Journal of Health and Safety at Work 2023; 13(2): 252-268

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Assessing the Reliability of the City Gate Station Using Monte Carlo Simulation

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

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

Received: 2022-08-06 Accepted: 2022-10-29

ABSTRACT

Introduction: Reliability is always of particular importance in system design and planning; thus, improving reliability is among the approaches for achieving a safe system. Simulation methods are widely used in system reliability assessment. Therefore, this study aims to assess the reliability of the City Gate Gas Station (CGS) using Monte Carlo Simulation (MCS).

Material and Methods: This descriptive and analytical study was conducted in one of the CGSs of North Khorasan Province in 2021. The CGS process was carefully examined and its block diagram was plotted. Then, failure time data of CGS equipment were collected over 11 years and time between failures of subsystems was calculated. The failure probability distribution function of subsystems was determined using Easy Fit software and Kolmogorov-Smirnov test. Moreover, subsystems' reliability was estimated by MCS. Finally, station reliability was calculated considering the series-parallel structure of the CGS.

Results: The results revealed that the failure probability density distribution function of CGS subsystems was based on gamma and normal functions. The reliabilities of filtration, heater, pressure reduction system, and odorize were calculated as 0.97, 0.987, 0.98, and 0.992 respectively, and their failure rates were 0.000003477, 0.0000014937, 0.0000023062, and 0.0000009169 failures per hour respectively. The station reliability was calculated as 0.93.

Conclusion: The failure probability distribution function and reliability assessment of subsystems were determined by data modeling and MCS respectively. Filtration and pressure reduction systems had the highest failure rate and required a proper maintenance program.

Keywords: *Reliability assessment, Modeling, Monte carlo simulation*

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Hokmabadi R, Zarei E, Karimi A. Assessing the Reliability of the City Gate Station Using Monte Carlo Simulation. Journal of Health and Safety at Work. 2023; 13(2): 252-268.

1. INTRODUCTION

Among fossil fuels, natural gas is one of the most important in industries. Due to its economic and environmental benefits, natural gas, as a source of clean energy, is one of the most consumed energies in today's society and currently contributes to 24% of global energy consumption and 20% of European countries' consumption, growing at a rate of 2.4%. One of the important facilities in natural gas transmission systems is the City Gate Station (CGS). In this facility, several important operations are performed, including measuring gas flow, reducing gas pressure, and scenting gas for

* Corresponding Author Email: *a_karimi@sina.tums.ac.ir*

Copyright © 2023 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 jhsw.tums.ac.ir on 2026-04-17]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1402.13.2.4.3]

safety purposes. Due to their special operational conditions, these facilities have always been the site of catastrophic accidents throughout history; in the last decade, various accidents have occurred in their process systems. Hence, evaluating the reliability of these systems is of great importance.

Evaluating reliability helps identify potential causes of system failure and provide potential solutions to improve safety and prevent failure. Therefore, implementing safety and preventive programs plays a critical role in improving quantitative and qualitative production indicators.

There are various methods to accurately estimate equipment failure probability and deal with uncertainty, including Bayesian and Dempster–Shafer theories, fuzzy method, and Monte Carlo Simulation (MCS). MCS samples the probability density distribution of each system component by generating random numbers and simulates output distribution by placing these samples in the final system model. By using the probabilistic system model and simulating random variables, this method provides a fundamental solution for mathematical and technical problems. One of its most important features is its high flexibility and lack of dependence on system dimensions. Hence, in this study, MCS was used to deal with uncertainty and accurately estimate CGS reliability.

2. MATERIAL AND METHODS

This study was conducted in 2021 to evaluate the reliability of a CGS in North Khorasan Province using MCS. In general, the framework for conducting the study is based on Fig. 1. In the first step, the station and its equipment were carefully studied and scrutinized, and the station's block diagram was drawn based on existing equipment. In the second step, the time between failures of station equipment was determined. In the third step, the probability distribution function of equipment failure time was determined according to modeling. To check the degree of conformity

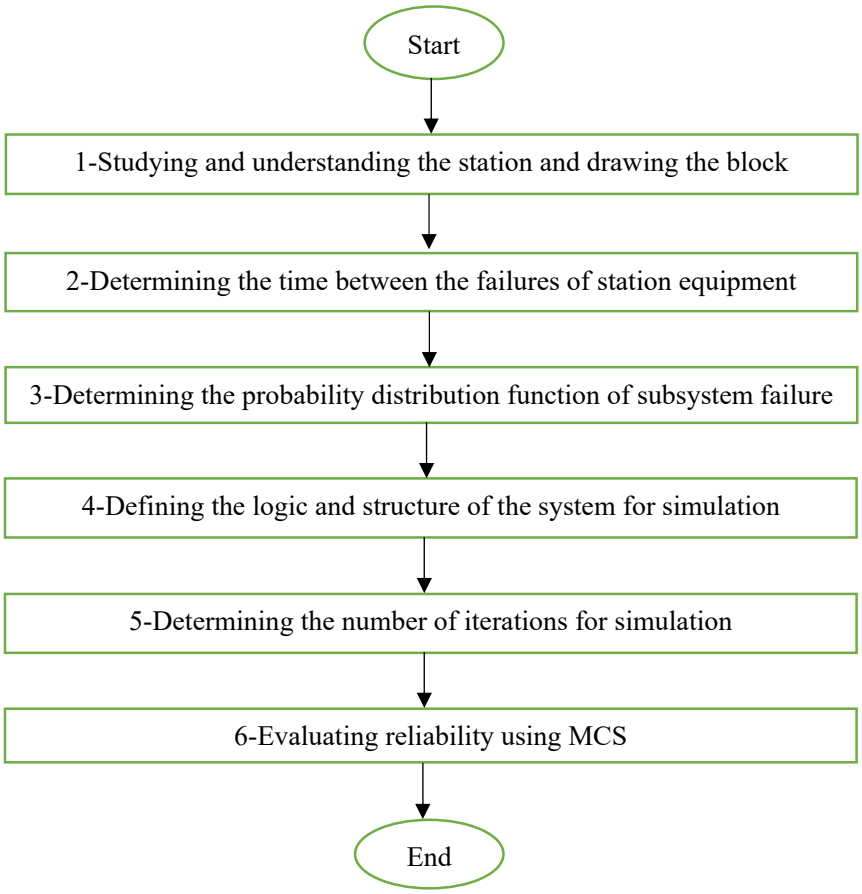


Fig. 1: Proposed approach for evaluating reliability based on MCS

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-04-17]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1402.13.2.4.3]

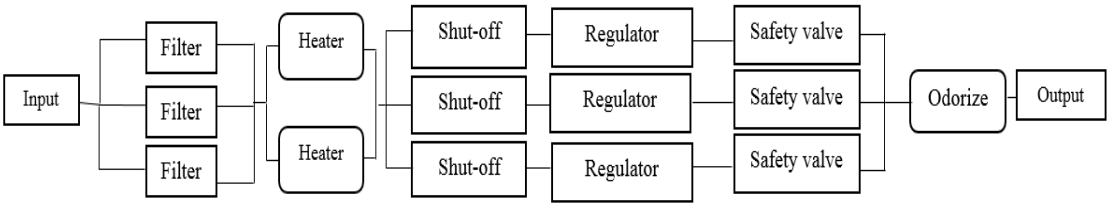


Fig. 2: Main subsystems of the CGS

of probability density distribution functions on statistical data, goodness-of-fit statistical tests were used, and the Kolmogorov-Smirnov test was used to select the best probability distribution function. In the fourth step, the system's logic and structure for simulation were defined based on the station's block diagram. In the fifth step, the appropriate number of iterations for simulation was determined. Finally, station subsystems' reliability evaluation was done using MCS, and then the station's reliability evaluation was calculated.

