این روش مورد استفاده قرار گرفته است.

در این مطالعه از روش گیبز برای نمونه گیری داده‌ها استفاده گردید.از ویژگی‌های این نمونه گیری، محدودتر و ساده تر بودن این روش نسبت به سایر روش‌های MCMC می‌باشد. همچنین در این نمونه گیری تابع توزیع احتمال شرطی بین هر متغیر مشخص شد. تابع توزیع پیشین بر اساس توزیع نمایی برای کدنویسی در نرم افزار WinBUGS14 برای شبیه سازی انتخاب گردید. دلیل این امر این است که به طور معمول، برای بیان طول عمر پدیده‌های تصادفی از توزیع گاما و نمایی استفاده می‌گردد، خاصیت عدم حافظه در متغیرهای تصادفی با توزیع نمایی از خصوصیات جالب این توزیع‌ها بوده و مشخص می‌کند احتمال رخداد یک پیشامد در آینده ارتباطی با گذشته آن پدیده ندارد. این نرم افزار در مطالعات Lunnو همکاران(۴۰) ، Kéry و همکاران (۴۱)، Griffin و همکاران (۴۲) مورد استفاده قرار گرفته است.

بر اساس نتایج مطالعه انجام شده می‌توان نرخ شکست واقعی زیر سیستم‌های ایستگاه را تعیین و بر اساس آن میانگین زمان شکست سیستم‌ها و ایستگاه تعیین و بر این اساس برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای ایستگاه تدوین گردید.

از محدودیت‌های این مطالعه این است که با افزایش اندازه و پیچیدگی سیستم‌ها، تعداد حالت‌های مدل مارکوف مورد بررسی به سرعت افزایش می‌یابد، لذا، در این موارد ساخت و حل مدل‌های مارکوف دشوار می‌شود. همچنین، محققان برخی از کاستی‌ها را در ارائه یک اعتبار سنجی دقیق درک می‌کنند و اعتقاد دارند که تحقیقات بیشتر برای پر کردن شکاف در صورت وجود مطالعات مشابه و داده‌های تجربی یا میدانی بیشتر موردنیاز می‌باشد. محققان می‌دانند که هیچ توافق قطعی در مورد ارزیابی قابلیت اطمینان وجود ندارد. با این حال، این مطالعه قصد داشت گام‌هایی فراتر از تکنیک‌های متداول ارزیابی قابلیت اطمینان از جمله شبکه بیزین، شبکه دیاگرام بلوکی، روش درخت خطا و ... بردارد. با توجه به ماهیت چنین مطالعاتی و وجود عدم قطعیت در نتایج این گونه مطالعات، در این تحقیق امکان مقایسه نتایج این مطالعه با نتایج سایر مطالعات وجود نداشت.

یکی از نقاط قوت این تحقیق، پیاده‌سازی این روش در یکی از مراکز مهم و حساس شرکت گاز یعنی ایستگاه CGS بود. استفاده از تکنیک‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی در ایستگاه CGS، با توجه به راهکارهای پیشنهادی برای بهینه‌سازی سیستم، تجربیات مفیدی را ارائه می‌دهد که می‌تواند در طراحی، ساخت و بهره‌برداری از ایستگاه‌های CGS مورد استفاده قرار گیرد. اگرچه این مطالعه قابلیت اطمینان را بر اساس مدل‌سازی و شبیه‌سازی ارزیابی کرد، اما با محدودیت‌هایی مواجه بود که باید مورد توجه قرار گیرد. برای مطالعات آینده، توسعه برنامه مناسب تعمیر و

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]

نگهداری تجهیزات ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری CGS مبتنی بر ریسک (RBM)و مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM)وارزیابی قابلیت اطمینان ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز شهری با استفاده از روش ترکیبی MCMC-CTMC-BN پیشنهاد می‌گردد.

