



WEKERLE
INTERNATIONAL UNIVERSITY

Dealing with Uncertainty and Managing Risk

Book of Conference Proceedings

Budapest

2025

2nd Risk and Reliability in Business Decisions Conference

Wekerle International University

Budapest

2025

Editor:

Petra BENEDEK, PhD

associate professor

Wekerle International University

Reviewer:

Csaba HEGEDŰS, PhD

associate professor

University of Pannonia

Responsible publisher:

Imre BALOGH, PhD

rector, full professor

Wekerle International University

ISBN 978-615-7096-01-1

Contents

Soltani, A.: Improving Efficiency Through Risk Assessment: Predicting Natural Dissing Data Analysis and Machine Learning	3
Bottyán, B.: Measuring What Matters: Compliance Maturity Models for Risk-Informed Decision-Making	15
Szentes, B.: A PRIZMA módszertan páros összehasonlítással történő integrációja.....	26
Bucsi, Gy.: FMEA-alapú döntéstámogató keretrendszer fenntarthatósági átmenetek kockázatainak értékelésére – összehasonlító módszertani elemzés és döntéstámogató keret fejlesztése.....	Hiba! A könyvjelző nem létezik.

Improving Efficiency Through Risk Assessment: Predicting Natural Disasters Data Analysis and Machine Learning

Atieh Soltani

Abstract

This paper describes how integrating traditional risk management with data-driven analytics can enhance organizational preparedness for climate-related risks. Drawing on ISO 31000, COSO ERM, and the Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD) framework, the study combines good governance principles with machine learning applications to propose a structured process for climate risk management. The paper highlights that effective climate risk management extends beyond technical modeling, requiring leadership commitment and an organizational culture that supports transparency and adaptation. Machine learning improves predictive capability, while explainable and ethical AI are essential for trust and compliance. Embedding climate risk into enterprise risk systems transforms sustainability from compliance to a proactive strategy. Key actions include investing in data infrastructure, embedding climate risk into other enterprise risk management and other governance systems, and fostering cross-functional collaboration. The study delivers a process that unites risk theory, data analytics, and practice, helping organizations build resilience and capture opportunities arising from climate change.

Keywords: climate risk management, enterprise risk management, machine learning

1. Introduction

Climate change presents an escalating challenge to organizations worldwide, disrupting operations, supply chains, and financial stability while intensifying regulatory and stakeholder pressures. As extreme weather events, transition risks (associated with the global shift to a lower-carbon economy), and sustainability mandates are getting standardized and converge, organizations must move beyond reactive compliance and develop proactive strategies to identify, assess, and mitigate climate-related risks (IPCC, 2022; NGFS, 2025). Managing these risks effectively is essential not only for long-term resilience but also for maintaining competitiveness.

Traditional risk management frameworks, such as ISO 31000 and COSO ERM, provide a solid foundation for identifying and categorizing risks and ensuring accountability (ISO, 2018). However, these frameworks often rely on qualitative assessments that may be insufficient for capturing the complexity, interdependencies, and dynamic evolution of climate-related threats (Renn, 2008; Simpson et al., 2021; Bognár, Benedek, 2023). As a result, there is growing recognition of the need to complement conventional approaches with quantitative, data-driven methods that can enhance accuracy, predictive capability, and decision-making support.

Recent advances in data analytics and machine learning (ML) have opened new opportunities for improving climate risk management. ML techniques enable organizations to detect patterns in complex datasets, model non-linear interactions between environmental and financial variables, and forecast risk exposure under different climate scenarios (Tian et al., 2025; Rolnick et al., 2022). Integrating these methods into risk management systems allows companies to transition to dynamic, adaptive processes capable of continuous learning and improvement (Simpson et al., 2025; BIS-FSI, 2025). Despite these developments, many organizations struggle to operationalize data-driven risk assessment in ways that align with established management systems and governance guidelines, such as the Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD) recommendations and International Financial Reporting Standards (IFRS) S2 Climate-related Disclosures (IFRS Foundation, 2023; 2024).

This paper addresses this gap by proposing a structured approach to climate risk assessment that unites traditional risk management principles with data science methodologies. Building upon existing literature in climate risk management and machine learning applications, the paper outlines a process that guides organizations through the stages of scoping, data identification, qualitative and quantitative assessment, and iterative evaluation. The proposed

process emphasizes transparency, explainability, and adaptability—core principles for effective risk management (ISO, 2018; IPCC, 2022).