3. RESULTS AND DISCUSSION

First Stage

Studying and understanding the station and drawing a block diagram The station and its subsystems were studied and examined, including the main parts of the station such as filtration, heater, pressure reduction (regulators, shut-off, safety valve), and odorize part. Their block diagram is based on Fig. 2.

Second Step

Determining time between failures of station subsystems to determine the time between failures of station subsystems, the failure times of station equipment were gathered from 2010 to 2021 based on documentation available in the station's maintenance and instrumentation department. Then, the time between equipment failures was determined.

Third Step

Determining probability distribution function of subsystem failures based on modeling To determine the probability distribution function of subsystem failures based on modeling, the probability distribution function was determined using Easy Fit software. The results demonstrated that trend tests were close to linear form in all parts. The data did not have a trend and were distributed in a fixed form. Moreover, the serial correlation test showed no correlation in the data. Therefore, the renewable process method was selected as the best method to model these subsystems' reliability. The results of its statistical analysis indicated that subsystems' failure behavior followed gamma and normal functions.

Fourth Step

Defining logic and structure of system for simulation When there is more than one part in a system, it is necessary to define the system's logic and structure well. In this study, the system's structure is in a series-parallel or series sequence network. Therefore, the station's reliability is calculated based on the following formulas:

$$Eq1: R_{pi} = 1 - \prod_{j=1}^{k} F_{ij}$$

R_{pi} : Reliability under the parallel system,
F_{ij} : Probability of failure under the ij system

$$Eq2: \quad R_{sp} = \prod_{i=1}^{m} \left[1 - \prod_{j=1}^{k} F_{ij} \right]$$

R_{sp} : Reliability of the series-parallel or series-sequence network

Fifth Step

Determining the number of iterations for simulation To determine the number of iterations for simulation, the number of iterations for each subsystem was determined to execute the plan. For this purpose, the reliability test of the subsystem station was performed using the number of iterations from 100 to 5000 with a step increase of 100 units. For example, after 2000 repetitions, reliability values remained almost fixed in this interval. Hence, to perform the main simulation, the number "2000" was selected as the number of

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-04-17]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1402.13.2.4.3]

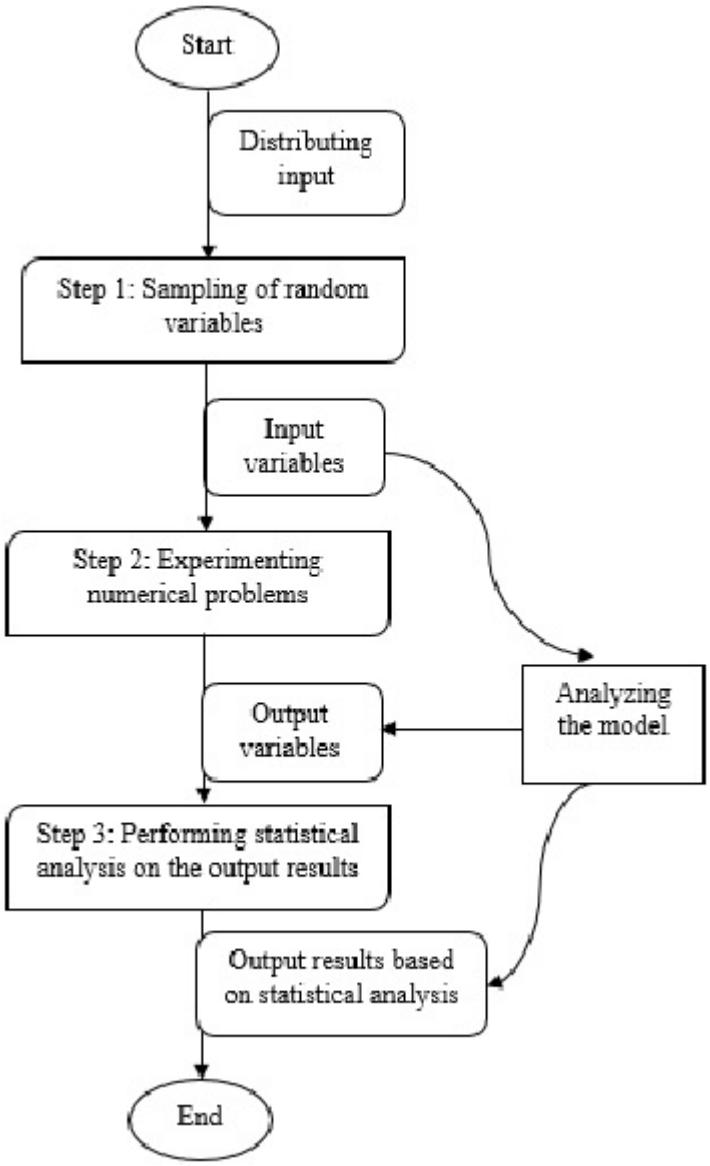


Fig. 3: MCS algorithm to determine the reliability of the subsystems station

iterations for the prepared plan. Random numbers were generated based on probability distribution function using Easy Fit software.

Sixth Step

Evaluating reliability using MCS The algorithm of simulation steps is represented in Fig 3. First, random numbers were created for each subsystem; then, by applying distribution function and drawing failure curve, the number of points under curve was divided by total number of points, and thus reliability value of each subsystem was calculated by MCS. After determining reliability of each subsystem, reliability of station parts was calculated based on formula 1 (Table 1) and finally station reliability was evaluated based on formula 2. The results showed that reliabilities of filtration, heater, pressure reduction, and odorize parts were 0.97, 0.987, 0.98, and 0.992 respectively; thus station reliability was 0.93.

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-04-17]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1402.13.2.4.3]

Table 1: Reliability evaluation of CGS station parts

Part	Reliability	Failure rate (per hour)
Filtration	0.97	0.000003477
Heater	0.987	0.0000014937
Pressure reduction	0.98	0.0000023062
Odorize	0.992	0.0000009169

4. CONCLUSIONS

This study indicates application of modeling to determine probability density function and MCS to calculate reliability of station subsystems. Filtration and pressure reduction parts had highest failure rate and needed more attention to improve station. Also, based on obtained results a suitable maintenance program can be developed for station equipment.

5. ACKNOWLEDGMENT

This study is part of a doctoral thesis and was approved by Ethics Committee of Tehran University of Medical Sciences (code: IR.TUMS.SPH.REC.1400.151). 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.

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-04-17]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1402.13.2.4.3]

فصلنامه بهداشت و ایمنی کار جلد ۱۳/ شماره ۲/ تابستان ۱۴۰۲ صفحات ۲۵۲-۲۶۸

ارزیابی قابلیت اطمینان ایستگاه تقلیل فشار گاز دروازه ی شهری با شبیه‌سازی مونت کارلو

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

[۱] گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
[۲] گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی خراسان شمالی، بجنورد، ایران
[۳] دپارتمان علوم ایمنی، دانشکده هوانوردی، دانشگاه هوافضا امبری ریدل، پرسکات، آریزونا، آمریکا
[۴] انیستیتو ایمنی رابرت سان، دانشگاه هوافضا امبری ریدل، پرسکات، آریزونا، آمریکا

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۷

چکیده

مقدمه: قابلیت اطمینان، همواره در طول طراحی و برنامه‌ریزی سیستم‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است؛ به‌طوری که ارتقای قابلیت اطمینان، یکی از راه‌های دستیابی به سیستم ایمن است. روش‌های شبیه‌سازی، به‌طور گسترده در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ لذا هدف از این مطالعه، ارزیابی قابلیت اطمینان ایستگاه تقلیل فشار گاز دروازه ی شهری با شبیه‌سازی مونت کارلو است.