نتیجه گیری

رویکرد پیشنهادی، شکست اجزای سیستم را با هم ترکیب کرده و توانایی نمایش شکست‌های چند گانه را دارد. همچنین جنبه‌های زمانی را در محاسبه خود لحاظ نموده و ارزیابی ذهنی کارشناسان را به حداقل ممکن می‌رساند. با روش شبیه سازی تصادفی زنجیره مارکوف مونت کارلو (MCMC) می‌توان نرخ شکست تجهیزات را بر اساس زمان‌های شکست آن‌ها محاسبه و میزان عدم قطعیت را به حداقل ممکن رساند و بر اساس نرخ شکست محاسبه شده، برنامه مناسب تعمیر و نگهداری برای تجهیزات ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری CGS تدوین نمود. مدل مارکوف، ابزار مناسبی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها است. در این مطالعه، یک رویکرد سیستماتیک برای ساخت یک مدل مارکوف برای ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز شهری با استفاده از نرخ شکست زیر بخش‌های ایستگاه ارائه شده است. این رویکرد، ساخت مدل‌های مارکوف را در سیستم هدف کاهش داده و یک راه حل دقیق را برای ارزیابی قابلیت اطمینان ارائه میدهد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از همکاری و حمایت مالی شرکت ملی گاز ایران (استان خراسان شمالی) و گروه مهندسی بهداشت حرفه ای دانشگاه علوم پزشکی تهران تقدیر و تشکر می‌نماید.

کد اخلاق

IR.TUMS.SPH.REC.1400.151

تضاد منافع

در این پژوهش هیچگونه تضاد منافعی وجود ندارد.

REFERENCES

1. Khosravirad F, Zarei E, Mohammadfam I, Shoja E. Analysis of root causes of major process accident in town border stations (TBS) using functional hazard analysis (FuHA) and bow tie methods. Journal of occupational hygiene engineering. 2014 Dec 10;1(3):19-28.
2. Zarei E, Azadeh A, Khakzad N, Aliabadi MM, Mohammadfam I. Dynamic safety assessment of natural gas stations using Bayesian network. J Hazard Mater. 2017 Jan 5; 321:830-40.
3. Zarei E, Azadeh A, Aliabadi MM, Mohammadfam I. Dynamic safety risk modeling of process systems using bayesian network. Process Safety Progress. 2017 Dec;36(4):399-407.
4. Hokmabadi R, Zarei E, Karimi A. Assessing the Reliability of the City Gate Station Using Monte Carlo Simulation. J Health Saf Work. 2023 Jun 10;13(2):252-68.
5. Fooladi R, Karimi A, Mazloumi A, Rohani MS, Hokmabadi R. Human Error Assessment in City Gate Stations of Isfahan Natural Gas Company Using the System for Predictive Error Analysis and Reduction Framework. J Health Saf Work. 2022 Dec 1;12(4).
6. Karimi A, Zarei E, Hokmabadi R. Analyzing Reliability of CGS Station by Continuous Time Markov Chains (CTMC). International Journal of Reliability, Risk and Safety: Theory and Application. 2021 Dec 1;4(2):91-6.
7. Rausand M, Hoyland A. System reliability theory: models, statistical methods, and applications. John Wiley & Sons; 2003 Dec 5.
8. Papadakis GA. Assessment of requirements on safety management systems in EU regulations for the control of major hazard pipelines. J Hazard Mater. 2000 Nov

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]

