

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Developing an Integrated Framework to Reduce Uncertainty in Process Risk Assessment Based on Dempster-Shafer Evidence Theory and Bayesian Network: A Case Study in Oil Reservoirs Using Multiple Sources of Evidence

Kazem Samimi¹, Esmaeil Zareie^{2,3}, Mohsen Omidavar⁴, Javad Ghyasi⁵, Parham Azimi⁶, Mostafa Pouyakian^{1,*}

¹ Department of occupational health and safety engineering, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti 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, Faculty of Health and Nutrition, Bushehr University of Medical Sciences, Bushehr, Iran

⁵ HSE Department, National Iranian Oil Product Distribution Company (NIOPDC), Tehran, Iran

⁶ Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial and Mechanical Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

Received: 27/1/2025

Accepted: 8/7/2025

ABSTRACT

Introduction: Fire risk assessment in oil storage tanks faces challenges due to incomplete, conflicting, and uncertain data, particularly when empirical evidence is limited. Traditional point-based likelihood estimates often fail to capture expert doubt and epistemic uncertainty. This study aims to develop and evaluate a novel hybrid framework combining Dempster-Shafer Theory (DST) and Bayesian Networks (BN) to improve the trustworthiness of fire risk prediction in such industrial settings.

Material and Methods: The proposed approach integrates DST to model expert uncertainty through interval probabilities (Bel-Pl) and BN to dynamically update causal relationships as new information appears. The study implements computational coding to enable DST calculations for five expert opinions across 243 scenarios, overcoming prior limitations in multi-expert modeling due to computational complexity.

Results: The hybrid DST-BN framework demonstrated superior ability to incorporate incomplete and conflicting expert data, reducing overconfidence linked to point estimates. Interval probabilities offered more trustworthy representations of epistemic uncertainty, while BN integration allowed traceable and adaptable causal modeling. The computational solution facilitated practical application of DST with multiple experts, enhancing the strength of the risk assessment.

Conclusion: This research provides an effective DST-BN hybrid methodology for assessing fire risk in fixed-roof oil tanks, improving accuracy and trustworthiness in complex industrial environments. By addressing the shortcomings of point-based methods and enabling multi-expert participation, the framework supports clearer and more defensible probabilistic inferences. Future work may focus on integrating real-time sensor data and AI-based decision systems to further strengthen dynamic risk assessment capabilities.

Keywords: Dempster-Shafer Theory; Bayesian Network; fire risk assessment; storage tanks; uncertainty handling; industrial safety

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Samimi K., Zareie E., Omidavar M., Ghyasi J., Azimi P., Pouyakian M. Developing an Integrated Framework to Reduce Uncertainty in Process Risk Assessment Based on Dempster-Shafer Evidence Theory and Bayesian Network: A Case Study in Oil Reservoirs Using Multiple Sources of Evidence. *J Health Saf Work.* 2025; 15(3): 532-557.

* Corresponding Author Email: pouyakian@sbmu.ac.ir.

1. INTRODUCTION

Storage tanks play a crucial role in the oil and chemical sectors, serving as vessels for holding raw, intermediate, or finished products. Particularly, fixed roof tanks found in petroleum depots store significant amounts of hazardous and flammable substances. Incidents such as fires, explosions, and release of dangerous materials can result in devastating consequences for both people and finances. Among these incidents, pool fires frequently occur in oil tank facilities. Conventional techniques like Fault Tree Analysis (FTA) have been commonly used for risk evaluation; however, they face challenges in managing uncertainties arising from incomplete information, simplified models, and the assumption that events occur independently. These uncertainties, which can be categorized as aleatory and epistemic, have the potential to greatly undermine the reliability of risk assessments. In recent years, a variety of methods, including fuzzy logic, Bayesian Networks (BN), and Dempster-Shafer Theory (DST), have been employed to tackle these uncertainties.

The primary drawback of the Bayesian Network (BN)-based method lies in its dependence on single-point probability estimates. Root nodes need to be initialized probabilistically, but often, the available data and information are quite sparse. Consequently, the insights of experts become the main source of data. Similarly, fuzzy theory depends on traditional sets referred to as fuzzy expressions. Employing linguistic terms in fuzzy logic to handle uncertainty in risk assessment can be problematic, largely due to the vague and subjective nature of these terms. While fuzzy logic offers tools for quantifying uncertainty, terms can be interpreted in various ways, potentially leading to errors in judgment. A significant challenge arises from the fact that linguistic expressions are inherently subjective, resulting in different interpretations among experts, which can cause inconsistent assessment results. Additionally, fuzzy models that utilize natural language often struggle to effectively capture all facets of risk, particularly in intricate scenarios that demand precise data. Moreover, merging fuzzy models with traditional statistical and probabilistic approaches is challenging, as linguistic terms are qualitative and lack the necessary numerical accuracy, limiting thorough risk analysis. As a result, it appears that estimates of event probabilities are fundamentally shaped by epistemic uncertainty, and data frequently remain

incomplete, inconsistent, and at times, difficult to validate empirically.

Previous research has introduced various frameworks for assessing safety risks, primarily utilizing Bayesian Networks (BN) or Dempster-Shafer Theory (DST) on their own, each possessing distinct advantages and drawbacks. Bayesian networks excel at handling probabilistic reasoning and identifying conditional dependencies; however, they struggle when faced with significant uncertainty or conflicting data. On the other hand, Dempster-Shafer Theory is proficient in addressing uncertainty and synthesizing information from diverse sources, although it lacks the ability to visually depict causal connections, which is a strong suit of Bayesian Networks.

This study aims to introduce and implement a combined framework that integrates both Bayesian Networks and Dempster-Shafer Theory, with the goal of improving the precision and dependability of fire risk evaluations in oil storage tanks. The suggested framework is designed to accommodate incomplete and uncertain data from various origins, effectively model the causal relationships between different events, and produce reliable results even when information is scarce. By doing so, it enables decision-makers to obtain a clearer understanding of the risk levels involved and facilitates more informed choices regarding the establishment of preventive strategies and emergency protocols.

2. MATERIAL AND METHODS

This study adopted a comprehensive multi-step approach to develop a hybrid DST-BN framework for conducting risk assessments. The research focused on an oil product depot located in South Khorasan province, Iran, which featured fixed roof tanks for diesel storage. The initial phase involved identifying hazards through consultations with experts and on-site evaluations. A pool fire scenario was chosen as the main risk factor. A thorough fault tree was created, consisting of 47 basic events and 23 intermediate events. Expert assessments regarding the probabilities of basic events were gathered using a three-tier scale: true (T), false (F), and unknown (T, F), allowing for the incorporation of uncertainty through DST. Basic Probability Assignments (BPAs), along with belief (Bel) and plausibility (Pl) values, were calculated in accordance with DST principles using RStudio programming. Creating a reliable fault tree requires the collaboration of various experts, bringing together their knowledge

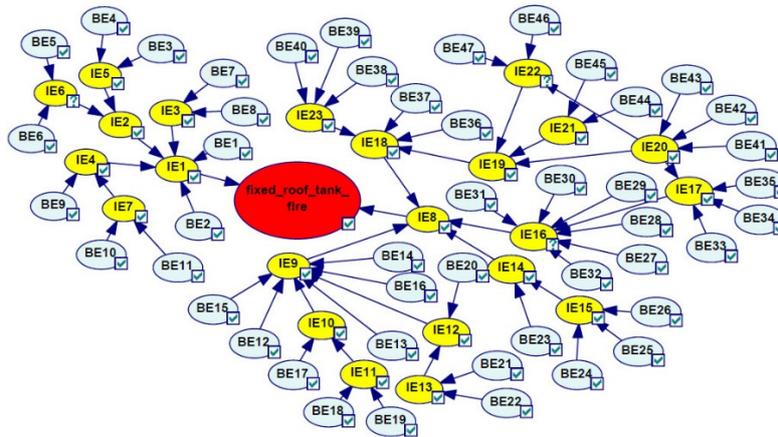


Fig. 1: Bayesian network related to the pool fire scenario in the studied tanks

Table 1: Key outcomes from DST and BN integration for the top event

Event	Bel (%)	Pl (%)
Pool fire in fixed roof tank	1.0	4.0

and experience. To combine the individual insights from these experts, specific rules were employed. The Dempster-Shafer (DS) combination rule was initially the most popular choice, though numerous alternative versions have emerged since then. This DS combination rule utilizes a normalization factor $(1 - k)$ to reconcile information gathered from diverse sources, disregarding any conflicting evidence during this normalization process. The rule operates on an AND-type principle to merge insights from independent sources. For instance, if $m_1(p_a)$ and $m_2(p_b)$ represent two pieces of evidence regarding the same occurrence from separate experts, the DS combination rule applies Eq.1 to integrate this evidence.

$$m_{1-2}(p_i) = \begin{cases} 0 & \text{for } p_i = \emptyset \\ \frac{\sum_{p_a \cap p_b = p_i} m_1(p_a) \times m_2(p_b)}{1 - k} & \text{for } p_i \neq \emptyset \end{cases} \quad (1)$$

In the aforementioned equation, m_{1-2} signifies the joint expertise of the two specialists regarding the event, while k quantifies the level of disagreement between them. This is established in the following manner (see Eq. 2):

$$K = \sum_{p_a \cap p_b = \emptyset} m_1(p_a) \times m_2(p_b) \quad (2)$$

These findings were then fed into a Bayesian Network constructed with GeNIe software, facilitating probabilistic reasoning and sensitivity

analysis based on the latest evidence.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The main findings are as follows:

- A fault tree was developed featuring 47 fundamental events and 23 intermediate events.
- Values for BPA, Belief (Bel), and Plausibility (Pl) were determined for each fundamental event using expert contributions.
- A Bayesian Network was created that integrates probabilities derived from DST as shown in Figure 1.
- The concluding estimates for fire probability show in Table 1.

This research highlights that interval probabilities (Bel–Pl) offer a more dependable depiction of uncertainty compared to single-point estimates. By utilizing Dempster-Shafer Theory (DST), the study incorporated expert uncertainty (expressed as “I don’t know”), which minimized the pressure to make definitive choices and improved clarity in probabilistic reasoning. Interval-based measures prove to be more effective at addressing epistemic uncertainty, especially when there is a lack of empirical data, unlike traditional point-based probabilities. The combination of DST with Bayesian Networks (BN) allows for the flexible updating of probabilities in light of new information, all while preserving the ability to follow causal links.

Previous models based on DST often restricted

the number of expert inputs due to the complexity of calculations. This study addresses that limitation by developing a coding system that processes DST calculations for combinations involving five experts across 243 different scenarios, thereby enhancing the system's robustness.

4. CONCLUSIONS

This research introduced an innovative hybrid DST-BN framework aimed at evaluating fire risks in fixed-roof oil tanks. The key takeaways include:

- The DST-BN model effectively merges incomplete, contradictory, and uncertain data.
- Interval probabilities (Bel-Pl) help mitigate overconfidence that can come with point estimates.
- The computational coding facilitates the practical use of multi-expert DST in real-life applications.
- This method improves both accuracy and reliability in predicting fire risks within complex industrial settings.
- Future research could consider the integration of real-time sensor data and AI-driven decision-making systems.

توسعه یک چارچوب تلفیقی به منظور کاهش عدم قطعیت در ارزیابی ریسک فرآیندی با تکیه بر نظریه شواهد دمپستر شافر و شبکه بیزین

کاظم صمیمی^۱، اسماعیل زارعی^{۲،۳}، محسن امیدوار^۴، جواد قیاسی^۵، پرهام عظیمی^۶، مصطفی پویاکیان^{۱*}

^۱گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی تهران، ایران

^۲گروه علوم ایمنی، دانشکده هوانوردی، دانشگاه هوانوردی امبری-ریدل، پرسکات، آریزونا، آمریکا

^۳موسسه ایمنی رابرتسون، دانشگاه هوانوردی امبری-ریدل، پرسکات، آریزونا، آمریکا

^۴گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی بوشهر، ایران

^۵دپارتمان HSE، شرکت ملی پخش فرآورده‌های نفتی ایران، تهران، ایران

^۶گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۴/۱۷

مکیده

مقدمه: ارزیابی ریسک حریق در مخازن ذخیره‌سازی نفت با چالش‌هایی مانند داده‌های ناقص، متناقض و نامطمئن و به‌ویژه محدودیت شواهد تجربی روبرو است. مطالعات قبلی مبتنی بر شبکه‌های بیزی بر پایه مقادیر نقطه‌ای اغلب در بازتاب تردیدهای کارشناسان و عدم قطعیت شناختی ناکام می‌مانند. این مطالعه با هدف توسعه و ارزیابی یک چارچوب ترکیبی نوآورانه بر پایه تلفیق نظریه دمپستر-شافر (DST) و شبکه‌های بیزی (BN) انجام شده است تا قابلیت اطمینان ارزیابی ریسک حریق را از طریق در نظر گرفتن میزان «تردید کارشناسان در احتمال وقوع رویدادهای پایه» در چنین محیط‌های صنعتی بهبود بخشد.

روش کار: روش پیشنهادی از نظریه دمپستر-شافر برای مدل‌سازی عدم قطعیت کارشناسی از طریق احتمالات بازه‌ای (اعتماد - مقبولیت) استفاده می‌کند و شبکه‌های بیزی را برای به‌روزرسانی پویا و دینامیک روابط علی با ورود اطلاعات جدید به کار می‌گیرد. در این مطالعه ترکیب پیچیده نظرات شواهد متعدد با رویکرد DST از طریق طراحی کدهای محاسباتی در نرم افزار Rstudio انجام شده است. مطالعه موردی بر اساس روش پیشنهادی در یک مجتمع انبار فرآورده‌های نفتی در سال ۱۴۰۳ پیاده‌سازی شده است.

یافته‌ها: چارچوب ترکیبی DST-BN توانایی برتر خود را در ادغام داده‌های ناقص و متناقض کارشناسان نشان داد و از اعتماد مبالغه آمیز ناشی از برآوردهای نقطه‌ای مربوط به احتمال وقوع رویدادها جلوگیری کرد. احتمالات بازه‌ای نمایش‌های قابل اطمینان‌تری از عدم قطعیت شناختی ارائه دادند و از طرفی تلفیق BN امکان مدل‌سازی علی قابل ردیابی و قابل به‌روزرسانی را فراهم کرد. راه‌حل محاسباتی ارائه‌شده کاربرد عملی DST با چند کارشناس را امکان‌پذیر و قدرت ارزیابی ریسک را تقویت نمود.

نتیجه‌گیری: این پژوهش یک روش ترکیبی مؤثر بر پایه DST-BN برای ارزیابی ریسک حریق در مخازن نفتی با سقف ثابت ارائه می‌دهد که دقت و قابلیت اطمینان را در محیط‌های صنعتی پیچیده بهبود می‌بخشد. با رفع نواقص روش‌های مبتنی بر مقادیر نقطه‌ای و تسهیل مشارکت چندین کارشناس، این چارچوب استنتاج‌های احتمالاتی شفاف‌تر و قابل دفاع‌تر ارائه می‌کند. مطالعات آینده می‌توانند بر یکپارچه‌سازی داده‌های لحظه‌ای حسگرها و سامانه‌های تصمیم‌یار مبتنی بر هوش مصنوعی برای تقویت بیشتر توان ارزیابی پویا متمرکز شوند.