روش کار: این مطالعه ی توصیفی-تحلیلی، در یکی از ایستگاه‌های تقلیل فشار دروازه ی شهری استان خراسان شمالی در سال ۱۴۰۰ انجام گرفت. در ابتدا، فرایند ایستگاه به‌طور دقیق بررسی و دیاگرام بلوکی آن ترسیم گردید و در ادامه، داده‌های زمان شکست تجهیزات ایستگاه طی ۱۱ سال جمع‌آوری و زمان بین شکست زیرسیستم‌ها محاسبه شد. سپس تابع توزیع احتمال شکست زیرسیستم‌ها توسط نرم‌افزار Easy Fit و بر اساس آزمون کلموگروف-اسمیرنوف تعیین گردید. همچنین قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها، با روش شبیه‌سازی مونت کارلو تخمین زده شد و درنهایت، با توجه به ساختار سری-موازی بودن ایستگاه، قابلیت اطمینان ایستگاه محاسبه گردید.

یافته ها: بر اساس نتایج، تابع توزیع چگالی احتمال شکست زیرسیستم‌های ایستگاه، بر اساس توابع گاما و نرمال است. میزان قابلیت اطمینان بخش‌های فیلتراسیون، گرم‌کن، تقلیل فشار و بودارکننده، به ترتیب برابر ۰,۹۷، ۰,۹۸۷، ۰,۹۸ و ۰,۹۹۲، نرخ شکست آن‌ها به ترتیب ۰,۰۰۰۰۰۳۴۷۷، ۰,۰۰۰۰۰۱۴۹۳۷، ۰,۰۰۰۰۰۲۳۰۶۲ و ۰,۰۰۰۰۰۰۹۱۶۹ شکست در ساعت و میزان قابلیت اطمینان ایستگاه برابر ۰,۹۳ محاسبه گردید.

نتیجه گیری: با مدل‌سازی داده‌ها و شبیه‌سازی مونت کارلو، به ترتیب تابع توزیع احتمال شکست و ارزیابی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها تعیین شد. بخش فیلتراسیون و تقلیل فشار، دارای بیشترین نرخ شکست بوده و به یک برنامه ی مناسب تعمیر و نگهداری نیاز است.

کلمات کلیدی: *ارزیابی قابلیت اطمینان، مدل‌سازی، شبیه‌سازی مونت کارلو.*

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: *a_karimi@sina.tums.ac.ir*

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-04-17]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1402.13.2.4.3]

مقدمه

گاز طبیعی، یکی از مهم‌ترین منابع انرژی در صنایع است؛ به‌طوری که این انرژی، یکی از پرکاربردترین منابع در جامعه امروزی بوده و در حال حاضر، ۲۴ درصد مصرف جهانی و ۲۰ درصد مصرف کشورهای اروپایی را گاز طبیعی تشکیل می‌دهد و با آهنگ ۲/۴ درصد در حال رشد است (۱-۳). رشد و توسعه ی مناطق مسکونی و صنعتی، سبب افزایش مصرف گاز و متراکم‌تر شدن شبکه‌های گازرسانی شده است (۴). در دهه‌های گذشته، چندین وقفه ی غیرمنتظره در عرضه ی گاز طبیعی، پیامدهای شدیدی بر اقتصاد و ثبات اجتماعی جهان داشته است؛ بنابراین، درک اهمیت شبکه‌ها و تأسیسات خط انتقال گاز طبیعی جهت امنیت و تأمین قابل اطمینان و پایدار گاز طبیعی، به دلایل اقتصادی، سیاسی و فنی، به یک دغدغه ی جدی و جهانی تبدیل شده است (۵). با توجه به نزدیکی سیستم‌های حمل‌ونقل گاز طبیعی (NGTS[1]) به مناطق شهری، عواقب هرگونه آسیب (تصادفی یا عمدی) به سیستم می‌تواند فاجعه‌بار باشد؛ بنابراین، ایمنی و رفاه عمومی، تا حد زیادی به عملکرد ایمن NGTS بستگی دارد (۶).

یکی از تأسیسات مهم در سیستم‌های انتقال گاز طبیعی، ایستگاه‌های تقلیل فشار دروازه ی شهری (CGS[2]) است. در این تأسیسات، چندین عملیات مهم ازجمله اندازه‌گیری جریان گاز، تقلیل فشار گاز و افزودن بو به گاز جهت اهداف ایمنی انجام می‌گیرد. این تأسیسات، به دلیل شرایط خاص عملیاتی خود، همواره بستر حوادث فاجعه‌آمیزی در طول تاریخ بوده است؛ به‌طوری که در یک دهه ی اخیر، حوادثی در چنین ایستگاه‌ها رخ داده است که ازجمله می‌توان به آتش‌سوزی ایستگاه تقلیل فشار گاز نیروگاه علی‌آباد کتول (مصدومیت ۹ نفر) و نشت گاز در منطقه ی کوریجان همدان (مرگ ۲ نفر) اشاره داشت (۷-۸)؛ بنابراین، ارزیابی قابلیت اطمینان در تأسیسات CGS، بسیار مهم و حیاتی است.

رایج‌ترین تعریف از قابلیت اطمینان عبارت است از: «احتمال آنکه یک سیستم، وظایف محوله‌اش را در یک دوره ی زمانی معلوم تحت شرایط محیطی مشخص، درست انجام دهد»؛ به‌طوری که ارزیابی قابلیت اطمینان می‌تواند ابزار مفیدی جهت تعیین تجهیزات با ریسک بالا، توسعه ی استراتژی‌های پیشگیری و تدوین برنامه‌های تعمیر و نگهداری باشد (۹-۱۰). همچنین، ارزیابی قابلیت اطمینان، کمک می‌کند تا علل بالقوه ی شکست سیستم را تشخیص داده و راه‌حل‌های بالقوه‌ای برای بهبود ایمنی جهت پیشگیری از شکست ارائه داد؛ به‌طوری که اجرای برنامه‌های ایمنی و پیشگیرانه، در ارتقای شاخص‌های کمی و کیفی تولید، نقش بسزایی دارد (۱۱-۱۲).

رویکردهای بسیاری جهت ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم وجود دارد (۱۳-۱۸). در مهندسی قابلیت اطمینان مدرن، بر ارزیابی قابلیت اطمینان مبتنی بر مدل‌سازی و شبیه‌سازی داده‌های شکست تجهیزات تأکید دارند (۱۹-۲۰). در مهندسی قابلیت اطمینان سنتی، اغلب از روش‌های مدل‌سازی منطقی، تجزیه ی سیستم و محاسبات آماری جهت ارزیابی قابلیت اطمینان استفاده می‌شود (۲۱-۲۶). بااین‌حال، روش‌های قابلیت اطمینان سنتی، نمی‌تواند به‌طور دقیق قابلیت اطمینان را در زیرساخت‌های پیچیده که تحت شرایط مختلف و متغیر کار می‌کنند و از تعداد زیادی اجزا تشکیل شده‌اند، به‌طور دقیق ارزیابی کند (۲۷-۲۸). رویکردهای بسیاری برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی اجزای تصادفی زیرساخت‌های پیچیده ازجمله شبکه‌های خطوط لوله ی گاز طبیعی وجود دارد که می‌توان به روش‌های مبتنی بر مونت کارلو (۲۹-۳۳)، روش‌های مبتنی بر فرآیند مارکوف(۳۴-۳۵) و سایر روش‌ها (۳۶-۳۹) اشاره کرد که به‌طور گسترده برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده با عدم قطعیت استفاده می‌شوند؛ همچنین مدل‌سازی دینامیکی احتمالی، برای توصیف وابستگی متقابل در زیرساخت‌های حیاتی و تأثیرات سناریوهای خاص استفاده می‌شود (۴۰).