The contribution of this research is threefold. First, it synthesizes risk management and data science perspectives into an integrated approach applicable across industries. Second, it provides a process that organizations can adopt to embed climate risk within enterprise risk management systems. Third, it highlights the managerial and strategic implications of adopting data-driven, adaptive risk management practices. By this structured approach, the paper aims to support organizations in building more resilient climate risk management that aligns with both regulatory expectations and long-term sustainability goals.

2. Literature review

This chapter is organized to support the aim of the paper: to propose a hybrid framework combining traditional organizational risk management methods with machine learning for climate risk assessment. First, it surveys foundational principles and challenges in climate and organizational risk management. Next, it turns to machine learning approaches applied to climate-related risk, and finally discusses integration challenges and research gaps.

Risk management in organizations has long relied on structured frameworks (e.g., ISO 31000, COSO ERM) that guide the identification, evaluation, treatment, and monitoring of risks. However, climate change presents unique challenges, deep uncertainty, compounding hazards, and spatial–temporal dependencies that stretch over traditional approaches (Simpson et al., 2025). Because climate risks are becoming more frequent and severe, adaptive and dynamic methods are needed (Oppenheimer, Little, & Cooke, 2021).

Tian et al. (2025) present a recent survey of ML in climate finance, finding that supervised learning (a machine learning technique that uses labeled datasets to train algorithms to predict outcomes or classify data.) and ensemble models (a machine learning technique that combines multiple models to improve predictive performance, accuracy, and robustness.) are most applied for credit-risk evaluation under climate stress scenarios (Tian et al., 2025). They also note the emerging use of hybrid models combining physical climate inputs with financial data. In a complementary vein, Niculae et al. (2024) analyze publishing trends at the intersection of ML and climate research, demonstrating accelerating growth in works that attempt to link climate forecasting and decision support (Niculae et al., 2024).

Applied case studies show promise: for instance, “Leveraging Machine Learning for Enhanced Climate Risk Compliance” (Nimmala & Nimmala, 2022) outlines how financial institutions can use ML to improve scenario analyses, stress testing, and compliance monitoring

under evolving climate regulation. More broadly, Simpson et al. (2025) highlight that methodological advances—including ML, complex statistical models, and digital tools—are helping identify interdependencies across climate risks, improving risk assessments (Simpson et al., 2025).

In environmental and hazard modeling domains, ML also shows utility. For example, Salcedo-Sanz et al. (2022) review applications of ML in atmospheric extreme event prediction and attribution, noting strong performance in capturing rare events through tailored models (Salcedo-Sanz et al., 2022). Advances include convolutional neural networks for heatwave prediction (Miloshevich et al., 2022), and multimodal ML frameworks for flood prediction, combining geospatial and historical data modalities (Zeng & Bertsimas, 2023).

However, interpretability, data sparsity for extremes, overfitting, and model uncertainty remain the key challenges. The “black-box” nature of many ML models (opaque models where the internal workings and decision-making processes are not transparent, even to the creators) can conflict with organizations’ demand for transparency in risk decisions. Moreover, many ML climate studies remain at the proof-of-concept stage rather than being embedded in organizational risk processes in practice.

While traditional risk management provides structure and helps with risk mitigation, and ML offers predictive sophistication, **bridging the two is not trivial**. Successful integration demands:

- **Explainable AI (XAI):** Organizations require that ML outputs be interpretable and auditable, especially for regulators and internal stakeholders.
- **Hybrid risk frameworks:** Combining rule-based components (e.g., thresholds, scenario logic) with ML models offers a balance between structure and flexibility.
- **Scenario-driven ML:** Embedding ML models within scenario stress-testing, rather than purely data-driven forecasts, to align with strategic risk thinking.
- **Validation and robustness testing:** Models must be stress tested on tail scenarios (rare, extreme, and unlikely but high-impact events that lie at the far ends of a probability distribution) and extreme events, not just average conditions.
- **Data quality and feature engineering:** Climate data is noisy, heterogeneous, and sometimes lacking; carefully curated features and preprocessing are critical.

In the climate risk domain, Simpson et al. (2025) argue that new tools must capture interdependencies across hazards and sectors—i.e. systemic risk linkages that purely localized ML models miss (Simpson et al., 2025). Moreover, transition risk quantification is still

underdeveloped: Di Febo et al. (2025) call for more consistent proxies and frameworks to evaluate how organizations are exposed to regulatory and market shifts (Di Febo et al., 2025).