کلمات کلیدی: نظریه دمپستر شافر، شبکه بیزی، ارزیابی ریسک حریق، مخازن ذخیره، مدیریت عدم قطعیت،

ایمنی صنعتی

مقدمه

در حوادث شناخته شده‌اند و به ترتیب در رتبه اول و دوم در بین انواع مخازن با بیشترین تکرار قرار گرفته‌اند. بر اساس یافته‌های این مطالعه، محتمل‌ترین پیامد (۱۴۵ مورد) حاصل از حوادث ناخواسته در مخازن ذخیره‌سازی، حریق است. Ahmadi و همکاران (۱) سناریوهای اصلی حریق در مخازن ذخیره‌سازی جوی را در ۱۰۴ حادثه مورد بررسی قرار دادند. رویدادهای اصلی منجر به حریق به ترتیب زیر معرفی شدند: آتش ریم سیل، انفجار داخلی، سرریز، غرق شدن سقف و شکست تانک. مخازن اتمسفریک سقف شناور خارجی بیشترین تعداد حوادث را (۵۴٪) داشتند، به دنبال آن مخازن با سقف شناور داخلی (۲۷٪) و سقف‌های ثابت (۱۸٪) قرار گرفتند. Zheng و همکاران (۷) حوادث حریق را در تالیسات ذخیره‌سازی مواد شیمیایی چین حداقل سالهای ۱۹۵۹ تا ۲۰۰۹ مورد بررسی قرار دادند. آنها اعلام نمودند عامل ۵۰ درصد از کل حوادث در این سالها احتراق نفت خام، بنزین و گازوئیل در مخازن اتمسفریک بوده است و ۱۲٪ از کل حوادث حریق، در انبار فرآورده‌های نفتی اتفاق افتاده است.

برای شناسایی و ارزیابی ریسک حوادث حریق در انبار فرآورده‌های نفتی از روش‌های گوناگون به ویژه روش تجزیه و تحلیل درخت خطا (FTA) بهره گرفته می‌شود. با این حال، این روش با چالش‌هایی مانند عدم قطعیت ناشی از داده‌های ناقص، مدل‌سازی ساده‌انگارانه، و فرض استقلال میان رویدادها مواجه است (۸). عدم قطعیت، پدیده‌ای پیچیده و تقریباً فراگیر در شرایط دنیای واقعی است. تعریف آن می‌تواند با توجه به زمینه کاری فرد کمی تفاوت داشته باشد اما عموماً به وضعیتی اطلاق میگردد که در آن دانش نسبت به یک اقدام، رویداد یا نتیجه، ناقص یا محدود است. این وضعیت ممکن است از کمبود اطلاعات، عوامل زمینه‌ای تأثیرگذار یا حتی متناقض با داده‌های موجود، یا منابع شناخته و ناشناخته دیگر ناشی شود (۹). (۱۰). با این حال، باید توجه داشت که وجود عدم قطعیت الزاماً به معنای اشتباه بودن قضاوت یا نتیجه‌گیری نیست (۱۱). در تحلیل‌های کمی ریسک (QRA)، دو نوع از عدم

مخازن ذخیره مواد شیمیایی در صنایع نفتی و شیمیایی برای نگهداری مواد اولیه، میانی، یا محصولات نهایی استفاده می‌شوند. این مخازن با شکل‌ها و ویژگی‌های کارکردی متفاوت عموماً در محدوده‌هایی خارج از منطقه فرایندی در کنار هم ساخته می‌شوند. به این محدوده‌ها، انبار فرآورده‌های نفتی گفته می‌شود. مقادیر زیادی از مواد خطرناک و قابل اشتعال در این انبارها نگهداری می‌شوند و وقوع یک حادثه در محدوده‌ی مخازن می‌تواند تلفات انسانی و مالی بسیار زیاد و توقف خدمات برای چند روز را در پی داشته باشد. حریق، انفجار و رهایش مواد خطرناک سه حادثه اصلی در مخازن نفتی هستند. با اینکه انفجارها به خاطر مرگ و میر بالا و خسارت‌های گسترده بطور ویژه مورد توجه هستند اما مطالعات نشان می‌دهد که انواع مختلف حریق، بیشترین فراوانی را بین این سه نوع حادثه داراست (۱-۳). انواع مختلفی از حریق در مخازن نفتی ممکن است اتفاق بیفتد، از جمله حریق فورانی^۱ که در اثر احتراق گاز تحت فشار خروجی از یک سوراخ ایجاد می‌شود (۴)، و حریق ناگهانی^۲ که شامل احتراق کوتاه‌مدت گازهای قابل اشتعالی است که در محدوده اشتعال‌پذیری قرار دارند (۵). هنگامی که یک مایع قابل اشتعال در اطراف مخزن انباشته می‌شود در حضور یک منبع جرقه می‌تواند حریق استخری^۳ ایجاد شود (۶). چندین مطالعه درباره حوادث و خطرات مرتبط با مخازن ذخیره‌سازی و محتویات آن‌ها انجام شده است. Chang و Lin (۲) حوادث رخ داده در مخازن ذخیره‌سازی از سال ۱۶۹۰ تا ۲۰۰۳ را مورد بررسی قرار دادند. یافته‌های این مطالعه بر اساس ۲۴۲ حادثه نشان می‌دهد که ۴۷٪ از حوادث در مخازن ذخیره‌سازی محصولات نفتی مانند نفت کوره، گازوئیل، نفت سفید، روغن‌های روان‌کننده، بنزین و نفتا رخ داده است. مخازن سقف شناور خارجی و مخازن با سقف ثابت به عنوان معمول‌ترین انواع مخازن

1. Jet Fire
2. Flash Fire
3. Pool Fire

موجود در دانش تخصصی بوده و رابطه میان یک مقدار نامعین (مانند احتمال وقوع یک رویداد) و تابع عضویت را که مقداری بین صفر تا یک دارد، بیان می‌کند (۱۴). مطالعات مبتنی بر نظریه مجموعه‌های فازی در FTA می‌تواند در مقالات Mahmood و همکاران (۲۰۱۳) و Kabir و Papadopoulos (۲۰۱۳) یافت شود (۱۵، ۱۶). رویکرد FFTA به طور عمده در مطالعات برای مقابله با عدم قطعیت شناختی مورد استفاده قرار گرفته است (۱۷) مدل‌های گرافیکی موسوم به شبکه‌های بیزی، بر پایه قانون بیز ساخته شده‌اند و برای نمایش روابط آماری بین متغیرها به کار می‌روند. شبکه‌های بیزی به صورت گراف غیر چرخه‌ای جهت دار (DAG)^۵ طراحی می‌شوند، جایی که هر گره معرف یک متغیر و کمانها نشان‌دهنده وابستگی‌های علت و معلولی میان آن‌ها هستند (۱۸). با وجود چالش‌هایی مانند نیاز به تعیین احتمالات اولیه دقیق یا پیچیدگی‌های محاسباتی، قدرت این ابزار در مدل‌سازی مسائل پیچیده و تحلیل داده‌های ناقص، جایگاه آن را در بسیاری از علوم حفظ کرده است. درمهندسی ایمنی و قابلیت اطمینان سیستم، BN اغلب به منظور مدل‌سازی وابستگی گره‌ها و به روز رسانی احتمال وقوع رویدادها استفاده شده است. Bobbio و همکاران (۲۰۰۱) و خاکزاد و همکاران (۲۰۱۱) ترسیم ساختار درخت خطا را در شبکه بیزی برای سیستم‌های large-safety critical systems پیشنهاد کردند (۱۹، ۲۰). به همین ترتیب خاکزاد و همکاران (۲۰۱۳) الگوریتمی برای ترسیم نمودار بوتای در شبکه بیزی ابداع نمودند (۲۱). نظریه شواهد اولین بار توسط Dempster در سال ۱۹۶۷ معرفی شد و Shafer در سال ۱۹۷۶ آن را گسترش داد. لذا به عنوان نظریه دمپستر شافر^۶ (DST) نیز شناخته می‌شود و برای غلبه بر عدم قطعیت و عدم دقت موجود در شواهد استفاده می‌شود (۲۲). هنگام استفاده از نظرات خبرگان به منظور تعیین احتمال وقوع رویدادهای پایه ممکن است کارشناسان مختلف عقاید متناقض و ناقصی

قطعیت‌ها معمولاً در استفاده از دانش تخصصی مورد توجه قرار می‌گیرند، یکی «عدم قطعیت تصادفی»^۱ و دیگری «عدم قطعیت شناختی»^۲ (۱۲). عدم قطعیت تصادفی ناشی از تنوع طبیعی، تصادف یا ناهمگونی ذاتی در یک سیستم فیزیکی است. این نوع عدم قطعیت در صورتی که داده‌های آزمایشی کافی وجود داشته باشد، از طریق روش‌های مبتنی بر احتمال به خوبی قابل مدل‌سازی است (۱۳). از سوی دیگر، عدم قطعیت شناختی به مواردی همچون ابهام، نادقیق بودن، ناآگاهی، یا کمبود اطلاعات در مورد رفتارهای سیستم اشاره دارد.

این عدم قطعیت‌ها می‌توانند دقت و اعتماد نتایج ارزیابی ریسک را کاهش دهند. ابهامات ناشی از عدم قطعیت مدل و محدودیت‌های مدل جزء غیرقابل اجتناب از FTA در سیستم‌های پیچیده مهندسی هستند که منجر به عدم قطعیت تصادفی در ساختار درخت خطا می‌گردند. کمبود داده و دسترسی محدود به داده، عدم شفافیت و ابهام در داده‌های موجود و کمبود دانش متخصصین در این حوزه نیز منجر به عدم قطعیت شناختی در ترسیم درخت خطای حریق مخازن نفتی می‌گردند. روش‌هایی مانند نظریه مجموعه‌های فازی، شبکه‌های بیزی^۳ و اخیراً نظریه شواهد^۴ از جمله رویکردهایی هستند که در سالهای اخیر برای مدیریت و کاهش عدم قطعیت مورد استفاده قرار گرفته است. لیکن این رویکردها، هرکدام دارای محدودیت‌هایی هستند.

نظریه مجموعه‌های فازی که نخستین بار توسط پروفیسور لطفی زاده در سال ۱۹۶۵ مطرح شد، ابزاری مؤثر برای بیان عدم قطعیت‌هایی است که با نظریه احتمال به درستی قابل توصیف نیستند. این نظریه، زبانی با ساختار نحوی و معنایی ارائه می‌دهد تا بتوان دانش کیفی را به استدلال کمی و عددی تبدیل کرد. مفاهیم اصلی در این نظریه شامل «عدد فازی» و «تابع عضویت» است. عدد فازی، بازتابی از ابهام و ذهنیت

1. Aleatory uncertainty
2. Epistemic uncertainty
3. Bayesian Network (BN)
4. Evidence Theory

5. Directed Acyclic Graph
6. Dempster Shafer

مقبولیت A بیشترین میزانی است که ممکن است A رخ دهد (شواهدی که با A در تعارض نیستند). یعنی اگر دانش ما درباره وقوع A ناقص یا مبهم باشد، این بازه به جای مجبور کردن ما به یک عدد دقیق (غالباً اشتباه)، «فضایی امن برای تصمیم‌گیری» فراهم می‌کند. لذا ارائه احتمال وقوع رویداد در قالب بازه‌ای بین معیار اعتماد و مقبولیت به ما اجازه می‌دهد با اطلاعات ناقص یا مبهم هم تصمیم بگیریم، از تصمیم‌گیری‌های پر ریسک در شرایط بحرانی اجتناب شود، با ورود داده‌های جدید، بازه کوچکتر و اطمینان بیشتر می‌شود و به جای اجبار در اعلام یک عدد قطعی که ممکن است اشتباه باشد، واقع‌گرایی بیشتری دارد.

مرور تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که رویکردهای قبلی قادر به تجزیه و تحلیل موثر داده‌های حاصل از منابع اطلاعاتی متنوع به نحوی که به عنوان ورودی برای یک مکانیزم ارزیابی ریسک قابل استفاده باشند، نیستند لذا موضوع کاربرد DST به منظور افزایش قابلیت اطمینان در فرایند ارزیابی ریسک ایمنی در سیستم‌های پیچیده موضوع نوینی است که در سالهای اخیر مورد توجه متخصصین این حوزه قرار گرفته است. Rathman و همکاران (۲۰۱۸) (۲۳) یک رویکرد نوآورانه برای مدل‌سازی سمیت شیمیایی با استفاده از DST پیشنهاد دادند. آن‌ها به صورت سیستماتیک اطلاعات مختلف را یکپارچه‌سازی کردند و درجه عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های خود را تخمین زدند. همچنین با استفاده از این نظریه، Hatefi و همکاران (۲۰۱۹) (۲۴) یک مدل شواهدی برای ارزیابی ریسک زیست محیطی پیشنهاد دادند. Wu و همکاران (۲۰۱۷) (۲۵)، یزدی و همکاران (۲۰۲۰) (۲۶) و Li و همکاران (۲۰۱۸) (۲۷) نیز در مطالعات خود از این رویکرد استفاده کرده‌اند. در این مطالعات و مطالعات مشابه قبلی به دلیل پیچیده شدن ترکیب نظرات خبرگان حداکثر نظرات دو خبره ترکیب شده است و این در حالی است که در این مطالعه با ترکیب نظرات ۵ خبره عملاً گام مهمی در جهت افزایش صحت و دقت نتایج مطالعه برداشته شده است. اهمیت این موضوع زمانی نمایان می‌شود که بدانیم تعداد

داشته باشند. ناآگاهی، ناهماهنگی و ناقص بودن دانش کارشناسان را می‌توان با کمک این نظریه برطرف کرد. شواهد در نظریه دمستر شافر به مجموعه‌ای از اطلاعات یا داده‌ها اشاره دارد که می‌توانند به یک یا چند رویداد ممکن مرتبط باشند مثلاً داده‌های سنسورهای یک ماشین صنعتی یا نظرات متخصصین متعدد در یک موضوع خاص وغیره. بر خلاف نظریه احتمال سنتی که شواهد را فقط به یک رویداد خاص اختصاص می‌دهد نظریه دمپستر شافر اجازه می‌دهد شواهد به مجموعه‌ای از رویدادها اختصاص داده شوند این شواهد می‌توانند به صورت مجموعه‌ها یا بازه‌ها بیان شوند و نیازی به فرضیات اضافی درباره احتمال رویدادهای منفرد درون مجموعه ندارند. DST معمولاً با استفاده از تابع اساسی جرم^۱ (BPA)، قانون ترکیب D-S و چند گزاره مهم اولیه دیگر بیان می‌شود. ویژگی اساسی DST این است که بر پایه نظریه بیز استوار است و بر اساس عبارات قراردادی (نظریه فازی) بنا نشده است. همچنین در مقایسه با شبکه‌های بیزی که آنها نیز بر اساس نظریه بیز هستند و به احتمالات نقطه‌ای می‌پردازند DST به جای نسبت دادن احتمال به رخدادها منفرد ناسازگار، احتمال‌ها به مجموعه‌ای از رخدادها نسبت داده می‌شوند. در روشهای قبل جمع‌آوری نظرات خبرگان در خصوص احتمال وقوع یک نقص و میزان تاثیر آن بر وقوع رویدادهای بالادستی از طریق پاسخهای "بله" و "خیر" و یا "عبارات فازی" انجام می‌گردد در حالی که در روش دمپستر شافر گزینه "نمیدانم" و به عبارتی تردید خبرگان نیز به گزینه‌ها اضافه شده است. این گزینه سبب می‌شود تا خبرگان در شرایط عدم اطمینان از پاسخ، یکی از دو گزینه را از روی ناچاری انتخاب نکنند. لذا قدرت پاسخ‌های قطعی بله یا خیر افزایش می‌یابد. در جمع‌بندی نهایی، نظرات خبرگان بر پایه بازه‌ای از احتمال بین تابع اعتماد^۲ و تابع مقبولیت^۳ ارائه می‌گردد. به طور ساده تابع اعتماد A کمترین میزانی است که می‌توان با اطمینان گفت A رخ می‌دهد (شواهد مستقیم) و تابع

1. Basic Probability Assignment
2. Belief
3. Plausibility

حالات ترکیب نظرات شواهد با دو خبره ۹ حالت و با ۵ خبره ۲۴۳ حالت متفاوت خواهد بود.