روش‌های مختلفی جهت برآورد دقیق احتمال شکست تجهیزات و مقابله با عدم قطعیت توسط محققان ارائه شده

1. National Gas Transport System
2. City Gate Station

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-04-17]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1402.13.2.4.3]

است که می‌توان به موارد زیر اشاره داشت: Wu و همکاران (۲۰۱۷)، تئوری‌های بیزین و دمپستر و شفر، Yuhua & Datao (۲۰۰۵) روش فازی و Teixeira و همکارانش (۲۰۰۸)، شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS[1]) را برای ارزیابی دقیق احتمال شکست و مقابله با عدم قطعیت پیشنهاد کردند (۴۱-۴۳). در این مطالعه نیز از شبیه‌سازی مونت کارلو برای مقابله با عدم قطعیت و برآورد دقیق قابلیت اطمینان ایستگاه تقلیل فشار گاز CGS استفاده شده است. روش MCS، یک روش احتمالی است که برای پیش‌بینی رفتار اجزای سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش MCS با تولید اعداد تصادفی، از توزیع چگالی احتمال مربوط به هر یک از اجزای سیستم نمونه‌گیری کرده و با قرار دادن این نمونه‌ها در مدل نهایی سیستم، توزیع خروجی را شبیه‌سازی می‌کند. این روش، در حقیقت با استفاده از مدل احتمالی سیستم و شبیه‌سازی متغیرهای تصادفی، یک راه‌حل اساسی برای مسائل ریاضی و فنی ارائه می‌کند. ازجمله ی مهم‌ترین ویژگی‌های این روش، می‌توان به انعطاف‌پذیری بالا و عدم وابستگی به ابعاد سیستم اشاره نمود (۴۳-۴۴).

قابلیت اطمینان ایستگاه‌های CGS برای طراحی قوی‌تر شبکه‌های خطوط لوله ی گازی، از اهمیت زیادی برخوردار است. همچنین به‌منظور پیشگیری از تکرار وقوع حوادث، کمبود قوانین جامع و دقیق ایمنی فرآیند و عدم وجود ارزیابی دقیق قابلیت اطمینان ایستگاه‌های CGS، ضرورت انجام این مطالعه با توجه به پتانسیل بالای وقوع حوادث با خسارت جانی و مالی زیاد، بیش از پیش احساس می‌گردد؛ بنابراین، هدف از این مطالعه، ارزیابی قابلیت اطمینان ایستگاه تقلیل فشار CGS با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو است.

روش کار

این مطالعه، در سال ۱۴۰۰ با هدف ارزیابی قابلیت اطمینان با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو در یک ایستگاه تقلیل فشار گاز CGS استان خراسان شمالی انجام گرفته است. به‌طور کلی، چارچوب روش اجرای مطالعه، بر اساس شکل ۱ است. در مرحله ی اول، ایستگاه و تجهیزات آن به‌طور دقیق مطالعه و بررسی گردیده و دیاگرام بلوکی ایستگاه بر اساس زیرسیستم‌های آن ترسیم شده است. در این مرحله، نیاز است متخصصانی از حوزه‌های مرتبط ازجمله ایمنی، مهندسی بهداشت حرفه‌ای، مهندسان عملیاتی، تعمیر و نگهداری و مدیران که نظارت بر عملکرد سیستم را بر عهده دارند، مشارکت داشته باشند. استفاده از داده‌ابزارهایی همچون نمودارهای جریان، درخت خطا و چارت‌های وضعیت، در این مرحله بسیار مفید است. در مرحله ی دوم، زمان بین شکست تجهیزات ایستگاه تعیین گردید. برای انجام این کار، ابتدا زمان شکست زیرسیستم‌های ایستگاه از سال ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ بر اساس مستندات موجود در بخش تعمیر و نگهداری و ابزار دقیق ایستگاه جمع‌آوری و بعد زمان بین شکست زیرسیستم‌ها تعیین شد. در مرحله ی سوم، تابع توزیع چگالی احتمال شکست زیرسیستم‌ها بر اساس مدل‌سازی تعیین شد که در این مرحله، انتخاب تابع توزیع چگالی احتمال، بر اساس الگوریتم شکل ۲ انجام گرفت. جهت بررسی میزان تطابق توابع توزیع چگالی احتمال بر داده‌های آماری، از آزمون‌های آماری تطابق برازش و از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف برای انتخاب بهترین تابع توزیع احتمال استفاده شد. در مرحله ی چهارم، منطق و ساختار سیستم جهت شبیه‌سازی بر اساس دیاگرام بلوکی ایستگاه تعریف گردید. در مرحله ی پنجم، تعداد دور تکرار مناسب جهت شبیه‌سازی تعیین شده و در مرحله ی ششم، ارزیابی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های ایستگاه با MCS انجام گرفت و درنهایت ارزیابی قابلیت اطمینان ایستگاه محاسبه گردید.

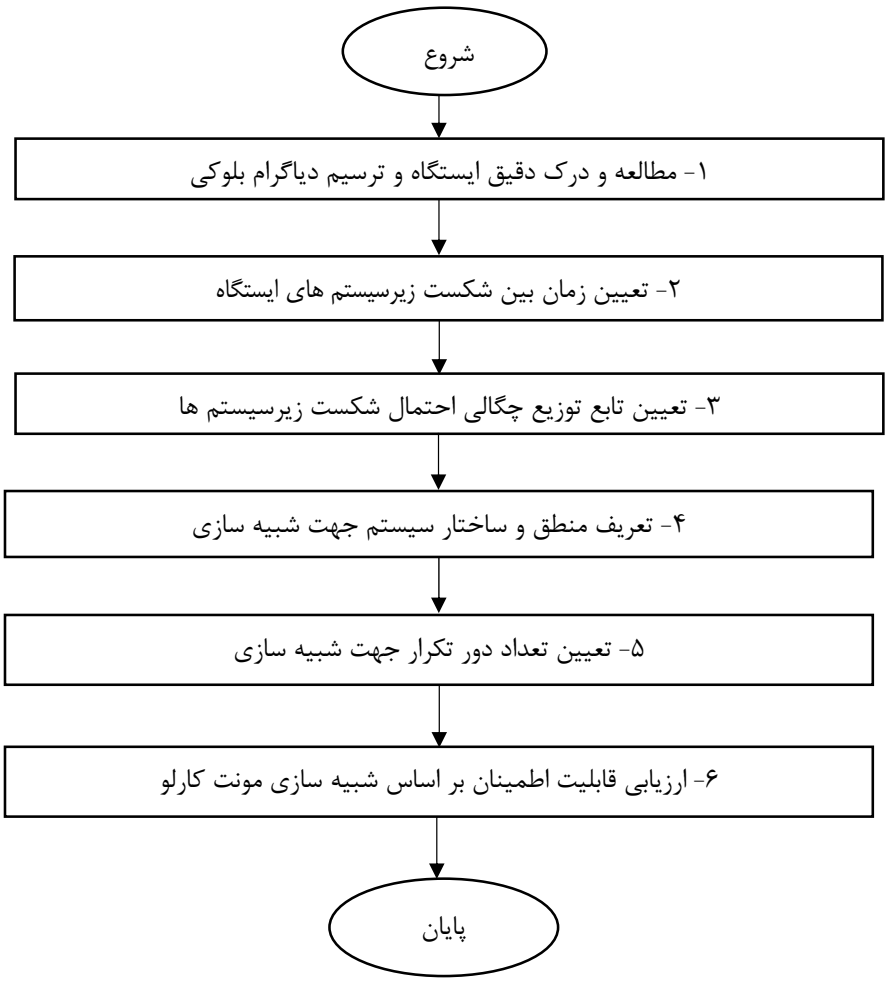
یافته ها

ایستگاه تقلیل فشار گاز CGS و زیرسیستم‌های آن، به‌طور دقیق مطالعه و بررسی گردید؛ به‌طوری که بخش‌های اصلی ایستگاه، شامل بخش فیلتراسیون، گرم‌کن، تقلیل فشار (رگلاتورها، شیر قطع کن، شیر

1. Monte Carlo Simulation

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-04-17]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1402.13.2.4.3]



شکل ۱: رویکرد پیشنهادی ارزیابی قابلیت اطمینان بر اساس شبیه سازی مونت کارلو در ایستگاه تقلیل فشار CGS

اطمینان) و بودارکننده بود که دیاگرام بلوکی آن بر اساس شکل ۳ است.