3;78(1-3):63-89.
9. Batzias FA, Siontorou CG, Spanidis PM. Designing a reliable leak bio-detection system for natural gas pipelines. J Hazard Mater. 2011 Feb 15;186(1):35-58.
10. Berk J. Systems failure analysis. ASM International; 2009.
11. Dhillon BS. Reliability, quality, and safety for engineers. CRC press; 2004 Nov 15.
12. Pham H, editor. Handbook of reliability engineering. Springer Science & Business Media; 2006 Apr 12.
13. Kim MC. Reliability block diagram with general gates and its application to system reliability analysis. Ann Nucl Energy. 2011 Nov 1;38(11):2456-61.
14. Hasan O, Ahmed W, Tahar S, Hamdi MS. Reliability block diagrams based analysis: A survey. InAIP conference proceedings 2015 Mar 10 (Vol. 1648, No. 1, p. 850129). AIP Publishing LLC.
15. Liu HC. FMEA using uncertainty theories and MCDM methods. InFMEA using uncertainty theories and MCDM methods 2016 May 24 (pp. 13-27). Singapore: Springer Singapore.
16. Qin J, Xi Y, Pedrycz W. Failure mode and effects analysis (FMEA) for risk assessment based on interval type-2 fuzzy evidential reasoning method. Appl Soft Comput. 2020 Apr 1; 89:106134.
17. Yucesan M, Gul M, Celik E. A holistic FMEA approach by fuzzy-based Bayesian network and best–worst method. Complex Intell Systems. 2021 Jun;7(3):1547-64.
18. Turgay S, Kara D, Çimen S, Kara ES. Improving industrial production quality assurance: An analysis of MCDM and FMEA methodologies. Design, Construction, Maintenance. 2024 Jun 15; 4:29-43.
19. Hokmabadi R , Zarei E, karimi A. Risk assessment using failure modes and effects analysis on the basis of SWARA-RE-VIKOR fuzzy multi-criteria decision-making methods: A case study of the city gate gas pressure reduction station. Iran Occupational Health Journal. 2023; 19 (2): 33.
20. Hamta N, Ehsanifar M, Babai A, Biglar A. Improving the Identification and prioritization of the most important risks of safety equipment in FMEA with a hybrid multiple criteria decision-making technique. J Appl Res Ind Eng. 2021 Nov 9;8(Special Issue):1-6.
21. Ku BH, Cha JM. Reliability assessment of Catenary of Electric railway by using FTA and ETA analysis. 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering 2011 May 8 (pp. 1-4). IEEE.
22. Ignac-Nowicka J. Application of the FTA and ETA method for gas hazard identification for the performance of safety systems in the industrial department. Management Systems in Production Engineering. 2018.
23. Shahriar A, Sadiq R, Tesfamariam S. Risk analysis for oil & gas pipelines: A sustainability assessment approach using fuzzy based bow-tie analysis. J Loss Prev Process Ind. 2012 May 1;25(3):505-23.
24. Cabac L, Haustermann M, Mosteller D. Software development with Petri nets and agents: approach, frameworks and tool set. Sci Comput Program. 2018 Jun 1; 157:56-70.
25. Benevides M, Lopes B, Haeusler EH. Towards reasoning about petri nets: A propositional dynamic logic based approach. Theor Comput Sci. 2018 Oct 5; 744:22-36.
26. Giua A, Silva M. Modeling, analysis and control of discrete event systems: A Petri net perspective. IFAC-PapersOnLine. 2017 Jul 1;50(1):1772-83.
27. Shan X, Wang P, Lu W. The reliability and availability evaluation of repairable district heating networks under changeable external conditions. Appl Energy. 2017 Oct 1; 203:686-95.
28. Korb KB, Nicholson AE. Bayesian artificial intelligence. CRC press; 2010 Dec 16.
29. El-Awady A, Ponnambalam K. Integration of simulation and Markov chains to support Bayesian networks for probabilistic failure analysis of complex systems. Reliab Eng Syst Saf. 2021 Jul 1; 211:107511.
30. Ericson CA. Hazard analysis techniques for system safety. John Wiley & Sons; 2015 Jun 12.
31. Son GS, Kim DH, Son CW, Kim JK, Park JH. Design of SPLC architecture used in advanced nuclear safety system and reliability analysis using markov model. Nucl Technol. 2013 Dec 1;184(3):297-309.
32. Kanjilal O, Manohar CS. Markov chain splitting methods in structural reliability integral estimation. Probabilistic Engineering Mechanics. 2015 Apr 1; 40:42-51.
33. Mariappan V, Srividya A. Semi-Markov analysis of systems. System Reliability Analysis: Transition from Binary to Multi-State Models. 2024 Dec 30:83.
34. Farahani A, Shoja A, Tohidi H. Markov and semi-Markov models in system reliability. InEngineering Reliability and Risk Assessment 2023 Jan 1 (pp. 91-130). Elsevier.
35. Kanjilal O, Manohar CS. Markov chain splitting methods

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]

in structural reliability integral estimation. Probabilistic Engineering Mechanics. 2015 Apr 1; 40:42-51.