نقطه ضعف اصلی مطالعات قبلی مبتنی بر کاربرد شبکه های بیزی این است که نیاز به مقادیر نقطه‌ای از احتمالات وجود دارد. گره‌های ریشه باید به صورت احتمالی مقداردهی شوند، اما معمولاً اطلاعات و داده‌ها به طور قابل توجهی کم هستند. بنابراین، نظرات متخصصان بیشترین منبع داده را تشکیل می‌دهد (۲۸). نظریه فازی نیز مبتنی بر استفاده از مجموعه های قراردادی به نام عبارات فازی است. استفاده از عبارات کلامی در نظریه فازی برای مدیریت عدم قطعیت در ارزیابی ریسک با چالش‌هایی همراه است که عمدتاً از ویژگی‌های مبهم و ذهنی این واژگان ناشی می‌شود. هرچند منطق فازی ابزارهایی برای بیان عدم قطعیت به شکل عددی ارائه می‌دهد، اما استفاده از واژه‌هایی چون «کم» یا «زیاد» ممکن است باعث برداشت‌های گوناگون و تفسیرهای نادرست گردد (۲۹). یکی از مهم‌ترین مشکلات این است که عبارات کلامی، به دلیل ذهنی بودن، موجب تفاوت در تفسیر میان متخصصان مختلف می‌شوند؛ مسئله‌ای که می‌تواند به نتایج ارزیابی متناقض منتهی شود. همچنین، مدل‌های فازی که بر زبان طبیعی تکیه دارند، به‌خصوص در شرایط پیچیده‌ای که نیاز به داده‌های دقیق است، نمی‌توانند تمامی وجوه ریسک را به‌خوبی بیان کنند (۳۰). از سوی دیگر، یکی کردن مدل‌های فازی با روش‌های آماری و احتمالاتی کلاسیک نیز کار دشواری است؛ چرا که اصطلاحات زبانی، ماهیتی کیفی دارند و تعیین مقدار دقیق برای متغیرهای کیفی و نامشخص دشوار است توصیف‌گرها یا مقیاس‌های زبانی فقط می‌توانند مقدار نسبی اما نه مقدار دقیق مقدار اندازه‌گیری شده را ثبت کنند (۳۱). لذا به نظر می‌رسد که برآوردهای احتمال وقوع رویدادها به طور ذاتی تحت تأثیر عدم قطعیت شناختی (دانشی) قرار دارند و داده‌ها با ناتمامیت^۱، ناسازگاری^۲ و گاهی اوقات دشواری در تعیین تجربی مواجه هستند.

همچنین چارچوب‌های آرایه شده در مطالعات پیشین

1. incompleteness
2. incoherency

برای ارزیابی ریسک ایمنی معمولاً به طور مستقل از نظریه شبکه‌های بیزی^۲ و یا نظریه دمپستر شافر استفاده می‌کنند که هر کدام نقاط قوت و ضعف خاص خود را دارند. BN برای استدلال احتمالی و کمی‌سازی وابستگی‌های شرطی مناسب است، اما در مواجهه با شواهد بسیار نامطمئن یا متناقض محدودیت دارد. از سوی دیگر، DST در مدیریت عدم قطعیت و ترکیب شواهد از منابع مختلف برتری دارد، اما فاقد قابلیت نمایش روابط علی به شکل بصری است که BN ارائه می‌دهد.

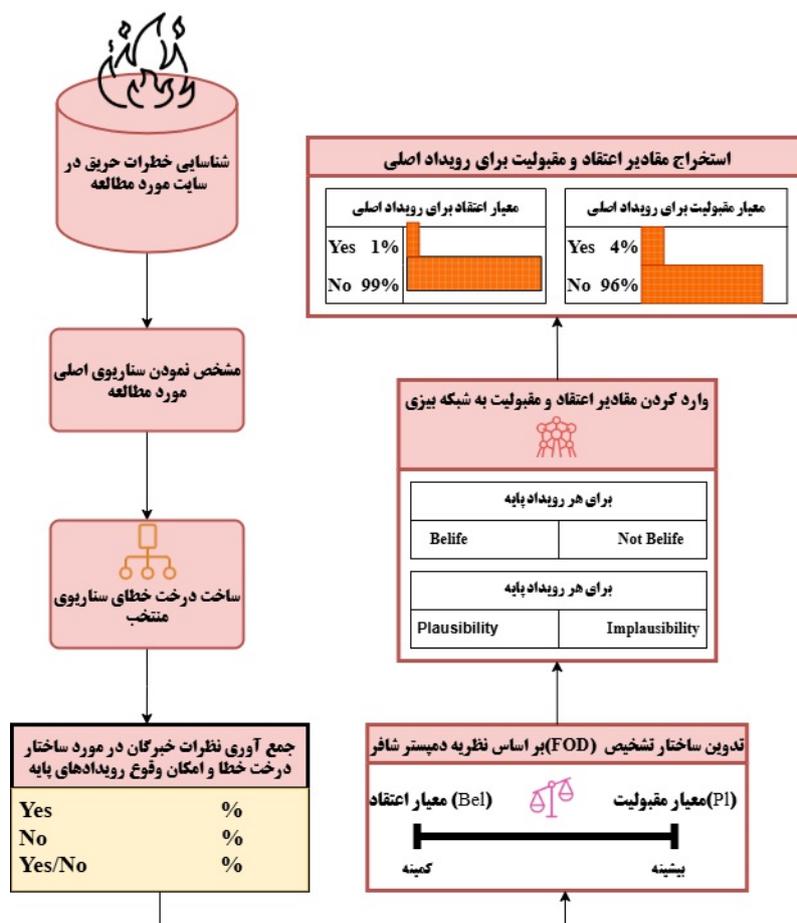
این پژوهش با هدف ارائه و کاربرد یک چارچوب ترکیبی مبتنی بر BN و DST انجام شده است تا بتواند دقت و قابلیت اعتماد ارزیابی ریسک آتش‌سوزی در مخازن نفتی را بهبود بخشد. این چارچوب پیشنهادی قادر است داده‌های ناقص و نامطمئن را از منابع مختلف ادغام کرده، در عین حال روابط علی میان رویدادها را به صورت ساختاری مدل‌سازی نماید و از منابع داده‌ای با اطلاعات کم نتایج قوی بدست آورد. این مقاله دستاوردهایی به شرح ذیل ارائه می‌کند که از این طریق، تصمیم‌گیرندگان می‌توانند تصویر دقیق‌تری از سطح ریسک داشته باشند و در طراحی اقدامات پیشگیرانه و واکنش اضطراری، تصمیمات اثربخش‌تری اتخاذ کنند: اول بهبود قابلیت اطمینان تحلیل درخت خطا (FTA) در حوادث حریق انبارهای فرآورده‌های نفتی به‌عنوان مکان‌های استراتژیک در نزدیکی مناطق مسکونی، بر پایه نظریه دمپستر-شفر (۳۲) و سپس ترکیب دیدگاه‌های پنج متخصص که دقت و صحت نتایج را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. اهمیت این موضوع در آن است که تعداد ترکیب‌های ممکن از نظرات کارشناسان در صورت استفاده از دو متخصص، تنها ۹ مورد است، اما این عدد در صورت حضور پنج متخصص به ۲۴۳ ترکیب مختلف افزایش می‌یابد.

روش کار

طراحی مطالعه

این مطالعه کاربردی در یکی از تاسیسات شرکت ملی

3. Bayesian Networks



شکل ۱: دیاگرام مراحل انجام مطالعه

حوادث گذشته جستجو گردید. بدین منظور ضمن بازدید سایت، از نظر تخصصی تیمهای فنی و مهندسی و مدیران و کارشناسان مجرب HSE شرکت پخش فرآورده های نفتی استفاده شد.

بر اساس مطالعات قبلی از جمله مطالعه عبدالحمیدزاده و همکاران در سال ۲۰۱۱، در میان رویدادهای دومینویی که توسط حریق آغاز میشود، آتش استخری بیشترین سناریویی بوده است که عامل بروز رویدادهای دومینو شده است (۳۳). داده‌های آماری از منابع دیگر این نکته را تقویت می‌کنند که آتش‌سوزی‌های استخری، شایع‌ترین و بزرگترین نوع حوادث را در سایت‌های شیمیایی باعث شده اند (۳۴). لذا در این مطالعه حریق استخری در مخازن

پخش فرآورده های نفتی ایران واقع در یکی از شهرهای شرقی ایران طی سال ۱۴۰۳ و مطابق گام هایی که در ادامه توضیح داده می شوند، طراحی و اجرا گردید. مراحل مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

گام اول: شناسایی خطرات حریق در سایت مورد مطالعه
در این مرحله کلیه پارامترهای عملیاتی سیستم، تجهیزات و فرایندها از جمله چیدمان تجهیزات، نقشه های عملیاتی (P&ID و PFD) وزن و حجم مواد و خواص فیزیکی و شیمیایی، اشتعال زایی و سمیت آنها در یکی از انبارهای فرآورده های نفتی در استان خراسان جنوبی مورد بررسی قرار گرفت و همچنین سوابق حوادث و شبه

سقف ثابت حاوی گازوئیل به عنوان سناریوی اصلی مدنظر قرار گرفته است.

گام دوم: ترسیم ساختار درخت خطا برای سناریو منتخب

به منظور ترسیم درخت خطای سناریوی منتخب ابتدا طبق معیارهای معرفی شده توسط Cooke و همکاران (۲۰۰۸) تیمی از متخصصین حوزه های مختلف شاغل در سایت مورد مطالعه تشکیل شد. این افراد از سطوح مختلف سازمانی شامل مدیریت HSE، کارشناسان HSE، افسران HSE و همچنین واحدهای پشتیبانی مانند نگهداری و تعمیرات و امور اداری انتخاب شدند که هر یک در زمینه تخصصی خود کمک فراوانی به پیشرفت پروژه انجام دادند. به دلیل اختلاف در تخصص ها، سابقه کاری و برداشت ها، از ضریب وزن (WF) برای وزندهی به نظر خبرگان از نتایج مطالعه Yazdi و همکاران (۲۰۱۷) استفاده و در نهایت وزن خبرگان به صورت یکسان برابر عدد ۰٫۲ استخراج گردید. پس از جلسات متعدد انفرادی و گروهی و توجیه کارشناسان در زمینه روند انجام مطالعه نظرات آنها به روش بارش افکار برای شناسایی انحرافات احتمالی فرایند و رویدادهای منجر به سناریوی حریق مخزن جمع آوری و درخت خطای حریق مخازن طراحی گردید. نتیجه کار مجدداً به منظور اصلاحات نهایی با خبرگان منتخب به شور گذاشته شد و درخت خطای رویداد حریق مخزن سقف ثابت ترسیم گردید. برای ترسیم درخت خطا ابتدا رویداد نامطلوب^۱ (TE) و علل آن یعنی رویدادهای میانی^۲ (IE) و پایه^۳ (BE) تعیین گردید. ارتباط میان این رویدادها از طریق دروازه های منطقی «AND» و «OR» شناسایی شد.

گام سوم: پیاده سازی نظریه شواهد

نظرات خبرگان در زمینه احتمال وقوع هر یک از رویداد های پایه به صورت عبارات «درست» (T)، «غلط» (F) و «هم درست و هم غلط» (T,F) و یا به عبارتی

1. Top Event
2. Intermediate Event
3. Basic Event

«نمیدانم» در قالب فرمهای نظرسنجی که حاوی فهرست رویدادهای پایه شناسایی شده بود، جمع آوری گردید. بدین صورت که احتمال درست وقوع یک رویداد برابر ۶۰ درصد و نادرست ۳۰ درصد و نمیدانم ۱۰ درصد در نظر گرفته شد. بدین معنی که خبره معتقد است رویداد مدنظر با احتمال ۶۰ درصد (۰٫۶) ممکن است اتفاق بیفتد و ۳۰ درصد (۰٫۳) هم احتمال دارد که اصلاً چنین رویدادی رخ ندهد و ۱۰ درصد (۰٫۱) نیز به نظرات قبلی که در مورد درست یا غلط بودن وقوع رویداد ارائه نموده شک دارد. در هر حال مجموع اعداد سه گانه فوق میبایست برابر ۱۰۰ درصد و یا یک باشد.

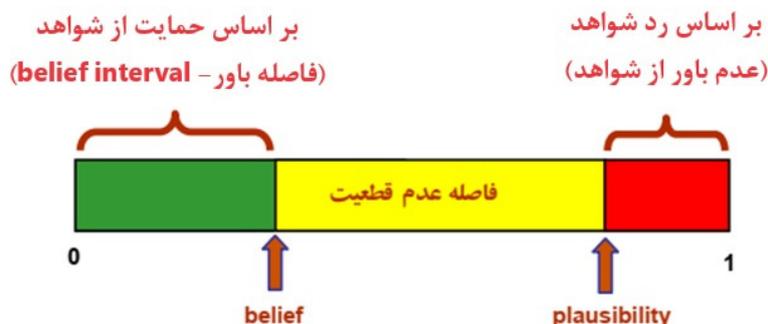
۱. تدوین چارچوب تشخیص^۴ (FOD)

نظریه شواهد از سه پارامتر اساسی، یعنی تابع اساسی جرم احتمال، تابع اعتماد و تابع مقبولیت برای مشخص کردن عدم قطعیت در ساختار باور استفاده می کند. ساختار باور نشان دهنده یک بازه پیوسته اعتماد، مقبولیت^۱ برای یک کمیت نامشخص است که احتمال واقعی ممکن است در آن بازه نهفته باشد. یک ساختار باور محدود نشان دهنده احتمال دقیق تر است. عدم قطعیت با تعریف چارچوب تشخیص (FOD) مشخص می شود. FOD مجموعه ای از عناصر متقابل منحصر به فرد است که امکان داشتن^۲ زیر مجموعه را در یک مجموعه P فراهم میکند، که در آن $|\Omega|$ تعداد عناصر مجموعه است. در این مطالعه، حالت های عملکردی رویدادهای ورودی شامل موفقیت (S) و شکست (F) است. بنابراین، عدم قطعیت در رویدادهای ورودی را می توان با یک $\Omega = \{S, F, FOD, F\}$ ، که شامل چهار زیر مجموعه در یک مجموعه توان P است، ارائه کرد. آخرین زیرمجموعه $\{S, F\}$ ناآگاهی از دانش تخصصی را به دلیل ناقص یا کمبود اطلاعات در مورد سیستم در نظر می گیرد.