تابع توزیع چگالی احتمال شکست زیرسیستم‌ها، بر اساس الگوریتم شکل ۲ و با استفاده از نرم‌افزار Easy Fit تعیین گردید که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است. همچنین در کلیه ی بخش‌ها، داده‌ها دارای روند و همبستگی نبودند؛ لذا روش فرایند تجدیدشونده، به عنوان بهترین روش برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان این زیرسیستم‌ها انتخاب گردید (شکل ۴).

در زمانی که بیش از یک زیرسیستم در سیستم وجود داشته باشد، نیاز است منطق و ساختار سیستم به‌خوبی تعریف شود. در این مطالعه، ساختار سیستم به‌صورت سری-موازی یا دنباله‌های سری است؛ لذا قابلیت اطمینان بر اساس فرمول‌های زیر محاسبه گردید:

$$R_{pi} = 1 - \prod_{j=1}^{k} F_{ij} \qquad (۱)$$

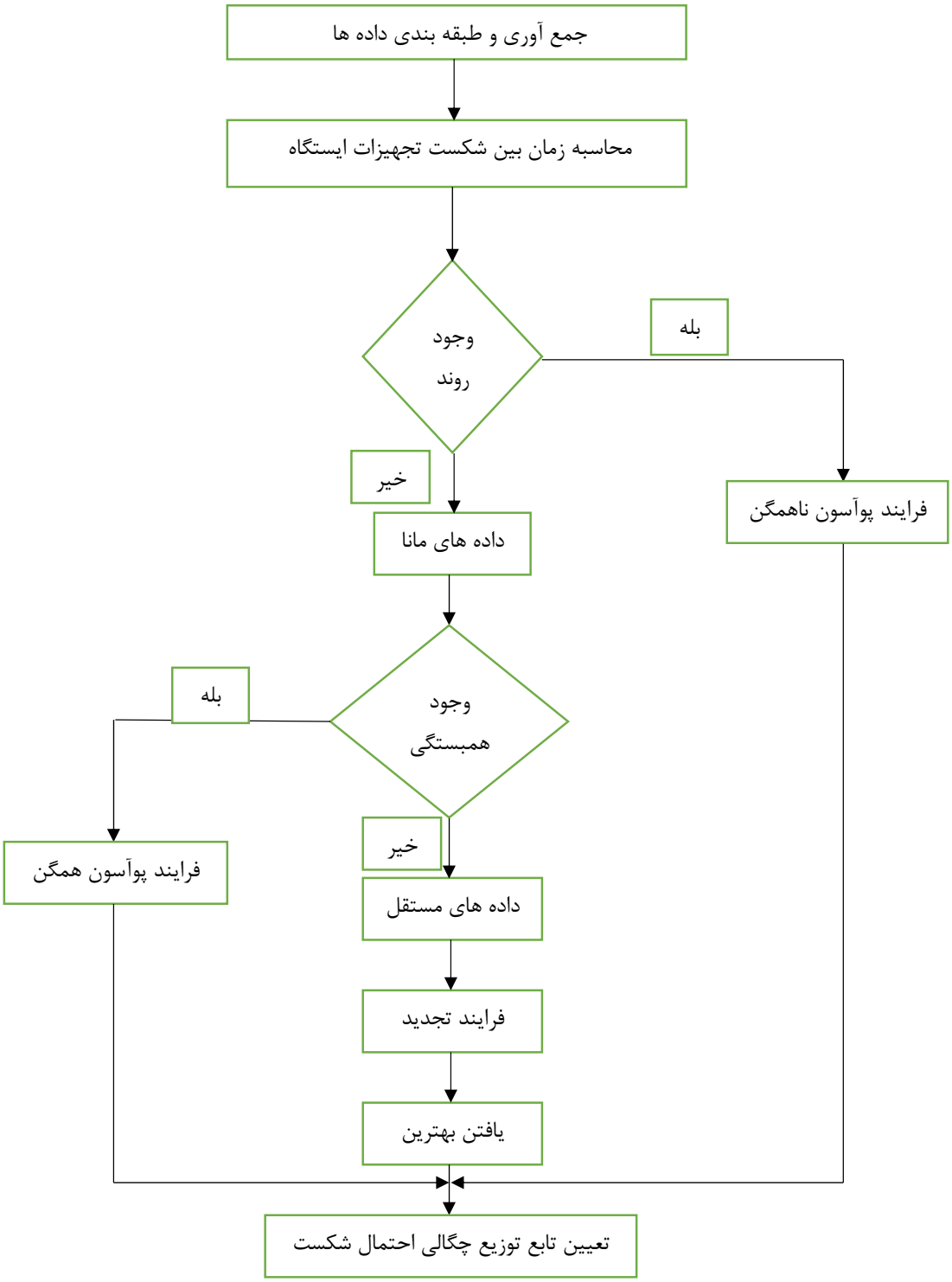
R_{pi}: قابلیت اطمینان زیرسیستم موازی

F_{ij}: احتمال شکست زیرسیستم j ام

$$R_{sp} = \prod_{i=1}^{m} \left[1 - \prod_{j=1}^{k} F_{ij} \right] \qquad (۲)$$

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-04-17]

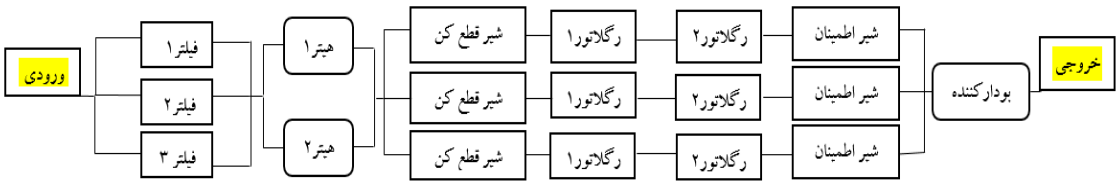
[DOR: 20.1001.1.2251807.1402.13.2.4.3]



شکل ۲: الگوریتم تعیین تابع توزیع چگالی احتمال شکست با استفاده از مدلسازی

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-04-17]

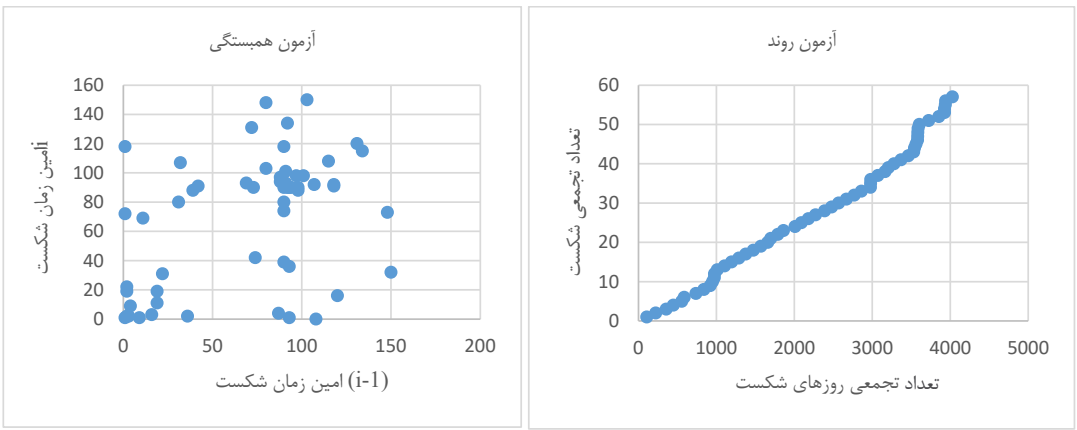
[DOR: 20.1001.1.2251807.1402.13.2.4.3]