36. BahooToroody A, Leoni L, De Carlo F, Paltrinieri N. Developing a risk-based maintenance model for a Natural Gas Regulating and Metering Station using Bayesian Network. J Loss Prev Process Ind. 2019 Jan 1; 57:17-24.
37. BahooToroody A, Abaei MM, Arzaghi E, BahooToroody F, De Carlo F, Abbassi R. Multi-level optimization of maintenance plan for natural gas system exposed to deterioration process. J Hazard Mater. 2019 Jan 15; 362:412-23.
38. Ntzoufras I. Bayesian modeling using WinBUGS. John Wiley & Sons; 2011 Sep 20.
39. Lee MD, Wagenmakers EJ. Bayesian cognitive modeling: A practical course. Cambridge university press; 2014 Apr 3.
40. Lunn D, Spiegelhalter D, Thomas A, Best N. The BUGS project: Evolution, critique and future directions. Statistics in medicine. 2009 Nov 10;28(25):3049-67.
41. Kéry M, Schaub M. Bayesian population analysis using WinBUGS: a hierarchical perspective. Academic press; 2011 Oct 11.
42. Griffin JE, Steel MF. Bayesian stochastic frontier analysis using WinBUGS. J Product Anal. 2007 Jun;27(3):163-76.
43. Karbasian M, Sharifi F, Govareshki MH, Kazerooni M. Improving Reliability of Complex Systems Using Analyses Obtained Through Design Structure Matrix and Interactive Failure Detection Procedures. International Journal of Reliability, Risk and Safety: Theory and Application. 2021 Jun 1;4(1):39-45.
44. Marefat Khalilabad V. Continuous Time Discrete State Markovian Approach for Reliability Assessment of Missile System during its Life Cycle. Modares Mechanical Engineering Journal, 2017, Volume 17, Number 3, pp. 416-422.
45. Zhao Z, Chen M, Fan H, Zhang N. Application of machine learning in the reliability evaluation of pipelines for the external anticorrosion coating. Comput Intell Neurosci. 2022;2022(1):4759514.
46. Busquets-Monge S, Rafiezadeh R, Alepuz S, Filba-Martinez A, Nicolas-Apruzzese J. Fast reliability assessment of neutral-point-clamped topologies through Markov models. IEEE Transactions on Power Electronics. 2021 Jun 8;36(12):13449-59.
47. BahooToroody A, Abaei MM, BahooToroody F, De Carlo F, Abbassi R, Khalaj S. A condition monitoring based signal filtering approach for dynamic time dependent safety assessment of natural gas distribution process. Process Saf Environ Prot. 2019 Mar 1; 123:335-43.
48. Leoni L, De Carlo F, Sgarbossa F, Paltrinieri N. Comparison of risk-based maintenance approaches applied to a natural gas regulating and metering station.2020.
49. Karras C, Karras A, Avlonitis M, Sioutas S. An overview of mcmc methods: From theory to applications. InIFIP international conference on artificial intelligence applications and innovations 2022 Jun 10 (pp. 319-332). Cham: Springer International Publishing.
50. Chen J, Rosenthal JS. Decrypting classical cipher text using Markov chain Monte Carlo. Stat Comput. 2012 Mar;22(2):397-413.
51. Magni P, Bellazzi R, De Nicolao G. Bayesian function learning using MCMC methods. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2002 Aug 6;20(12):1319-31.
52. Łatuszyński K, Roberts GO, Rosenthal JS. Adaptive Gibbs samplers and related MCMC methods.
53. Lin J. Bayesian reliability with MCMC: opportunities and challenges. Current Trends in Reliability, Availability, Maintainability and Safety: An Industry Perspective. 2015 Dec 15:575-85.

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-01]