۲. تابع اساسی جرم احتمال (m)

نماد m نشان دهنده تابع اساسی جرم احتمال

4. Frame of Discernment (FOD)



شکل ۲: فاصله عدم قطعیت

رابطه بین BPA و PI را بیان می کند.

$$PI(p_i) = \sum_{pk \cap Pi \neq \emptyset} m(p_k) \quad (3)$$

بازه عدم قطعیت، محدوده‌ای را نشان می‌دهد که احتمال واقعی ممکن است در آن قرار داشته باشد. با کم کردن مقدار اعتماد از مقدار مقبولیت، بازه عدم قطعیت را می‌توان تعیین کرد (۲۷). این مفهوم به صورت گرافیکی در شکل ۲ نشان داده شده است.

۵. قواعد ترکیب در نظریه شواهد دمپستر شافر

برای ایجاد یک درخت خطای معتبر، دانش و تجربه چندین متخصص باید تجمیع شود. قوانین ترکیبی امکان تجمیع باورهای فردی متخصصان متعدد را فراهم می‌کند. قانون ترکیبی دمپستر شافر که در ابتدا ارایه شد، پرکاربردترین قانون ترکیبی بود (۳۲). پس از آن محققان قواعد ترکیبی اصلاح شده‌ای را نیز معرفی نمودند، Yager، Prade، Zhang، Murphy و Smets، Inagaki، Dubois و اخیراً، Smarandache و Dezert از جمله این قواعد اصلاح شده و تکمیلی هستند (۳۶).

قانون ترکیبی DS عملگر ترکیب مناسبی است. باور مشترک بین منابع متعدد استخراج می‌شود و باور متضاد توسط یک ضریب نرمال سازی^۱ (1-k) نادیده گرفته می‌شود (۳۶). قانون ترکیب از عملگر نوع AND برای تجمیع

1. Normalization factor

(BPA) است که به آن جرم باور نیز می‌گویند. هدف آن تخصیص احتمال ارائه شده توسط متخصص برای هر زیر مجموعه‌ای است که بخشی از مجموعه توان P است به طوری که مجموع گزاره برابر با ۱ باشد. دانش به دست آمده از استنباط خبره در مجموع توسط عناصر کانونی، $m(p_i) > 0$ ، $pi \subseteq P$ ، نشان داده می‌شود. معادله (۱) برای مشخص کردن BPA استفاده می‌شود.

$$m(p_i) \rightarrow [0,1]; \quad m(\emptyset) = 0 \quad \text{و} \quad \sum_{pi \subseteq P} m(p_i) = 1 \quad (1)$$

۳. تابع اعتماد

کران پایینی یک مجموعه p_i با تابع اعتماد (Bel) نشان داده می‌شود که مجموع تمام BPA های زیرمجموعه های مناسب p_k از مجموعه مدنظر p_i است. معادله (۲) رابطه بین BPA و Bel را بیان می‌کند.

$$Bel(p_i) = \sum_{pk \subseteq Pi} m(p_k) \quad (2)$$

۴. تابع مقبولیت

کران بالایی برای مجموعه p_i با تابع مقبولیت (Pl) نشان داده می‌شود، که مجموع BPA های مجموعه p_k است که با مجموعه مدنظر p_i اشتراک دارد. معادله (۳)

$$P(X) = P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | pa(X_i)) \quad (۶)$$

در این رابطه $pa(X_i)$ مجموعه والدین X_i نامیده می شود.

یکی از ویژگی های اصلی BN این است که امکان به روز رسانی احتمالات با ارائه شواهد جدید از طریق قضیه بیز وجود دارد (رابطه (۷)):

$$P(X|E) = \frac{P(X)P(E|X)}{\sum_{X|E} P(X)P(E|X)} \quad (۷)$$

که در آن $P(X|E)$ احتمال مشترک به روز شده (پسینی) با شواهد E است (۳۷).

مطالعه موردی

این بخش کاربرد روش پیشنهادی برای مخازن ذخیره سازی با سقف ثابت جوی حاوی گازوئیل در یک انبار فراورده های نفتی در استان خراسان جنوبی را گزارش می کند. چیدمان مخازن و موقعیت آنها در سایت مورد مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است. فراورده های نفتی از پالایشگاهها و ترمینالهای نفتی به وسیله تانکر به انبار مورد مطالعه وارد میشوند و محموله خود را از طریق پمپ و خطوط لوله به مخازن تخلیه می نمایند. این فراورده ها پس از دیو در مخازن مجدداً جهت صادرات و یا استفاده در جایگاههای توزیع سوخت منطقه توسط تانکرهای حمل سوخت بارگیری می شوند.

مخازن دارای ظرفیتهای متفاوت ۲۹۰۰، ۵۹۰۰ و ۲۲۰۰۰ متر مکعب با قطر ۱۷، ۲۴ و ۴۳ متر و ارتفاع مجاز سیال ۱۲ و ۱۳ متر هستند. مخازن مجهز به سیستم هشدار سطح پایین^۳ (LAL) و بالا بالا^۴ (LAHH) هستند. همچنین مخازن فاقد "سیستم سنجش سطح خودکار"^۵ (ATG) و "سیستم خودکار پیشگیری از سرریز"^۶ (AOPS) بوده و تعیین ارتفاع سیال چند بار در روز

3. Level Alarm Low
4. Level Alarm High High
5. Automated Tank Gauging
6. Automated Overfill Prevention System

دانش از منابع مستقل استفاده می کند. برای مثال، اگر $m_1(pa)$ و $m_2(pb)$ دو مجموعه شواهد برای یک رویداد یکسان باشند که از دو متخصص مختلف جمع آوری شده اند، قانون ترکیب DS از رابطه ۴ برای ترکیب شواهد استفاده می کند.

$$m_{1-2}(p_i) = \begin{cases} 0 & \text{for } p_i = \emptyset \\ \frac{\sum_{pa \cap pb = p_i} m_1(pa) \times m_2(pb)}{1-k} & \text{for } p_i \neq \emptyset \end{cases} \quad (۴)$$

در رابطه فوق، m_{1-2} دانش ترکیبی دو متخصص را برای رویداد نشان می دهد و k درجه تضاد بین دو متخصص را اندازه گیری می کند که به صورت زیر تعیین می شود (رابطه (۵)).

$$K = \sum_{pa \cap pb = \emptyset} m_1(p_a) \times m_2(p_b) \quad (۵)$$

۶. کدنویسی توابع محاسباتی

به دلیل تعدد نظرات خبرگان شرکت کننده در این مطالعه و حالات متعدد ترکیب نظرات آنها، انجام محاسبات با روشهای معمول محاسباتی بسیار پیچیده و وقت گیر بود. لذا این مرحله از مطالعه از طریق کد نویسی در محیط نرم افزار Rstudio انجام شد.

گام چهارم: ساخت شبکه بیزی

در شبکه بیزی شدت وابستگی بین گره ها در هر بخش از گراف از طریق جداول احتمال شرطی^۱ (CPT) تعریف می شود. توزیع مشترک احتمال مجموعه ای از متغیرهای تصادفی $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ را می توان به سادگی به کمک معیار جداسازی^۲ d محاسبه کرد، این معیار مجموعه ای از ضوابط است که تعیین می کند چه گره هایی با توجه به وضعیت گره های دیگر مستقل از هم هستند. قانون زنجیره ای که احتمال شرطی هر متغیر را نسبت به والدین مستقیمش در نظر می گیرد، در رابطه (۶) ارائه شده است:

1. Conditional Probability Tables
2. d-separation



شکل ۳: نقشه سایت مورد مطالعه

جدول ۱ و جدول ۲ آورده شده است.

برآورد احتمال شکست بر اساس نظریه شواهد

جهت کمی سازی احتمالات درخت خطای رسم شده و به منظور افزایش قابلیت اطمینان در برآورد عددی احتمال بروز سناریوی اصلی مطابق روش کار، از نظریه شواهد دمپسترشافر استفاده شد. یافته های این گام به شرح زیر است.

• ارزیابی ذهنی خبرگان از وقوع رویدادها

در جدول ۳ ویژگی های دموگرافیک پنل خبرگان شرکت کننده در مرحله شناسایی انحرافات فرایند و ترسیم درخت خطا ارائه شده است. جدول ۴ نتایج ارزیابی ذهنی خبرگان از احتمال وقوع رویدادها بر اساس روش نظریه شواهد در جدول ۵ بخش ضمایم ارائه شده است. در این جدول هر یک از شواهد (E1 تا E5) نظرات خود در مورد وقوع رویدادهای پایه را اعلام نموده اند. به عنوان مثال خبره شماره یک در مورد احتمال نقص «حفاظت کاتدی» (رویداد پایه BE20) و تاثیر آن بر

به صورت دستی انجام می گردد. انبار دارای تیم آتش نشانی مجهز و آموزش دیده بوده و دارای طرح واکنش در شرایط اضطراری، دوربینهای مداربسته و صاعقه گیر می باشد. علاوه بر این دارای مخازن تامین آب آتش نشانی و سیستم اطفاء حریق مخازن از نوع مانیتورهای ثابت فوم در کنار دایکها و فوم پاش^۱ در بالای مخازن است. همچنین خنک سازی مخازن از طریق اسپرینکلر و رینگ آب روی دیواره مخازن به صورت فرمان دستی انجام می گردد.

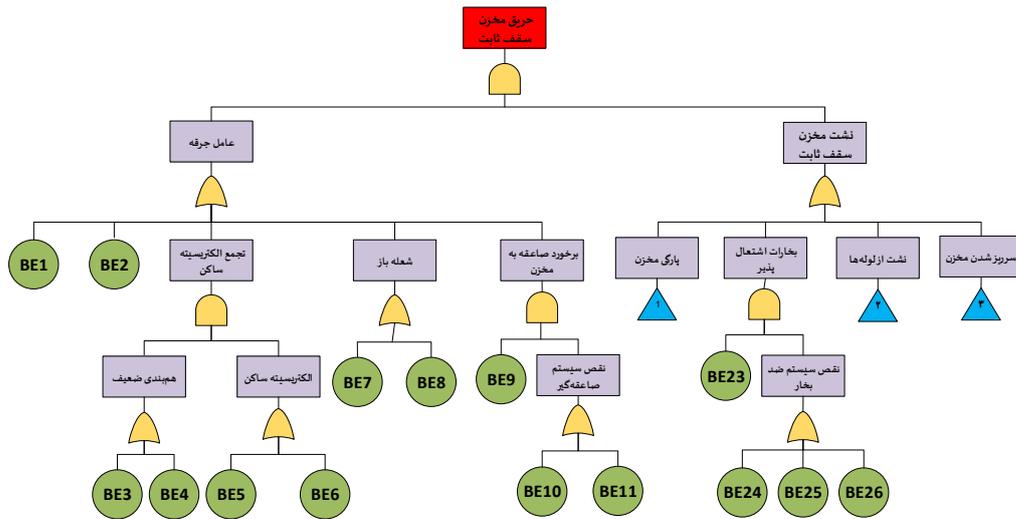
== یافته ها

درخت خطای سناریوی حریق مخزن سقف ثابت و فهرست رویدادهای پایه

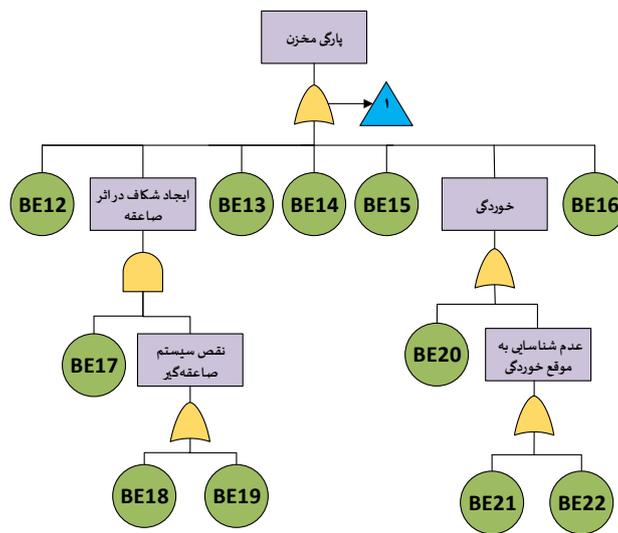
درخت خطای سناریوی منتخب مطابق با روش کار توضیح داده شده ترسیم شد. این درخت شامل ۴۷ رویداد پایه و ۲۳ رویداد میانی است. شکل ۴ تا ۷ درخت خطای منجر به رویداد اصلی را نمایش می دهند.