شکل ۳: تجهیزات اصلی ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری CGS

جدول ۱: نتایج مربوط به تعیین تابع توزیع چگالی احتمال زیرسیستم ها

ردیف	بخش	زیرسیستم	تابع چگالی احتمال	آزمون K-S
۱	فیلتراسیون	فیلتر	Gamma	۰.۱۴۶۴۶
۲	گرمکن	هیتر	Gamma	۰.۱۵۸۱۷
۳	تقلیل فشار رن ۱	رگلاتورها	Gamma	۰.۱۴۲۵
		شیر قطع کن	Normal	۰.۴۸۹۳۳
		شیر اطمینان	Normal	۰.۱۸۲۷
۴	تقلیل فشار رن ۲	رگلاتورها	Gamma	۰.۱۳۴۸۷
		شیر قطع کن	Normal	۰.۴۹۰۳۲
		شیر اطمینان	Normal	۰.۱۵۶۶
۵	تقلیل فشار رن ۳	رگلاتورها	Gamma	۰.۱۲۳۱۵
		شیر قطع کن	Normal	۰.۴۸۴۶۹
		شیر اطمینان	Normal	۰.۱۶۹۶۷
۶	بودارکننده	تزریق کننده	Gamma	۰.۱۶۱۶۱



شکل ۴: نمونه ای از نتایج آزمون روند و همبستگی داده های شکست ایستگاه تقلیل فشار CGS

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-04-17]
[DOR: 20.1001.1.2251807.1402.13.2.4.3]

شکل ۵: تاثیر تعداد دور تکرار بر قابلیت اطمینان شبیه سازی شده زیرسیستم فیلتر ۱

جدول ۲: ارزیابی قابلیت اطمینان بخش های ایستگاه CGS

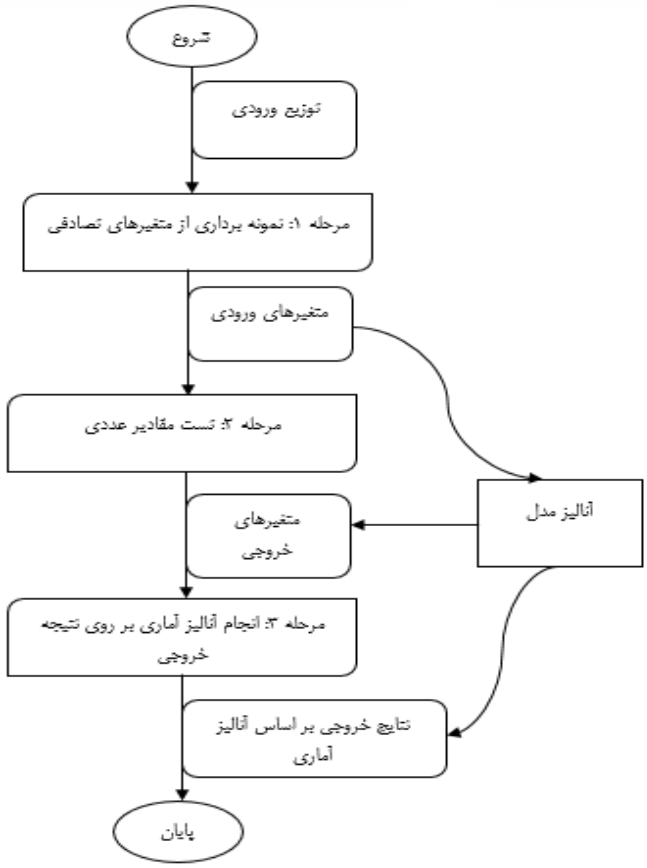
بخش	قابلیت اطمینان	نرخ شکست (در ساعت)
فیلتراسیون	۰.۹۷	۰.۰۰۰۰۰۳۴۷۷
گرمکن	۰.۹۸۷	۰.۰۰۰۰۰۱۴۹۳۷
تقلیل فشار	۰.۹۸	۰.۰۰۰۰۰۲۳۰۶۲
بودارکننده	۰.۹۹۲	۰.۰۰۰۰۰۰۹۱۶۹

R_{sp}: قابلیت اطمینان شبکه ی سری-موازی یا دنباله‌های سری

اولین گام در اجرای شبیه‌سازی، تعیین تعداد دور تکرار برای هر زیرسیستم جهت اجرای برنامه است. تعداد دور تکرار را شاید بتوان مهم‌ترین پارامتر اجرایی هر شبیه‌سازی دانست. این پارامتر، دقت خروجی برنامه و زمان اجرای آن را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. هرچه تعداد دور تکرار بیشتر باشد، دقت خروجی برنامه افزایش می‌یابد؛ اما از طرفی با بیشتر شدن تعداد دور تکرار، زمان اجرای برنامه افزایش می‌یابد؛ لذا تعیین تعداد دور تکرار مناسب که تأمین‌کننده ی دقت مناسب و زمان کم باشد، قبل از اجرای برنامه و حصول نتایج، الزامی است؛ بنابراین، در این مطالعه، قبل از شروع شبیه‌سازی، مقدار مناسب تعداد دور تکرار هر زیرسیستم تعیین گردید. برای این منظور، قابلیت اطمینان تجهیزات ایستگاه با استفاده از تعداد دور تکرار ۱۰۰ الی ۵۰۰۰ با افزایش پله‌ای ۱۰۰ واحدی اجرا گردید. نتایج محاسبات زیرسیستم فیلتر ۱، در شکل ۶ ارائه شده است.

چنانکه در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد دور تکرار، مقادیر قابلیت اطمینان محاسبه‌شده به سمت بازه ی بین ۰,۹۸۶۶ و ۰,۹۸۷۸ تمایل پیدا کرده و پس از دور تکرار ۲۰۰۰ و بیشتر، مقدار قابلیت اطمینان شبیه‌سازی‌شده توسط نرم‌افزار تقریباً به‌طور کامل در این بازه ثابت می‌ماند؛ لذا، برای اجرای شبیه‌سازی اصلی، تعداد ۲۰۰۰ به‌عنوان تعداد دورهای تکرار برای جزء فیلتر ۱ بخش فیلتراسیون انتخاب گردید. در ادامه، این روند برای کلیه ی زیرسیستم‌ها انجام و تعداد دور تکرار برای شبیه‌سازی زیرسیستم‌ها تعیین گردید. تولید اعداد تصادفی، بر اساس تابع توزیع احتمال شکست و با نرم‌افزار Easy Fit صورت گرفت.

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-04-17]
[DOR: 20.1001.1.2251807.1402.13.2.4.3]



شکل ۶: الگوریتم شبیه سازی مونت کارلو

در ادامه، شبیه‌سازی با استفاده از الگوریتم شکل ۶ انجام گرفت. ابتدا اعداد تصادفی برای هر زیرسیستم ایجاد گردید، سپس با اعمال تابع توزیع و رسم منحنی شکست، تعداد نقاطی که در زیر منحنی بودند، بر تعداد کل نقاط تقسیم و بدین ترتیب، مقدار قابلیت اطمینان هر زیرسیستم به روش شبیه‌سازی مونت کارلو محاسبه شد. بعد از تعیین قابلیت اطمینان هر زیرسیستم، محاسبه ی قابلیت اطمینان بخش‌های ایستگاه بر اساس فرمول ۱ (جدول ۲) انجام گرفت و درنهایت، ارزیابی قابلیت اطمینان ایستگاه بر اساس فرمول ۲ محاسبه شد. نتایج، نشان داد که قابلیت اطمینان بخش‌های فیلتراسیون، گرم‌کن، تقلیل فشار و بودارکننده، به ترتیب برابر ۰,۹۷، ۰,۹۸۷، ۰,۹۸ و ۰,۹۹۲ است؛ بنابراین، میزان قابلیت اطمینان ایستگاه، برابر ۰,۹۳ به دست آمد.