فهرست رویدادهای پایه و میانی مرتبط با وقوع حریق استخری در مخزن سقف ثابت مورد مطالعه به ترتیب در

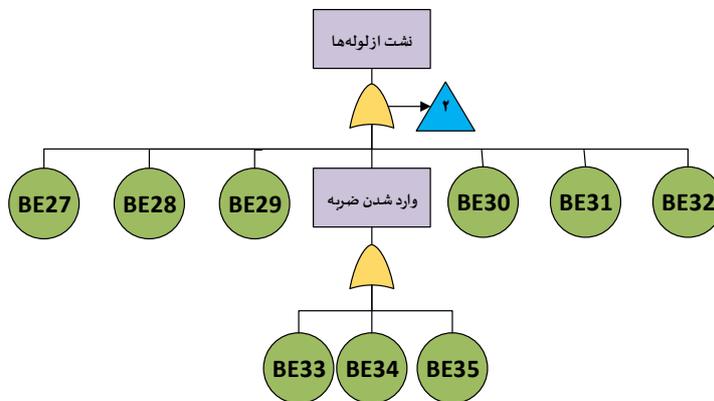
1. Foam pourer



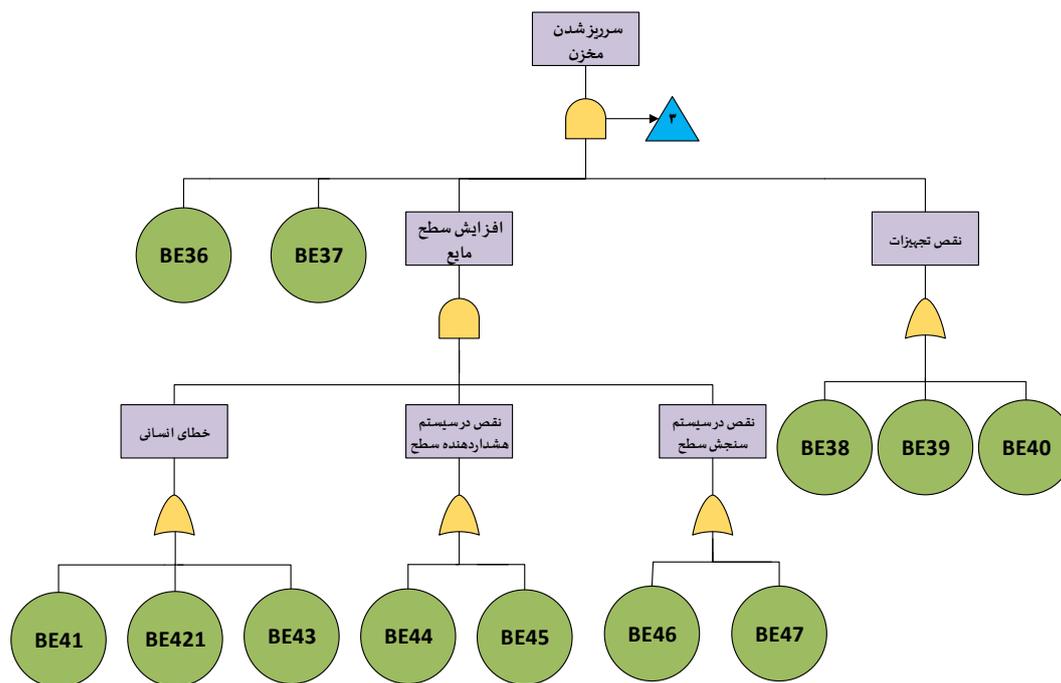
شکل ۴: درخت خطای وقوع حریق در مخازن سقف ثابت



شکل ۵: رویدادهای مرتبط با پارگی مخزن سقف ثابت



شکل ۶: رویدادهای منجر به نشت سیال از لوله‌ها



شکل ۷: رویدادهای منجر به سرریز شدن مخزن سقف ثابت

جدول ۱: فهرست رویدادهای پایه مرتبط با وقوع حریق استخری در مخزن سقف ثابت مورد مطالعه

رویداد پایه	توصیف رویداد	رویداد پایه	توصیف رویداد	رویداد پایه
BE1	ارتعاشات مکانیکی داخل مخزن	BE25	فقدان سیستم مانیتورینگ گازها و بخارات	
BE2	زلزله	BE26	فقدان سیستم پتوی گاز	
BE3	بالا بودن مقاومت ارت	BE27	یوسیدگی لوله	
BE4	نقص سیستم ارت	BE28	نشست زمین	
BE5	بارگیری یا سرعت بالا	BE29	فشار بیش از حد سیال	
BE6	نمونه برداری یا نمونه بردار عایق	BE30	تغییرات آب و هوایی	
BE7	سیگار	BE31	اتصالات و جوش ضعیف لوله	
BE8	جوشکاری و برشکاری	BE32	نقص در شیرها AN01&4,6,8,12,14 inch	
BE9	بروز صاعقه	BE33	ارتعاشات	
BE10	ضعف نگهداری تعمیرات سیستم صاعقه گیر	BE34	بلایای طبیعی	
BE11	فقدان بازرسی منظم سیستم صاعقه گیر	BE35	برخورد وسایل نقلیه	
BE12	خستگی فلز	BE36	نقص در LI&PI&TI	
BE13	زلزله	BE37	نقص در شیرها AN01&4,6,8,12,14 inch	
BE14	اثرات دومینو	BE38	نقص در اتصالات شیر ورودی و خروجی AN01&4,6,8,12,14 inch	
BE15	نقص فونداسیون	BE39	نقص در emergency drain	
BE16	فشار هیدروستاتیک مخزن	BE40	نقص در seal	
BE17	وقوع صاعقه	BE41	عدم صلاحیت روحی و جسمی اپراتور	
BE18	ضعف تعمیرات و نگهداری	BE42	عدم مهارت اپراتور	
BE19	عدم بازدید منظم سیستم صاعقه گیر	BE43	شیفت کاری	
BE20	عدم حفاظت کاتدیک	BE44	نقص حسگر	
BE21	عدم بازدید منظم	BE45	نقص در ارسال سیگنال به اتاق کنترل	
BE22	روشهای نامناسب در تشخیص خوردگی	BE46	نقص سوئیچ high high و عدم فرمان به پمپها	
BE23	فضای خالی بالای مخزن	BE47	عدم وجود سیستم سنجش سطح خودکار (ATG)	
BE24	فقدان بازرسی منظم			

جدول ۲: لیست رویدادهای میانی مرتبط با وقوع حریق در مخازن سقف ثابت مورد مطالعه

رویداد میانی	توصیف رویداد	رویداد میانی	توصیف رویداد
IE1	عامل جرقه	IE 13	عدم شناسایی به موقع خوردگی بدنه مخزن
IE2	تجمع الکتریسیته ساکن	IE14	نشت بخارات قابل اشتعال
IE3	شعله باز	IE15	نقص سیستم ضد گاز و بخار
IE4	برخورد صاعقه	IE16	نشت از لوله ها
IE5	هم بندی ضعیف	IE17	وارد شدن ضربه
IE6	تولید الکتریسیته ساکن	IE18	سرریز شدن مخزن
IE7	نقص سیستم صاعقه گیر	IE19	افزایش سطح مایع
IE8	نشت مخزن سقف ثابت	IE20	خطای انسانی در اوبراتور اتاق کنترل
IE9	پارگی مخزن سقف ثابت	IE21	نقص در سیستم هشدار سطح سیال
IE10	ایجاد شکاف در اثر صاعقه	IE22	نقص در سیستم سنجش سطح سیال
IE11	نقص سیستم صاعقه گیر	IE23	نقص تجهیزات
IE12	خوردگی بدنه مخزن سقف ثابت		

جدول ۳: مشخصات خبرگان

عنوان خبره	E1 (خبره ۱)	E2 (خبره ۲)	E3 (خبره ۳)	E4 (خبره ۴)	E5 (خبره ۵)
سمت سازمانی	رئیس ایمنی و آتش نشانی	افسر ایمنی	HSE مدیر	رئیس مهندسی	مهندس ایمنی
سابقه کاری (سال)	۱۳	۲۰	۱۸	۱۷	۱۵
سطح تحصیلات	دکتری	فوق دیپلم	فوق لیسانس	فوق لیسانس	فوق لیسانس
سن (سال)	۳۸	۴۰	۴۰	۴۵	۴۰

جدول ۴: دامنه احتمال وقوع سناریوی منتخب

Implausibility	plausibility	Not Believe	Believe	دامنه احتمال وقوع حریق مخزن
٪۹۶	٪۴	٪۹۹	٪۱	

۵ خبره انجام گردید. بر اساس داده های این جدول رویدادهای پایه BE1، BE8، BE15 جزء رویدادهای پایه با دامنه احتمال وقوع بالا هستند. هرچند این امر لزوماً به معنی تاثیر بیشتر در وقوع رویداد پایانی نخواهد بود. تصویری از کدنویسی محاسبات مربوطه در نرم افزار Rstudio در شکل ۸ نشان داده شده است.

رویداد «خوردگی» اعلام نموده است به احتمال ۲۵ درصد این امر باعث وقوع این رویداد میانی میشود و با توجه به اقدامات حفاظتی موجود به احتمال ۷۵ درصد این امر اتفاق نخواهد افتاد. این خبره به میزان ۵ درصد به این نظر خود شک دارد.

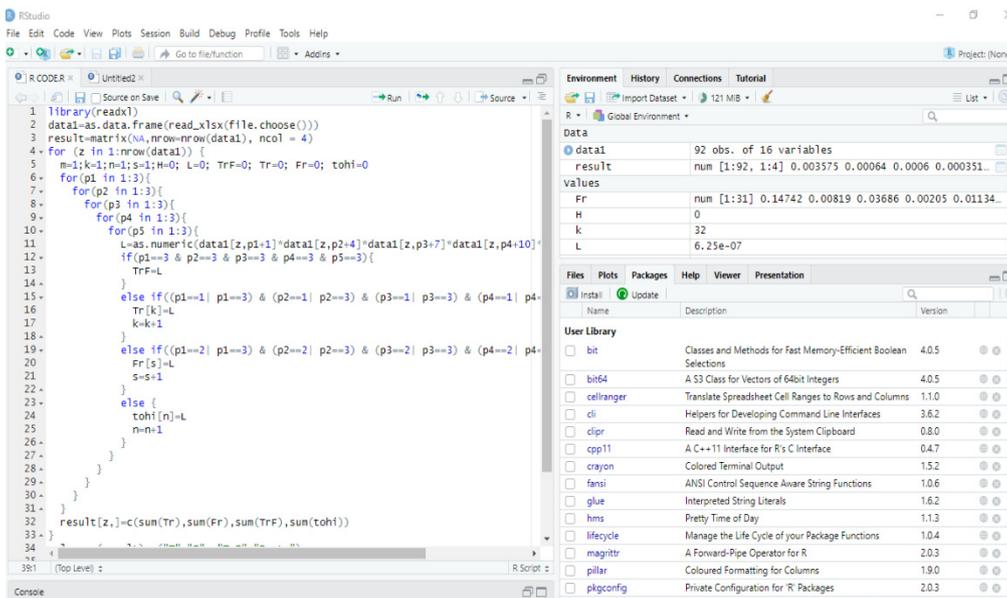
• تعیین مقادیر *PL* و *BEL* بر اساس قوانین دمپستر شافر برای هر رویداد پایه

ترسیم شبکه بیزی و تعیین دامنه احتمال وقوع رویدادهای میانی و اصلی بر اساس مقادیر *PL* و *Bel* رویدادهای پایه

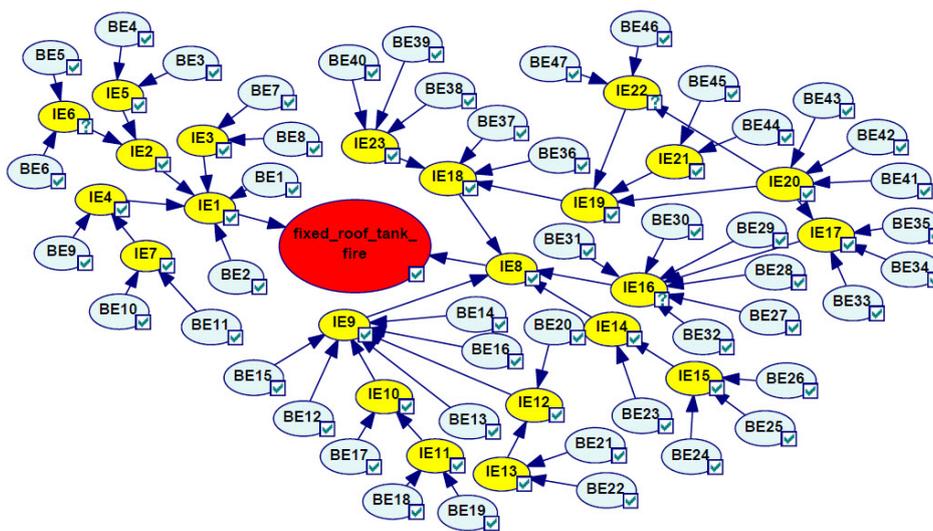
مطابق روش کار و با استفاده از روابط شماره ۱ تا ۵ مقادیر توابع جرم و *Bel* و *Pl* به شرح جدول در بخش ضمایم جدول ۵ برای هر رویداد پایه محاسبه شد. محاسبات برای ۲۴۳ حالت متفاوت از ترکیب نظرات

در این مطالعه، *BN* با استفاده از نرم افزار *GeNIe* به صورتی که در شکل ۹ مشاهده می شود، ترسیم شد.

توسعه یک پارچوب تلفیقی به منظور کاهش عدم قطعیت ..



شکل ۸: ترکیب نظرات خبرگان به وسیله کد نویسی در نرم افزار Rstudio



شکل ۹: شبکه بیزی مربوط به سناریوی حریق استخری در مخازن مورد مطالعه

پایه به صورت جداگانه به گره های متناظر تخصیص داده شد. نتیجه به شرح جدول ۴ ارائه شده است.

بحث

مخازن ذخیره سازی فرآورده های نفتی مستعد بروز حوادث متعددی از جمله نشت فرآورده و متعاقب آن

سپس یک بار مقادیر Bel و مجدداً مقادیر PI مربوط به تک تک رویدادهای پایه به نرم افزار وارد و نتیجه به صورت مقادیر مجزای Bel و PI برای رویداد پایانی (اصلی) استخراج گردید.

پس از انتقال درخت خطای سناریوی منتخب به شبکه بیزی مقادیر Bel و سپس PI متعلق به همه رویدادهای

این رویکرد ممکن است منجر به ارزیابی‌هایی با درجه اطمینان بالای کاذب شود. برای نمونه، در یک مطالعه برای ارزیابی ریسک ذخیره‌سازی CO₂، نشان داده شد که احتمالات نقطه‌ای ممکن است عدم قطعیت دانشی را نادیده بگیرند، در حالی که روش‌های بازه‌ای دیدی دقیق‌تر ارائه می‌دهند (۳۹). همچنین، در تخمین پارامترهای فرآیندهای شیمیایی، این روش با صرف منابع محاسباتی کمتر مجموعه‌ای دقیق از پارامترها را ارائه می‌دهد (۴۰). در باب مدیریت انواع عدم قطعیت، احتمال‌های بازه‌ای توانایی تفکیک مؤثر عدم قطعیت‌های دانشی و تصادفی را دارند. در تحلیل سازهای، روش‌های ترکیبی از احتمال و بازه برای مدیریت همزمان هر دو نوع عدم قطعیت به کار می‌روند که قابلیت اطمینان را افزایش می‌دهد (۳۵). احتمال‌های نقطه‌ای ممکن است این دو نوع عدم قطعیت را با یکدیگر ترکیب کرده و از شفافیت تحلیل‌ها بکاهند. بر اساس مطالب پیش گفت احتمال‌های بازه‌ای رویکردی قوی برای مدیریت عدم قطعیت به‌ویژه در شرایط کمبود داده ارائه می‌دهند. آن‌ها دامنه‌ای از نتایج ممکن را فراهم می‌کنند که نیاز محاسباتی را کاهش داده و انواع مختلف عدم قطعیت را به‌خوبی تفکیک می‌کنند. در حالی که احتمال‌های نقطه‌ای برای شرایط ساده مناسب‌اند، ممکن است عدم قطعیت‌های مهم را بیش از حد ساده‌سازی کرده و نادیده بگیرند.

کاربرد تلفیقی DST با سایر رویکردها رویه ای نوین در کاهش عدم قطعیت ارزیابی ریسک حریق است. برخی محققان با ترکیب DST با نظریه مجموعه‌های فازی سعی نموده‌اند تا به عدم دقت و عدم قطعیت ذاتی در ارزیابی خطر حریق بپردازند. این تلفیق امکان نمایش پارامترهای نامطمئن، مانند احتمالات اشتعال و نرخ گسترش آتش، را با استفاده از توابع عضویت فازی فراهم می‌کند. برای مثال، مجموعه‌های فازی بازه‌ای (IVFSs) می‌توانند برای توصیف سطوح خطر به کار روند و DST می‌تواند این بازه‌ها را برای تولید احتمالات پیشین فازی در شبکه‌های بیزی ادغام کند (۴۱). این رویکرد ترکیبی به ویژه در سناریوهایی که داده‌ها ناکافی یا نادقیق هستند، مثل ارزیابی خطر حریق

حریق استخری هستند. ارزیابی ریسک مخازن نگهداری مواد پرخطر، فرایندی مهم و پیچیده است که اجرای دقیق آن نقش اساسی در پیشگیری از وقوع چنین حوادثی دارد. اما در هر رویکرد ارزیابی ریسک، «عدم قطعیت» موضوعی چالش برانگیز است. هدف از این مطالعه معرفی یک چارچوب نوین مدیریت عدم قطعیت در حوزه ایمنی و کاربرد آن در یک مطالعه ارزیابی ریسک حریق در مخازن نفتی بود. در این مطالعه با استفاده از قوانین پایه‌ای نظریه دمپستر شافر با تعریف بازه‌ای بین مقادیر باور و مقبولیت برای مقادیر احتمال به جای استفاده از مقادیر نقطه‌ای احتمالات که همواره دارای مقادیر بالایی از ابهام و عدم اطمینان هستند، ضمن کاهش ابهام و عدم قطعیت، اطلاعات واقع بینانه‌تری در زمینه احتمال بروز رخداد حریق در مخازن مورد مطالعه فراهم شد. مطابق روش کار ابتدا با استفاده از نظرات خبرگان، مقادیر توابع جرم و Bel و Pl با رویکرد دمپستر شافر و از طریق کدنویسی در نرم افزار R برای هر رویداد پایه محاسبه شد. سپس مقادیر Bel و Pl (به ترتیب ۰/۰۱ و ۰/۰۴) برای رویداد اصلی با استفاده از شبکه بیزی بدست آمد. ارائه دامنه از مقادیر احتمالات بین Bel و Pl موضوعی است که باعث افزایش قابلیت اطمینان نتایج ارزیابی ریسک می‌گردد. دو رویکرد برجسته برای مدیریت عدم قطعیت در ارزیابی ریسک، احتمال‌های بازه‌ای و احتمال‌های نقطه‌ای هستند. احتمال‌های بازه‌ای، عدم قطعیت را به‌صورت بازه‌ای نشان می‌دهند، در حالی که احتمال‌های نقطه‌ای از مقادیر عددی دقیق استفاده می‌کنند. احتمال‌های بازه‌ای در شرایطی که داده‌ها محدود یا نادقیق هستند، مزیت دارند. آن‌ها طیفی از مقادیر ممکن را دربرمی‌گیرند، نیاز به داده‌های دقیق را کاهش داده و نمایی جامع‌تر از عدم قطعیت ارائه می‌دهند. این روش از نظر محاسباتی کارآمد است، همان‌طور که در مدل‌های انتشار جوی نشان داده شده است، تحلیل بازه‌ای نسبت به شبیه‌سازی مونت کارلو زمان کمتری می‌طلبد (۳۸). در مقابل احتمال‌های نقطه‌ای ساده هستند اما ممکن است عدم قطعیت را بیش از حد ساده‌سازی کنند. در مواقعی که داده‌ها محدودند،

در مطالعه‌ای نظریه فازی، نظریه شواهد و شبکه بی‌زی را در تجزیه و تحلیل درخت خطای یک سیستم فرایندی به کار بردند و اثربخشی آن را در مدیریت داده‌ها و کنترل عدم قطعیت‌ها اثبات کردند. در مقاله‌ای دیگر همراستا با نتایج این مطالعه Li و همکاران علت شکست خطوط لوله زیردریایی را از طریق یک مدل پویا برای تجزیه و تحلیل ریسک در شرایط عدم قطعیت شناسایی و از نظریه مجموعه‌های فازی، نظریه شواهد و شبکه بی‌زی برای مدیریت داده‌ها و مدل سازی موثر عدم قطعیت‌ها استفاده نمودند (۲۷). بدین ترتیب آنها کارایی ترکیب تئوری‌های فوق را در به دست آوردن احتمالات واضح برای رویدادهای ورودی با اطلاعات نامشخص نشان دادند.

نقاط قوت مطالعه

در جمع بندی نتایج این مطالعه و سایر مطالعاتی که با استفاده از نظریه دمپستر شافر سعی در افزایش قابلیت اطمینان درخت خطای ترسیم شده داشته اند می توان به مزایای این رویکرد اشاره نمود. نخست اینکه DST امکان استدلال با اطلاعات نامشخص و تضاد بین منابع را فراهم می کند و راهی برای رسیدگی به داده های نادرست و عدم اطمینان در سناریوهای مد نظر را فراهم می کند. همچنین این رویکرد قابلیت کاربرد فاصله احتمالی را به جای تخمین نقطه ای ارائه می دهد، که می تواند در شرایطی که احتمالات واقعی دقیقاً مشخص نیست ارزشمند باشد. و در نهایت DST می تواند منابع مختلف شواهد را به طور موثر ترکیب کند و با یکپارچه سازی اطلاعات از منابع متعدد، امکان ارزیابی جامع تر و دقیق تر احتمالات تقلب را فراهم کند. چالش اصلی در همه روشهای مبتنی بر نظرات خبرگان نحوه تجمیع نظرات خبرگان متعدد در برآورد احتمالات رویداد های پایه است که در این مطالعه این مشکل از طریق برنامه نویسی در نرم افزار Rstudio حل شد و بر این اساس میتوان هر تعداد نظرات خبرگان را بر اساس قوانین ترکیب دمپستر شافر تجمیع کرد.

مخازن ذخیره‌سازی موثر است. همچنین در ارزیابی خطر حریق، ادغام داده‌های چندسنجشی نقش حیاتی در تشخیص زودهنگام و شناسایی دقیق حوادث حریق ایفا می‌کند. DST با موفقیت برای ادغام داده‌های حاصل از چندین حسگر، مانند دما، دود و آشکارسازهای گاز، به منظور بهبود دقت سیستم‌های هشدار آتش به کار رفته است. برای مثال، مطالعه‌ای پیشنهاد می‌کند که از ادغام DST با منطق فازی برای افزایش اعتماد نتایج حسگرها استفاده شود تا قابلیت اطمینان سیستم‌های تشخیص آتش افزایش یابد (۴۲). این روش‌شناسی در سناریوهای حریق کشتی‌ها آزمایش شده و می‌تواند به کاربردهای مخازن ذخیره‌سازی تعمیم یابد.

هنگام ترکیب شواهد از منابع متعدد، مانند نظرات کارشناسی یا داده‌های حسگرها، باید اعتبار هر منبع در نظر گرفته شود. برای در نظر گرفتن قابلیت اطمینان هر یک از شواهد، چارچوب DST از یک قانون تخفیف^۱ که اولین بار توسط شفر معرفی شد برای تعدیل توابع اساسی جرم بر اساس قابلیت اعتماد (قابلیت اطمینان) هر منبع استفاده می‌کند. به این ترتیب، به منابع قابل اعتمادتر، تأثیر بیشتری در فرآیند ترکیب داده می‌شود (۴۳). این رویکرد در سیستم‌های مهندسی برای مدل‌سازی عدم قطعیت دانشی به کار رفته و می‌تواند برای ارزیابی ریسک حریق در مخازن ذخیره‌سازی تطبیق یابد. با اختصاص وزن‌های بالاتر به منابع قابل اطمینان‌تر، دقت ارزیابی خطر بهبود می‌یابد. در ادامه به مطالعات دیگری که در سایر حوزه‌ها تلاش نموده اند با استفاده از نظریه شواهد قابلیت اطمینان نتایج ارزیابی ریسک را افزایش دهند پرداخته شده است.

Daniel در مطالعه‌ای مشابه، کاربرد روش‌های بی‌زی و دمپستر شافر را در سیستم‌های تشخیص تقلب در بخش تجارت مورد بحث قرار داده است (۴۴). او با کاربرد یک مثال در مقاله نشان داد که چگونه ترکیب نظر شواهد می‌تواند باعث بهبود نتایج مطالعه گردد. یزدی و همکاران نیز

1. Discounting Rule

محدودیت‌های مطالعه

در این مطالعه رویدادهای امنیتی و حملات تروریستی در نظر گرفته نشده است.

پیشنهاد برای مطالعات آتی

پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی با استفاده از روش مورد استفاده در این مطالعه، شرایط خرابکاری عمدی و یا حملات تروریستی به عنوان رویدادهای موثر در بروز حریق در صنایع فرایندی مورد بررسی قرار گیرد.

و نسبت به سایر روشهای مقابله با عدم قطعیت می‌تواند تاثیر بیشتری در قابلیت اطمینان ارزیابی ریسک و افزایش ایمنی در تاسیسات ذخیره سازی فراورده های نفتی داشته باشد. نتایج این مطالعه می‌تواند در جهت تصمیم گیری بهتر و مطمئن تر برای شناسایی محتملترین رویدادهای پایه منجر به حوادث به مدیران سایر صنایع و سازمانها نیز کمک نماید. این کار میتواند از طریق الزام واحدهای HSE به تدوین "اظهارنامه قابلیت اطمینان" برای پروژه های ارزیابی ریسک از طریق بکارگیری این روش انجام شود.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل (بخشی از) پایان نامه در مقطع دکتری رشته مهندسی بهداشت حرفه ای و ایمنی کار می باشد که با حمایت شرکت ملی پخش فراورده های نفتی و صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران ایران (INSF) با شماره طرح ۴۰۱۴۹۹۲ انجام شده است.

نتیجه گیری

بر اساس این مطالعه ترکیب نتایج رویکرد نظریه شواهد دمپستر شافر با شبکه بیزی ابزار قدرتمندی برای کنترل عدم قطعیت در ارزیابی ریسک حریق مخازن حاوی فراورده های نفتی مخصوصاً در زمان عدم دسترسی به بانک اطلاعاتی و یا کمبود دانش کارشناسان می باشد

REFERENCES

- Ahmadi O, Mortazavi SB, Mahabadi HA. Review of atmospheric storage tank fire scenarios: Costs and causes. *J Fail Anal Prev.* 2020;20(2):384-405.
- Chang JI, Lin CC. A study of storage tank accidents. *J Loss Prev Process Ind.* 2006;19(1):51-9.
- Pouyakian M, Jafari MJ, Laal F, Nourai F, Zarei E. A comprehensive approach to analyze the risk of floating roof storage tanks. *Process Saf Environ Prot.* 2021;146:811-36.
- Bariha N, Ojha DK, Srivastava VC, Mishra IM. Fire and risk analysis during loading and unloading operation in liquefied petroleum gas (LPG) bottling plant. *J Loss Prev Process Ind.* 2023;81:104928.
- Wang J, Wang M, Yu X, Zong R, Lu S. Experimental and numerical study of the fire behavior of a tank with oil leaking and burning. *Process Saf Environ Prot.* 2022;159:1203-14.
- Movahed A, Norouzi B, Ebrahimpur S, editors. Study of dike effect as a passive protection layer on reduction of process accident consequences. 2017.
- Zheng B, Chen Gh. Storage tank fire accidents. *Process Saf Prog.* 2011;30(3):291-3.
- Soltanali H, Khojastehpour M, Farinha JT, Pais JEDAE. An integrated fuzzy fault tree model with Bayesian Network-Based maintenance optimization of complex equipment in automotive manufacturing. *Energies.* 2021;14(22):7758.
- Grüner SL. Uncertainty decomposed: understanding levels of contingency to enable effective decision-making. *Strat Mgmt J.* 2024;29(3).
- Smithson M, Smithson M. A vocabulary of ignorance. In: *Ignorance and Uncertainty: Emerging Paradigms.* 1989. p. 1-13.
- Diggle PJ, Gowers T, Kelly F, Lawrence N. Decision-Making with Uncertainty. *Significance.* 2020;17(6):12.
- Sun H, Xu L, Li C, Chen H, Jiang G, Nie X. Research on Reliability Modelling for Heavy CNC Machine Tools under Uncertain Variables

- Based on Universal Generating Function. *Math Probl Eng.* 2022;2022(1):3756824.
13. Agarwal H, Renaud JE, Preston EL, Padmanabhan D. Uncertainty quantification using evidence theory in multidisciplinary design optimization. *Reliab Eng Syst Saf.* 2004;85(1-3):281-94.
 14. Lavasani SMM, Yang Z, Finlay J, Wang J. Fuzzy risk assessment of oil and gas offshore wells. *Process Saf Environ Prot.* 2011;89(5):277-94.
 15. Kabir S, Papadopoulos Y. A review of applications of fuzzy sets to safety and reliability engineering. *Int J Approx Reason.* 2018;100:29-55.
 16. Mahmood YA, Ahmadi A, Verma AK, Srividya A, Kumar U. Fuzzy fault tree analysis: a review of concept and application. *Int J Syst Assur Eng Manag.* 2013;4:19-32.
 17. Yazdi M, Kabir S, Walker MJ. Uncertainty handling in fault tree based risk assessment: state of the art and future perspectives. *Process Saf Environ Prot.* 2019;131:89-104.
 18. Feiz-Arefi M, Ghasemi F, Kalatpour O. Analysis of Oxygen Release Scenario in Central Oxygen Unit of the Hospital through Fault Tree Analysis Method and Fuzzy Bayesian Network. *J Health Saf Work.* 2022;12(3):564-79.
 19. Bobbio A, Portinale L, Minichino M, Ciancamerla E. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks. *Reliab Eng Syst Saf.* 2001;71(3):249-60.
 20. Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Safety analysis in process facilities: Comparison of fault tree and Bayesian network approaches. *Reliab Eng Syst Saf.* 2011;96(8):925-32.
 21. Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Dynamic safety analysis of process systems by mapping bow-tie into Bayesian network. *Process Saf Environ Prot.* 2013;91(1-2):46-53.
 22. Shafer G. A mathematical theory of evidence. Princeton: Princeton University Press; 1976.
 23. Rathman JF, Yang C, Zhou H. Dempster-Shafer theory for combining in silico evidence and estimating uncertainty in chemical risk assessment. *Comput Toxicol.* 2018;6:16-31.
 24. Hatefi SM, Basiri ME, Tamošaitienė J. An evidential model for environmental risk assessment in projects using Dempster-Shafer theory of evidence. *Sustainability.* 2019;11(22):6329.
 25. 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.
 26. Yazdi M, Kabir S. Fuzzy evidence theory and Bayesian networks for process systems risk analysis. *Hum Ecol Risk Assess.* 2020;26(1):57-86.
 27. Li X, Chen G, Jiang S, He R, Xu C, Zhu H. Developing a dynamic model for risk analysis under uncertainty: Case of third-party damage on subsea pipelines. *J Loss Prev Process Ind.* 2018;54:289-302.
 28. Nunes J, Barbosa M, Silva L, Gorgônio K, Almeida H, Perkusich A. Issues in the Probability Elicitation Process of Expert-Based Bayesian Networks. In: *Enhanced Expert Systems.* IntechOpen; 2018.
 29. Manalif E, Capretz LF, Nassif AB, Ho D, editors. Fuzzy-ExCOM software project risk assessment. 2012 11th International Conference on Machine Learning and Applications; 2012; IEEE.
 30. Xiao L, Huang G, Zhang G. An integrated risk assessment method using Z-fuzzy clouds and generalized TODIM. *Qual Reliab Eng Int.* 2022;38(4):1909-43.
 31. Slim H, Nadeau S. A proposition for combining rough sets, fuzzy logic and FRAM to address methodological challenges in safety management: A discussion paper. *Safety.* 2020;6(4):50.
 32. Boutilier C, Goldszmidt M, editors. *Uncertainty in Artificial Intelligence 16.* Morgan Kaufmann; 2000.
 33. Abdolhamidzadeh B, Abbasi T, Rashtchian D, Abbasi SA. Domino effect in process-industry accidents—An inventory of past events and identification of some patterns. *J Loss Prev Process Ind.* 2011;24(5):575-93.
 34. Uribe S, Zárate L, Suo-Anttila A, Cordero ME,