بحث

یکی از تأسیسات مهم در سیستم انتقال گاز طبیعی، ایستگاه تقلیل فشار CGS است؛ به‌طوری که این ایستگاه، نقشی کلیدی در تأمین به‌موقع و ایمن گاز طبیعی برای مشتریان مسکونی، تجاری و صنعتی دارد. انتشار تصادفی یا عمدی گاز طبیعی از تأسیسات ایستگاه، می‌تواند عواقب فاجعه‌باری را برای مردم، محیط زیست و دارایی‌ها به همراه داشته باشد. همچنین حوادث این ایستگاه‌ها، امنیت شهری را تهدید کرده و به یک موضوع مهم و بحث‌برانگیز تبدیل شده است؛ بنابراین، ارزیابی قابلیت اطمینان در این ایستگاه‌ها به‌منظور ایجاد شرایط ایمن، امری مهم و حیاتی است.

به‌منظور ارزیابی قابلیت اطمینان ایستگاه تقلیل فشار، ایستگاه به چهار بخش فیلتراسیون، گرم‌کن، تقلیل

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-04-17]
[DOR: 20.1001.1.2251807.1402.13.2.4.3]

فشار و بودارکننده تقسیم گردید؛ به‌طوری که بخش فیلتراسیون شامل سه فیلتر، بخش گرم‌کن شامل دو هیتر و بخش تقلیل فشار شامل سه رن بود. تجهیزات زیرسیستم رن‌ها نیز شامل رگلاتورها، شیر قطع‌کن و شیر اطمینان بود. قابلیت اطمینان بخش‌های فیلتراسیون، گرم‌کن، تقلیل فشار و بودارکننده، به ترتیب برابر ۰,۹۷، ۰,۹۸۷، ۰,۹۸ و ۰,۹۹۲ و نرخ شکست آن‌ها به ترتیب ۰,۰۰۰۰۰۳۴۷۷، ۰,۰۰۰۰۰۱۴۹۳۷، ۰,۰۰۰۰۰۲۳۰۶۲ و ۰,۰۰۰۰۰۰۹۱۶۹ شکست در ساعت محاسبه گردید. همچنین میزان قابلیت اطمینان ایستگاه برابر ۰,۹۳ محاسبه شد.

نتایج، نشان داد که آزمون‌های روند در کلیه ی بخش‌ها به حالت خطی نزدیک بوده، داده‌ها دارای روند نبوده و به‌صورت مانا توزیع شده اند. همچنین آزمون همبستگی سری، نشان‌دهنده ی عدم وجود همبستگی در داده‌ها بود؛ لذا روش فرایند تجدیدشونده، به عنوان بهترین روش برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان این زیرسیستم‌ها انتخاب گردید. نتایج تحلیل‌های آماری آن، نشان داد که رفتار شکست فیلتر، هیتر، رگلاتور، شیر قطع‌کن، شیر اطمینان و بودارکننده، به ترتیب از توابع gamma، gamma، gamma، Normal،Normal و gamma تبعیت می‌کنند که نشان‌دهنده ی این است که رفتار شکست تجهیزات بسیار با یکدیگر متفاوت است؛ که با نتایج مطالعات حیدری و همکاران (۴۵) و حسینی و همکاران (۴۶) همخوانی دارد.

بر اساس نتایج، بخش فیلتراسیون و تقلیل فشار، جزء بحرانی‌ترین بخش‌های ایستگاه هستند. نتایج مطالعه ی زارعی و همکاران (۸)، نشان داد که شکست بخش تقلیل فشار، به‌عنوان بدترین سناریوی خطر در ایستگاه‌های تقلیل فشار CGS است؛ که با نتایج این مطالعه همخوانی دارد؛ به‌طوری که شکست بخش تقلیل فشار، باعث افزایش فشار گاز در خطوط لوله ی ایستگاه شده و در صورت عدم عملکرد شیر اطمینان و شیر قطع‌کن، می‌تواند باعث بروز حوادث ازجمله انفجار گردد.

بر اساس نتایج مطالعه ی انجام‌شده، کمترین میزان قابلیت اطمینان ایستگاه، بخش فیلتراسیون است که به‌عنوان اولین بخش بحرانی ایستگاه در نظر گرفته شد؛ به‌طوری که باید برنامه ی تعمیر و نگهداری مناسب برای این بخش تدوین و اجرا گردد تا این بخش دچار شکست نشود.

مطابق نتایج، دومین بخش بحرانی ایستگاه، بخش تقلیل فشار است. این بخش، شامل سه رن است که رگلاتورها کمترین قابلیت اطمینان این مجموعه را تشکیل داده و به‌عنوان بحرانی‌ترین زیرسیستم این بخش شناسایی شده اند؛ و برای افزایش قابلیت اطمینان، بهینه کردن نگهداری و تعمیرات به‌موقع و مناسب این تجهیز پیشنهاد می شود. همچنین تست لاک‌آپ برای رگلاتور در زمان‌های بیشتری از سال و به‌صورت دوره‌ای، سبب می‌شود که بعدها نیازی به باز و بسته کردن زیاد رگلاتور نباشد و درنتیجه، خرابی‌های جانبی در سایر بخش‌ها کمتر و ایمنی بیشتری تضمین شود.

با توجه به ماهیت چنین مطالعاتی و وجود عدم قطعیت در نتایج این‌گونه مطالعات، در این تحقیق، امکان مقایسه ی نتایج این مطالعه با نتایج سایر مطالعات بیش از موارد ذکرشده، وجود نداشت. یکی از نقاط قوت این تحقیق، جدید بودن اجرای این روش در یکی از مراکز مهم و حساس خطوط انتقال گاز بوده و استفاده از تکنیک مدل‌سازی و شبیه‌سازی در ایستگاه تقلیل فشار با توجه به راهکارهای ارائه‌شده جهت بهینه نمودن سیستم، تجربیات مفیدی را به همراه داشته است که می‌توان در تدوین برنامه ی مناسب تعمیر و نگهداری تجهیزات ایستگاه‌های تقلیل فشار CGS استفاده نمود. اگرچه این مطالعه ارزیابی قابلیت اطمینان را بر اساس مدل‌سازی و شبیه‌سازی انجام داده است؛ اما همچنان محدودیت‌هایی وجود داشت که باید در نظر گرفته شود. برای مطالعات آتی، پیشنهاد می شود از روش شبیه‌سازی مونت کارلو-زنجیره ی مارکوف (MCMC[1]) استفاده گردد. به دلیل اینکه در این قبیل ایستگاه‌ها برخی از اجزا در مراحل مختلف دوره ی عمر خود دارای نرخ خرابی غیرثابت

1. Monte Carlo Markov Chain

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-04-17]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1402.13.2.4.3]

و متغیر با زمان هستند؛ لذا با استفاده از این روش‌ها می‌توان اثرات تغییرات زمانی نرخ شکست را که از ویژگی‌های پیوسته ی زمانی سامانه‌های پیچیده با طول عمر زیاد است، با دقت زیاد محاسبه کرد.

نتیجه گیری

این مقاله، کاربرد مدل‌سازی را برای تعیین تابع چگالی احتمال شکست تجهیزات و شبیه‌سازی مونت کارلو را برای محاسبه ی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های ایستگاه تقلیل فشار CGS نشان می‌دهد. بخش فیلتراسیون و تقلیل فشار، دارای بیشترین نرخ شکست بوده و نیاز به توجه بیشتری برای بهسازی ایستگاه دارند. همچنین می‌توان بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، یک برنامه ی مناسب تعمیر و نگهداری تجهیزات ایستگاه را توسعه داد.

تضاد منافع

پژوهش حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافعی برای نویسندگان نداشته است.

تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر برگرفته از پایان نامه دکتری بهداشت حرفه ای با کد اخلاق (IR.TUMS.SPH.REC.1400.151) تایید شده توسط دانشگاه علوم پزشکی تهران می باشد. 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 می نماید.

REFERENCES

1. Leoni L, BahooToroody A, 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;57:17-24.
2. Kiani D. Russia-EU Energy Partnership. Research Institute of Strategic Studies. 2016;(8):148.
3. Eskandari T, Aliabadi MM, Mohammadfam I. Dynamic Safety Analysis in CNG Stations Using a Hybrid Fault Tree Approach and Bayesian Network Techniques. Journal of Health and Safety at Work. 2019;9(4):261-4.
4. Shirali GA, Golbaghi A, Nematpour L. Comparison of Two Human Error Evaluation Techniques (HET and SHERPA) in Gas Supply Operations using AHP. Journal of Health and Safety at Work. 2021;10(4):376-90.
5. Austvik OG. The Energy Union and security-of-gas supply. Energy Policy. 2016;96:372-82.
6. Batzias FA, Siontorou CG, Spanidis PM. Designing a reliable leak bio-detection system for natural gas pipelines. J Hazard Mater. 2011;186(1):35-58.
7. Jahangiri M, Nourozi M, Sarebanzadeh K. Risk Managment, Part 2. Tehran: Fanavaran Press; 2013. [Persian].
8. Zarei E, Azadeh A, Khakzad N, Mirzaei Aliabadi M, Mohammadfam I. Dynamic safety assessment of natural gas stations using Bayesian network. J Hazard Mater. 2017;321:830-40.
9. Billinton R, Allan RN. Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques, 2nd Edition. Springer; 1992.
10. Billinton R, Allan RN. Reliability Evaluation of Power Systems, 2nd Edition. Plenum Press; 1996.
11. Chenani KT, Nodoushan RJ, Nodoushan MA, Boghri F, Madadizadeh F. The effect of integrated management system establishment on safety performance indices: Case study in one manufacturing industry. International Journal of Occupational Hygiene. 2021;13(3).
12. Omivari M, Davudi M, Javaheri N. The effect of safety system on production indices. International Journal of Occupational Hygiene. 2012;4(1):17-26.
13. Vesely WE, Stamatelatos M, Dugan J, Fragola J, Minarick J, Railsback J. Fault tree handbook with aerospace applications. NASA; 2002.
14. Cocozza-Thivent C, Eymard R, Mercier S. A finite-volume scheme for dynamic reliability models. IMA

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-04-17]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1402.13.2.4.3]

Journal of Numerical Analysis. 2006;26(3):446-71.
15. Li YY, Chen Y, Yuan ZH, Tang N, Kang R. Reliability analysis of multi-state systems subject to failure mechanism dependence based on a combination method. Reliab Eng Syst Saf. 2017;166:109-23.
16. Lin YH, Li YF, Zio E. Fuzzy reliability assessment of systems with multiple-dependent competing degradation processes. IEEE Trans Fuzzy Syst. 2014;23(5):1428-38.
17. Ramirez-Marquez JE, Coit DW. A Monte-Carlo simulation approach for approximating multi-state two-terminal reliability. Reliab Eng Syst Saf. 2005;87(2):253-64.
18. Shin J, Son H, Heo G. Development of a cyber-security risk model using Bayesian networks. Reliab Eng Syst Saf. 2015;134:208-17.
19. Lisagor O, Kelly T, Niu R. Model-based safety assessment: Review of the discipline and its challenges. In: Proceedings of 2011 9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety. IEEE; 2011. pp. 625-632.
20. Verma AK, Ajit SD, Karanki R. Reliability and Safety Engineering. Springer; 2016. Chapter 4, pp. 123-159.
21. Rimkevicius S, et al. Development of approach for reliability assessment of pipeline network systems. Appl Energy. 2012;94:22-33.
22. Li G, Bie Z, Kou Y, Jiang J, Bettinelli M. Reliability evaluation of integrated energy systems based on smart agent communication. Appl Energy. 2016;167:397-406.
23. Shan X, Wang P, Lu W. The reliability and availability evaluation of repairable district heating networks under changeable external conditions. Appl Energy. 2017;203:686-95.
24. Allan R, Billinton R. Probabilistic assessment of power systems. Proc IEEE. 2000;88(2):140-62.
25. Al-Dahidi S, Di Maio F, Baraldi P, Zio E. A locally adaptive ensemble approach for data-driven prognostics of heterogeneous fleets. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Risk and Reliability. 2017;1748006X1769351.
26. Dai J, Das D, Ohadi M, Pecht M. Reliability risk mitigation of free air cooling through prognostics and health management. Appl Energy. 2013;111:104-12.
27. Mo H-D, Li Y-F, Zio E. A system-of-systems framework for the reliability analysis of distributed generation systems accounting for the impact of degraded communication networks. Appl Energy. 2016;183:805-22.
28. Zio E. Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures. Reliab Eng Syst Saf. 2016;152:137-50.
29. Zio E. The Monte Carlo Simulation Method for System Reliability and Risk Analysis. Springer London; 2013.
30. Cadini F, Agliardi GL, Zio E. A modeling and simulation framework for the reliability/availability assessment of a power transmission grid subject to cascading failures under extreme weather conditions. Appl Energy. 2017;185:267-79.
31. Monforti F, Szikszai A. A MonteCarlo approach for assessing the adequacy of the European gas transmission system under supply crisis conditions. Energy Policy. 2010;38(5):2486-98.
32. Flouri M, Karakosta C, Kladouchou C, Psarras J. How does a natural gas supply interruption affect the EU gas security? A Monte Carlo simulation. Renew Sustain Energy Rev. 2015;44:785-96.
33. Awudu I, Zhang J. Stochastic production planning for a biofuel supply chain under demand and price uncertainties. Appl Energy. 2013;103:189-96.
34. Nanduri V, Saavedra-Antolínez I. A competitive Markov decision process model for the energy water climate change nexus. Appl Energy. 2013;111:186-98.
35. Xie S, He H, Peng J. An energy management strategy based on stochastic model predictive control for plug-in hybrid electric buses. Appl Energy. 2017;190:147-57.
36. Bassamzadeh N, Ghanem R. Multiscale stochastic prediction of electricity demand in smart grids using Bayesian networks. Appl Energy. 2017;193:369-80.
37. Verdejo H, Awerkin A, Saavedra E, Kliemann W, Vargas L. Stochastic modeling to represent wind power generation and demand in electric power system based on real data. Appl Energy. 2016;173:283-95.
38. Garshasbi S, Kurnitski J, Mohammadi Y. A hybrid Genetic Algorithm and Monte Carlo simulation approach to predict hourly energy consumption and generation by a cluster of Net Zero Energy Buildings. Appl Energy. 2016;179:626-37.
39. Hu M-C, Lu S-Y, Chen Y-H. Stochastic–multiobjective market equilibrium analysis of a demand response program in energy market under uncertainty. Appl

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-04-17]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1402.13.2.4.3]

Energy. 2016;182:500-6.
40. Marseguerra M, Zio E. Monte Carlo approach to PSA for dynamic process systems. Reliab Eng Syst Saf. 1996;52(3):227-41.
41. Wu J, Zhou R, Xu S, Wu Z. Probabilistic analysis of natural gas pipeline network accident based on Bayesian network. J Loss Prev Process Ind. 2017;46:126-36.
42. Yuhua D, Datao Y. Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis. J Loss Prev Process Ind. 2005;18(2):83-8.
43. Teixeira A, Soares CG, Netto T, Estefen S. Reliability of pipelines with corrosion defects. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2008;85(4):228-37.
44. Caleyo F, Gonzalez J, Hallen J. A study on the reliability assessment methodology for pipelines with active corrosion defects. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2002;79(1):77-86.
45. Heidari Nouqabi H, Ataei M, Khalou Kakaei R. Modeling and Simulation of Haulage System Reliability Case Study: Zarmehr Gold Mine Torbat Heydariyeh. Shahrood University of Technology Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics; 2015.

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-04-17]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1402.13.2.4.3]