- Smith JD. Improvement in the prediction of gasoline pool fire behaviour: CFD modelling and validation. *J Loss Prev Process Ind.* 2020;68:104317.
35. Jiang C, Zheng J, Han X. Probability-interval hybrid uncertainty analysis for structures with both aleatory and epistemic uncertainties: a review. *Struct Multidiscip Optim.* 2018;57(6):2485-502.
36. Zhao K, Li L, Chen Z, Sun R, Yuan G, Li J. A survey: Optimization and applications of evidence fusion algorithm based on Dempster-Shafer theory. *Appl Soft Comput.* 2022;124:109075.
37. Charniak E. Bayesian networks without tears. *AI Mag.* 1991;12(4):50-63.
38. Adrot O, Flaus JM, editors. Comparison of interval and Monte Carlo simulation for uncertainty propagation in atmospheric dispersion model. *Proceedings of the International Conference on Scientific Computing (CSC);* 2014.
39. Loschetter A, Rohmer J, de Lary L, Manceau JC. Dealing with uncertainty in risk assessments in early stages of a CO₂ geological storage project: comparison of pure-probabilistic and fuzzy-probabilistic frameworks. *Stoch Environ Res Risk Assess.* 2016;30:813-29.
40. Kumkov SI, Jaulin L. Comparison of Interval Analysis and Standard Statistical Methods for Estimating Experimental Data with Uncertainty. *Meas Tech.* 2019;62:105-10.
41. Pan Y, Zhang L, Li Z, Ding L. Improved fuzzy Bayesian network-based risk analysis with interval-valued fuzzy sets and D-S evidence theory. *IEEE Trans Fuzzy Syst.* 2019;28(9):2063-77.
42. Yang C, Zhang C, Jia C, editors. Fusion of Ship Fire Information Based on Fuzzy DS Evidence Theory. 2023 5th International Academic Exchange Conference on Science and Technology Innovation (IAECST); 2023; IEEE.
43. Delavar MR, Sadrykia M. Assessment of Enhanced Dempster-Shafer Theory for Uncertainty Modeling in a GIS-Based Seismic Vulnerability Assessment Model, Case Study—Tabriz City. *ISPRS Int J Geo-Inf.* 2020;9(4):195.
44. Daniel F. Bayesian and Dempster-Shafer models for combining multiple sources of evidence in a fraud detection system. *arXiv preprint arXiv:2104.07440.* 2021.

جدول ۵: نتایج ارزیابی ذهنی خبرگان از احتمال وقوع رویدادهای پایه

نام خبره	E5			E4			E3			E2			E1		
	{T,F}	{F}	{T}	{T,F}	{F}	{T}	{T,F}	{F}	{T}	{T,F}	{F}	{T}	{T,F}	{F}	{T}
BE1	۰.۵	۰.۴۹	۰.۰۱	۰.۲	۰.۵	۰.۳	۰.۱	۰.۵	۰.۴	۰.۰۵	۰.۹۴	۰.۰۱	۰.۵	۰.۵	۰
BE2	۰.۲	۰.۷۵	۰.۰۵	۰.۱	۰.۴	۰.۵	۰.۱	۰.۶	۰.۳	۰.۰۴	۰.۹۱	۰.۰۵	۰.۱	۰.۸۸	۰.۰۲
BE3	۰.۱	۰.۸۷	۰.۰۳	۰.۱	۰.۱	۰.۸	۰.۱	۰.۷	۰.۲	۰.۰۵	۰.۹	۰.۰۵	۰	۰.۹	۰.۱
BE4	۰.۱	۰.۸	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۸	۰.۰۵	۰.۶۵	۰.۳	۰.۰۵	۰.۹۹	۰.۰۵	۰.۱	۰.۷۵	۰.۱۵
BE5	۰.۲	۰.۷۸	۰.۰۲	۰.۲	۰.۶	۰.۲	۰.۱	۰.۵	۰.۴	۰.۰۵	۰.۹۹	۰.۰۵	۰.۱	۰.۹	۰.۰۵
BE6	۰.۰۵	۰.۹۵	۰	۰.۲	۰.۵	۰.۳	۰.۱	۰.۷	۰.۲	۰.۰۵	۰.۹۴	۰.۰۱	۰.۱۵	۰.۸	۰.۰۵
BE7	۰.۰۵	۰.۹	۰.۰۵	۰.۱	۰.۱	۰.۸	۰.۰۵	۰.۵	۰.۴۵	۰.۰۵	۰.۹	۰.۰۵	۰	۰.۹۸	۰.۰۲
BE8	۰.۱	۰.۸۳	۰.۰۷	۰.۱	۰	۰.۹	۰.۱	۰.۵	۰.۴	۰.۰۵	۰.۹	۰.۰۵	۰	۰.۹۵	۰.۰۵
BE9	۰.۰۵	۰.۹۳	۰.۰۲	۰.۲	۰.۳	۰.۵	۰.۱	۰.۴۵	۰.۴۵	۰.۰۲	۰.۹۳	۰.۰۵	۰	۰.۸۵	۰.۱۵
BE10	۰.۱۵	۰.۸	۰.۰۵	۰.۱	۰.۲	۰.۷	۰.۱	۰.۵	۰.۴	۰.۰۲	۰.۹۳	۰.۰۵	۰	۰.۹۸	۰.۰۲
BE11	۰.۰۷	۰.۹	۰.۰۳	۰.۱	۰.۲	۰.۷	۰.۱	۰.۶	۰.۳	۰.۰۲	۰.۹۳	۰.۰۵	۰	۰.۹۹	۰.۰۱
BE12	۰.۰۸	۰.۹	۰.۰۲	۰.۲	۰.۲	۰.۶	۰.۰۵	۰.۷۵	۰.۲	۰	۰.۹۹	۰.۰۱	۰	۰.۹۹	۰.۰۱
BE13	۰.۰۵	۰.۸	۰.۱۵	۰.۲	۰.۳	۰.۵	۰.۱	۰.۶	۰.۳	۰.۰۵	۰.۸۵	۰.۱	۰.۰۵	۰.۸۵	۰.۱
BE14	۰.۰۵	۰.۹	۰.۰۵	۰.۲	۰.۲	۰.۶	۰.۰۵	۰.۶	۰.۳۵	۰.۰۲	۰.۹۶	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۹۵	۰.۰۳
BE15	۰.۰۸	۰.۹	۰.۰۲	۰.۲	۰.۲	۰.۶	۰.۰۵	۰.۷۵	۰.۲	۰.۰۵	۰.۶۵	۰.۳	۰.۰۵	۰.۸	۰.۱۵
BE16	۰.۱	۰.۹	۰	۰.۲	۰.۴	۰.۴	۰.۰۵	۰.۷۵	۰.۲	۰.۰۵	۰.۶۵	۰.۳	۰	۱	۰
BE17	۰.۰۷	۰.۹	۰.۰۳	۰	۰.۳	۰.۷	۰.۰۵	۰.۵	۰.۴۵	۰.۰۳	۰.۷۷	۰.۲	۰.۰۵	۰.۸	۰.۱۵
BE18	۰.۱	۰.۸۸	۰.۰۲	۰.۱	۰.۱	۰.۸	۰.۱	۰.۵	۰.۴	۰.۰۵	۰.۸۵	۰.۱	۰.۰۵	۰.۸۵	۰.۱
BE19	۰.۱	۰.۸۹	۰.۰۱	۰.۱	۰.۱	۰.۸	۰.۱	۰.۶	۰.۳	۰.۰۵	۰.۸۵	۰.۱	۰.۰۸	۰.۹	۰.۰۲
BE20	۰.۰۵	۰.۸	۰.۱۵	۰.۱	۰.۸	۰.۱	۰.۰۵	۰.۶۵	۰.۳	۰.۰۵	۰.۹	۰.۰۵	۰.۰۵	۰.۷	۰.۲۵
BE21	۰.۰۷	۰.۹	۰.۰۳	۰	۰.۳	۰.۷	۰.۱	۰.۶	۰.۳	۰.۰۲	۰.۶۸	۰.۳	۰.۱	۰.۸	۰.۱
BE22	۰.۱۷	۰.۷	۰.۱۳	۰.۲	۰.۵	۰.۳	۰.۰۵	۰.۷۵	۰.۲	۰.۰۵	۰.۹	۰.۰۵	۰.۰۵	۰.۸۵	۰.۱
BE23	۰.۲۸	۰.۷	۰.۰۲	۰.۲	۰.۵	۰.۳	۰.۰۵	۰.۷	۰.۲۵	۰.۰۵	۰.۳۵	۰.۶	۰	۱	۰
BE24	۰.۱۸	۰.۸	۰.۰۲	۰.۱	۰.۱	۰.۸	۰.۱	۰.۶	۰.۳	۰.۰۵	۰.۳۵	۰.۶	۰	۰.۹	۰.۱
BE25	۰.۰۷	۰.۲۹	۰.۰۱	۰.۲	۰.۶	۰.۲	۰.۱	۰.۵	۰.۴	۰.۰۵	۰.۳۵	۰.۶	۰	۱	۰
BE26	۰.۰۷	۰.۲۹	۰.۰۱	۰.۲	۰.۸	۰	۰.۱	۰.۶	۰.۳	۰.۰۵	۰.۳۵	۰.۶	۰	۱	۰
BE27	۰.۰۸	۰.۹	۰.۰۲	۰.۱	۰.۳	۰.۶	۰.۰۵	۰.۷۵	۰.۲	۰.۰۵	۰.۸۵	۰.۱	۰	۰.۹۹	۰.۰۱
BE28	۰.۱۷	۰.۸	۰.۰۳	۰.۲	۰.۲	۰.۶	۰.۰۵	۰.۷	۰.۲۵	۰.۰۵	۰.۷۵	۰.۲	۰.۱	۰.۸۵	۰.۰۵
BE29	۰.۰۵	۰.۹	۰.۰۵	۰.۲	۰.۴	۰.۴	۰.۰۵	۰.۷۵	۰.۲	۰.۰۵	۰.۸	۰.۱۵	۰	۱	۰
BE30	۰.۰۸	۰.۹	۰.۰۲	۰.۲	۰.۴	۰.۴	۰.۰۵	۰.۷۵	۰.۲	۰.۰۵	۰.۹	۰.۰۵	۰	۱	۰
BE31	۰.۱۸	۰.۸	۰.۰۲	۰.۱	۰.۳	۰.۶	۰.۱	۰.۶	۰.۳	۰.۰۵	۰.۷۵	۰.۲	۰	۰.۹۸	۰.۰۲
BE32	۰.۱۵	۰.۶	۰.۲۵	۰.۱	۰.۳	۰.۶	۰.۱	۰.۷	۰.۲	۰.۰۵	۰.۸۵	۰.۱	۰	۰.۹۹	۰.۰۱
BE33	۰.۰۵	۰.۹	۰.۰۵	۰.۲	۰.۴	۰.۴	۰.۱	۰.۶	۰.۳	۰.۰۵	۰.۷	۰.۲۵	۰	۰.۹۸	۰.۰۲
BE34	۰.۱	۰.۷	۰.۲	۰.۱	۰.۴	۰.۵	۰.۱	۰.۶	۰.۳	۰.۰۵	۰.۷	۰.۲۵	۰	۰.۹۸	۰.۰۲
BE35	۰.۱	۰.۸	۰.۱	۰.۱	۰.۳	۰.۶	۰.۰۵	۰.۶۵	۰.۳	۰.۰۵	۰.۷۵	۰.۲	۰	۰.۹۸	۰.۰۲
BE36	۰.۱	۰.۸	۰.۱	۰.۱	۰.۴	۰.۵	۰.۰۵	۰.۷	۰.۲۵	۰.۰۵	۰.۷۵	۰.۲	۰	۰.۹	۰.۱
BE37	۰.۱۹	۰.۸	۰.۰۱	۰.۱	۰.۳	۰.۶	۰.۱	۰.۷	۰.۲	۰.۰۵	۰.۸۵	۰.۱	۰	۰.۹۸	۰.۰۲
BE38	۰.۱۹	۰.۸	۰.۰۱	۰.۱	۰.۳	۰.۶	۰.۱	۰.۷	۰.۲	۰.۱	۰.۳	۰.۶	۰	۱	۰
BE39	۰.۲۷	۰.۷	۰.۰۳	۰.۲	۰.۵	۰.۳	۰.۱	۰.۶	۰.۳	۰.۲	۰.۵	۰.۳	۰	۱	۰
BE40	۰.۴	۰.۵	۰.۱	۰.۱	۰.۴	۰.۵	۰.۱	۰.۷	۰.۲	۰.۱	۰.۴	۰.۵	۰	۱	۰
BE41	۰.۰۵	۰.۹	۰.۰۵	۰.۱	۰.۴	۰.۵	۰.۱	۰.۶	۰.۳	۰.۰۵	۰.۸۵	۰.۱	۰	۰.۸	۰.۲
BE42	۰.۰۹	۰.۹	۰.۱	۰.۱	۰.۴	۰.۵	۰.۰۵	۰.۷۵	۰.۲	۰.۰۵	۰.۸۵	۰.۱	۰	۰.۹	۰.۱
BE43	۰.۰۹	۰.۹	۰.۰۱	۰.۲	۰.۵	۰.۳	۰.۰۵	۰.۷	۰.۲۵	۰.۰۵	۰.۸۵	۰.۱	۰	۰.۹۹	۰.۰۱
BE44	۰.۱	۰.۴	۰.۵	۰.۱	۰.۴	۰.۵	۰.۱	۰.۶	۰.۳	۰.۰۵	۰.۹	۰.۰۵	۰.۱	۰.۴	۰.۵
BE45	۰.۰۱	۰.۴	۰.۵	۰.۱	۰.۴	۰.۵	۰.۱	۰.۷	۰.۲	۰.۰۵	۰.۹	۰.۰۵	۰.۱	۰.۴	۰.۵
BE46	۰.۰۴	۰.۹۵	۰.۰۱	۰.۱	۰.۳	۰.۶	۰.۰۵	۰.۷	۰.۲۵	۰.۰۵	۰.۷۵	۰.۲	۰	۰.۹۵	۰.۰۵
BE47	۰.۰۸	۰.۹	۰.۰۲	۰.۱	۰.۴	۰.۵	۰.۰۵	۰.۶۵	۰.۳	۰.۱	۰.۴	۰.۵	۰.۰۵	۰.۷	۰.۲۵

جدول ۶: فرآیند اجماع نظرات خبرگان و تعیین مقدار توابع جرم رویادهای پایه

ID	T	F	T,F	K	1-K	m1-5 DS (T)	m1-5 DS (F)	m1-5 DS (T,F)	Bel (T) DS	Pl (T) DS	Bel (F) DS	Pl (F) DS
BE1	۳۵E-۳	۴۱۱E-۱	۲۵E-۴	۵۸۵E-۱	۴۱۵E-۱	۸۶E-۲	۹۹E-۱	۶۰E-۴	۸۶E-۳	۹۲E-۲	۹۹E-۱	۹۹E-۱
BE2	۶۴E-۴	۳۱۰E-۱	۸۰۰E-۶	۶۹۰E-۱	۳۱۰E-۱	۲۰۶E-۳	۹۹۸E-۱	۲۵۸E-۵	۲۰۶E-۳	۲۰۹E-۳	۹۹۸E-۱	۹۹۸E-۱
BE3	۳۵۱E-۴	۱۳۳E-۱	۰۰۰E+۰	۸۶۷E-۱	۱۳۳E-۱	۲۶۴E-۳	۹۹۷E-۱	۰۰۰E+۰	۲۶۴E-۳	۲۶۴E-۳	۹۹۷E-۱	۹۹۷E-۱
BE4	۱۵۷E-۳	۱۰۲E-۱	۲۵E-۶	۸۹۷E-۱	۱۰۳E-۱	۱۵۲E-۲	۹۸۵E-۱	۲۴E-۵	۱۵۲E-۲	۱۵۲E-۲	۹۸۵E-۱	۹۸۵E-۱
BE5	۴۳E-۴	۴۲۵E-۱	۱۰۰E-۵	۵۷۵E-۱	۴۲۵E-۱	۱۰۱E-۳	۹۹۹E-۱	۲۳۵E-۵	۱۰۱E-۳	۱۰۱E-۳	۹۹۹E-۱	۹۹۹E-۱
BE6	۸۲۵E-۵	۵۲۷E-۱	۷۵E-۶	۴۳E-۱	۵۲۷E-۱	۱۵۷E-۴	۱۰۰E+۰	۱۴E-۵	۱۵۷E-۴	۱۷E-۴	۱۰۰E+۰	۱۰۰E+۰
BE7	۹۰۰E-۵	۹۷E-۲	۰۰۰E+۰	۹۰۳E-۱	۹۷E-۲	۹۷E-۴	۹۹۹E-۱	۰۰۰E+۰	۹۲E-۴	۹۲E-۴	۹۹۹E-۱	۹۹۹E-۱
BE8	۴۲۵E-۴	۵۰۴E-۲	۰۰۰E+۰	۹۴۹E-۱	۵۰۸E-۲	۸۳۷E-۳	۹۹۷E-۱	۰۰۰E+۰	۸۳۷E-۳	۸۳۷E-۳	۹۹۷E-۱	۹۹۷E-۱
BE9	۲۸۷E-۴	۲۱۸E-۱	۰۰۰E+۰	۷۸۲E-۱	۲۱۸E-۱	۱۲۰E-۳	۹۹۹E-۱	۰۰۰E+۰	۱۲۰E-۳	۱۲۰E-۳	۹۹۹E-۱	۹۹۹E-۱
BE10	۱۱۲E-۴	۱۵۹E-۱	۰۰۰E+۰	۸۴E-۱	۱۵۹E-۱	۷۰۳E-۴	۹۹۹E-۱	۰۰۰E+۰	۷۰۳E-۴	۷۰۳E-۴	۹۹۹E-۱	۹۹۹E-۱
BE11	۲۳E-۵	۱۹۲E-۱	۰۰۰E+۰	۸۰۸E-۱	۱۹۲E-۱	۱۱۷E-۴	۱۰۰E+۰	۰۰۰E+۰	۱۱۷E-۴	۱۱۷E-۴	۱۰۰E+۰	۱۰۰E+۰
BE12	۲۰۰E-۶	۳۰۷E-۱	۰۰۰E+۰	۶۹۳E-۱	۳۰۷E-۱	۶۵E-۶	۱۰۰E+۰	۰۰۰E+۰	۶۵E-۶	۶۵E-۶	۱۰۰E+۰	۱۰۰E+۰
BE13	۱۲E-۳	۲۴E-۱	۲۵E-۶	۷۵۸E-۱	۲۴E-۱	۵۱۹E-۳	۹۹۵E-۱	۱۰۲E-۵	۵۱۹E-۳	۵۲E-۳	۹۹۵E-۱	۹۹۵E-۱
BE14	۶۳۸E-۵	۲۳۵E-۱	۲۰۰E-۷	۷۶۵E-۱	۲۳۵E-۱	۲۷E-۴	۱۰۰E+۰	۸۵E-۷	۲۷E-۴	۲۷E-۴	۱۰۰E+۰	۱۰۰E+۰
BE15	۱۴E-۳	۱۸۷E-۱	۲۰۰E-۶	۸۱۲E-۱	۱۸۸E-۱	۷۶E-۳	۹۹۲E-۱	۱۰۲E-۵	۷۶E-۳	۷۶E-۳	۹۹۳E-۱	۹۹۳E-۱
BE16	۰۰۰E+۰	۳۲E-۱	۰۰۰E+۰	۶۶E-۱	۳۲E-۱	۰۰۰E+۰	۱۰۰E+۰	۰۰۰E+۰	۰۰۰E+۰	۰۰۰E+۰	۱۰۰E+۰	۱۰۰E+۰
BE17	۱۶E-۳	۱۰۹E-۱	۰۰۰E+۰	۸۹E-۱	۱۱۰E-۱	۱۶E-۲	۹۸۵E-۱	۰۰۰E+۰	۱۶E-۲	۱۶E-۲	۹۸۵E-۱	۹۸۵E-۱
BE18	۱۳E-۳	۹۵E-۲	۲۵E-۶	۹۰۴E-۱	۹۶۵E-۲	۱۶E-۲	۹۸۷E-۱	۲۵۹E-۵	۱۶E-۲	۱۶E-۲	۹۸۷E-۱	۹۸۷E-۱
BE19	۵۹E-۴	۱۲E-۱	۴۰۰E-۶	۸۷E-۱	۱۳E-۱	۴۸E-۳	۹۹۵E-۱	۳۲E-۵	۴۸E-۳	۴۸E-۳	۹۹۵E-۱	۹۹۵E-۱
BE20	۴۱۹E-۴	۳۸E-۱	۶۲۵E-۷	۶۱۸E-۱	۳۸E-۱	۱۱E-۳	۹۹۹E-۱	۱۶E-۶	۱۱E-۳	۱۱E-۳	۹۹۹E-۱	۹۹۹E-۱
BE21	۱۷E-۳	۱۲۸E-۱	۰۰۰E+۰	۸۷E-۱	۱۳E-۱	۱۳۸E-۲	۹۸E-۱	۰۰۰E+۰	۱۳۸E-۲	۱۳۸E-۲	۹۸E-۱	۹۸E-۱
BE22	۵۵E-۴	۴۱۷E-۱	۴۲۵E-۶	۵۸۳E-۱	۴۱۷E-۱	۱۳E-۳	۹۹۹E-۱	۱۰۲E-۵	۱۳E-۳	۱۳E-۳	۹۹۹E-۱	۹۹۹E-۱
BE23	۰۰۰E+۰	۲۰۶E-۱	۰۰۰E+۰	۷۹E-۱	۲۰۶E-۱	۰۰۰E+۰	۱۰۰E+۰	۰۰۰E+۰	۰۰۰E+۰	۰۰۰E+۰	۱۰۰E+۰	۱۰۰E+۰
BE24	۴۶E-۳	۴۹E-۲	۰۰۰E+۰	۹۴E-۱	۵۴E-۲	۸۶E-۲	۹۹۱E-۱	۰۰۰E+۰	۸۶E-۲	۸۶E-۲	۹۹۱E-۱	۹۹۱E-۱

ادامه جدول ۶: فرایند اجماع نظرات خبرگان و تعیین مقدار توزیع جرم رویدادهای پایه

ID	T	F	T,F	K	1-K	mi-5 DS (T)	mi-5 DS (F)	mi-5 DS (T,F)	Bel (T) DS	Pl (T) DS	Bel (F) DS	Pl (F) DS
BE25	۰.۰E+۰۰	۱.۹۰E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۸.۱۰E-۰۱	۱.۹۰E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰	۰.۰E+۰۰	۰.۰E+۰۰	۰.۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰
BE26	۰.۰E+۰۰	۲.۷۷E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۷.۲۳E-۰۱	۲.۷۷E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰	۰.۰E+۰۰	۰.۰E+۰۰	۰.۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰
BE27	۲.۶۳E-۰۵	۲.۷۹E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۷.۲۱E-۰۱	۲.۷۹E-۰۱	۹.۳۹E-۰۵	۱.۰۰E+۰۰	۹.۳۹E-۰۵	۹.۳۹E-۰۵	۹.۳۹E-۰۵	۱.۰۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰
BE28	۱.۷۹E-۰۳	۲.۲۱E-۰۱	۸.۵۰E-۰۶	۷.۷۷E-۰۱	۲.۲۳E-۰۱	۸.۰۲E-۰۳	۹.۹۲E-۰۱	۳.۸۱E-۰۵	۸.۰۲E-۰۳	۸.۰۷E-۰۳	۹.۹۲E-۰۱	۹.۹۲E-۰۱
BE29	۰.۰E+۰۰	۳.۸۸E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۶.۱۲E-۰۱	۳.۸۸E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰	۰.۰E+۰۰	۰.۰E+۰۰	۰.۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰
BE30	۰.۰E+۰۰	۴.۴۷E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۵.۵۳E-۰۱	۴.۴۷E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰	۰.۰E+۰۰	۰.۰E+۰۰	۰.۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰
BE31	۲.۸۰E-۰۴	۲.۱۵E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۷.۸۵E-۰۱	۲.۱۵E-۰۱	۱.۳۰E-۰۳	۹.۹۹E-۰۱	۱.۳۰E-۰۳	۱.۳۰E-۰۳	۱.۳۰E-۰۳	۹.۹۹E-۰۱	۹.۹۹E-۰۱
BE32	۱.۲۶E-۰۴	۲.۱۴E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۷.۸۶E-۰۱	۲.۱۴E-۰۱	۵.۸۹E-۰۴	۹.۹۹E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۵.۸۹E-۰۴	۵.۸۹E-۰۴	۹.۹۹E-۰۱	۹.۹۹E-۰۱
BE33	۱.۴۴E-۰۴	۲.۹۲E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۷.۰۷E-۰۱	۲.۹۳E-۰۱	۴.۹۱E-۰۴	۱.۰۰E+۰۰	۰.۰E+۰۰	۴.۹۱E-۰۴	۴.۹۱E-۰۴	۱.۰۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰
BE34	۴.۳۴E-۰۴	۲.۰۶E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۷.۹۴E-۰۱	۲.۰۶E-۰۱	۲.۰۹E-۰۳	۹.۹۸E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۲.۰۹E-۰۳	۲.۰۹E-۰۳	۹.۹۸E-۰۱	۹.۹۸E-۰۱
BE35	۲.۴۵E-۰۴	۱.۹۸E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۸.۰۲E-۰۱	۱.۹۸E-۰۱	۱.۲۴E-۰۳	۹.۹۹E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۱.۲۴E-۰۳	۱.۲۴E-۰۳	۹.۹۹E-۰۱	۹.۹۹E-۰۱
BE36	۹.۰۰E-۰۴	۲.۴۴E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۷.۵۶E-۰۱	۲.۴۴E-۰۱	۳.۶۹E-۰۳	۹.۹۶E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۳.۶۹E-۰۳	۳.۶۹E-۰۳	۹.۹۶E-۰۱	۹.۹۶E-۰۱
BE37	۳.۷۸E-۰۳	۱.۲۹E-۰۱	۲.۰۰E-۰۶	۸.۶۸E-۰۱	۱.۳۲E-۰۱	۲.۸۵E-۰۲	۹.۷۱E-۰۱	۱.۵۱E-۰۵	۲.۸۵E-۰۲	۲.۸۵E-۰۲	۹.۷۱E-۰۱	۹.۷۱E-۰۱
BE38	۰.۰E+۰۰	۱.۲۷E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۸.۷۳E-۰۱	۱.۲۷E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰	۰.۰E+۰۰	۰.۰E+۰۰	۰.۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰
BE39	۰.۰E+۰۰	۳.۳۳E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۶.۶۷E-۰۱	۳.۳۳E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰	۰.۰E+۰۰	۰.۰E+۰۰	۰.۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰
BE40	۰.۰E+۰۰	۱.۸۰E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۸.۲۰E-۰۱	۱.۸۰E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰	۰.۰E+۰۰	۰.۰E+۰۰	۰.۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰
BE41	۷.۲۰E-۰۴	۲.۳۹E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۷.۶۰E-۰۱	۲.۴۰E-۰۱	۳.۰۰E-۰۳	۹.۹۷E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۳.۰۰E-۰۳	۳.۰۰E-۰۳	۹.۹۷E-۰۱	۹.۹۷E-۰۱
BE42	۲.۲۵E-۰۴	۳.۲۱E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۶.۷۹E-۰۱	۳.۲۱E-۰۱	۷.۰۱E-۰۴	۹.۹۹E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۷.۰۱E-۰۴	۷.۰۱E-۰۴	۹.۹۹E-۰۱	۹.۹۹E-۰۱
BE43	۲.۲۵E-۰۵	۴.۶۹E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۵.۳۷E-۰۱	۴.۶۳E-۰۱	۴.۸۶E-۰۵	۱.۰۰E+۰۰	۰.۰E+۰۰	۴.۸۶E-۰۵	۴.۸۶E-۰۵	۱.۰۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰
BE44	۸.۶۴E-۰۳	۸.۳۱E-۰۲	۵.۰۰E-۰۶	۹.۰۸E-۰۱	۹.۱۸E-۰۲	۹.۴۱E-۰۲	۹.۰۶E-۰۱	۵.۶۵E-۰۵	۹.۴۱E-۰۲	۹.۴۱E-۰۲	۹.۰۶E-۰۱	۹.۰۶E-۰۱
BE45	۶.۴۸E-۰۳	۹.۵۰E-۰۲	۵.۰۰E-۰۶	۸.۹۹E-۰۱	۱.۰۱E-۰۱	۶.۳۸E-۰۲	۹.۳۶E-۰۱	۴.۹۳E-۰۵	۶.۳۸E-۰۲	۶.۳۸E-۰۲	۹.۳۶E-۰۱	۹.۳۶E-۰۱
BE46	۱.۳۱E-۰۴	۲.۲۶E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۷.۷۴E-۰۱	۲.۲۶E-۰۱	۵.۸۱E-۰۴	۹.۹۹E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۵.۸۱E-۰۴	۵.۸۱E-۰۴	۹.۹۹E-۰۱	۹.۹۹E-۰۱
BE47	۱.۲۶E-۰۴	۲.۷۹E-۰۱	۰.۰E+۰۰	۷.۲۰E-۰۱	۲.۸۰E-۰۱	۴.۵۱E-۰۴	۱.۰۰E+۰۰	۰.۰E+۰۰	۴.۵۱E-۰۴	۴.۵۱E-۰۴	۱.۰۰E+۰۰	۱.۰۰E+۰۰