Another promising area is organizational learning and adaptive risk management. Organizations need mechanisms to monitor model performance, retrain as climate evolves, and update controls dynamically. Risk management frameworks (e.g. Renn's risk governance model) emphasize stakeholder participation, transparency, and continuous feedback loops (Renn, 2008).

While organizations increasingly aim to manage climate risk within their strategic and operational systems, many struggle to move from qualitative to quantitative, and at the same time actionable approaches. Machine learning methods have shown potential to improve prediction, scenario modeling, and risk insights, but their adoption is hindered by interpretability issues, data limitations, and lack of integration with decision processes.

3. The proposed process for climate risk management

Building upon the literature that emphasized the integration of conventional risk frameworks and machine learning in climate risk management, this section presents a structured approach that operationalizes these insights into a practical process framework.

The findings of this study culminate in a structured process that enables organizations to systematically identify, analyze, and quantify climate risks. This approach integrates principles of traditional risk management frameworks (e.g., ISO 31000) with modern, data-driven and machine learning (ML) methodologies to enhance risk awareness, preparedness, and adaptive capacity (ISO, 2018; Simpson et al., 2021; IPCC, 2022). The process reflects both theoretical insights and practical observations derived from case-based analysis, illustrating how climate risk can be addressed through a balance of qualitative evaluation and quantitative modeling.

3.1. Scoping and Context Definition

The first step, scoping, defines the boundaries, objectives, and stakeholders involved in the risk assessment process. This stage determines what constitutes "climate risk" for a given organization, taking into account exposure, sensitivity, and adaptive capacity across physical, operational, and strategic dimensions (IPCC, 2022; NGFS, 2025). Establishing a clear scope ensures alignment between environmental realities and organizational priorities.

At this phase, organizations identify key drivers of climate risk — such as extreme weather, transition policies (government or regulatory measures aimed at shifting the economy toward

low-carbon practices), or supply chain dependencies — and define relevant time horizons (short-, medium-, and long-term). This step mirrors the “establishing context” phase in ISO 31000, emphasizing stakeholder engagement (ISO, 2018). Defining scope early also facilitates later stages of quantitative modeling by determining the required data granularity and spatial or temporal scale (IFRS Foundation, 2023).

Data Identification and Integration

The second step focuses on data identification, collection, and integration. Effective climate risk assessment depends on reliable, multidimensional data that captures both internal performance metrics and external environmental variables. According to the Network for Greening the Financial System (NGFS, 2025), integrating structured datasets (e.g., financial, operational) with unstructured or spatial datasets (e.g., weather data, satellite imagery) enhances the accuracy of exposure modeling.

Organizations that build robust data infrastructures, linking climate variables with business performance indicators, can establish early-warning systems and stress-testing tools (IFRS Foundation, 2024). The growing adoption of open data platforms and cloud-based analytics has further enabled cross-functional collaboration, allowing sustainability, risk, and finance teams to work from consistent datasets (Rolnick et al., 2022).

However, data challenges remain a critical barrier. The IPCC (2022) highlights that data fragmentation, inconsistent methodologies, and lack of harmonized taxonomies limit comparability across organizations. Thus, this stage emphasizes data management — ensuring quality, accessibility, and documentation — as a foundation for credible risk quantification.

Qualitative Risk Assessment

Once data sources are consolidated, organizations proceed with qualitative assessment, where potential climate hazards are identified and their likely impacts evaluated through expert judgment and scenario analysis. This step draws on established methods such as SWOT (strengths, weaknesses, opportunities, threats), FMEA (failure mode and effects analysis), and risk mapping, adapted for climate-related contexts (Renn, 2008; Simpson et al., 2021).

Scenario-based assessments, recommended by the TCFD (2017/2021), allow organizations to explore alternative futures and evaluate the resilience of strategies under different warming trajectories. This stage also promotes cross-disciplinary dialogue, combining technical expertise with managerial perspectives to capture both quantitative and intangible risks, such as reputational or regulatory exposure (Patnaik & Fabrizio, 2023).

Qualitative insights guide the prioritization of risk categories for deeper analysis, ensuring that subsequent modeling efforts are resource-efficient and strategically relevant.

Quantitative Risk Analysis and Modeling

The fourth stage — quantitative assessment — operationalizes risk estimates through analytical models and ML algorithms. While traditional quantitative techniques rely on statistical probability distributions and historical data, machine learning enables dynamic forecasting and pattern recognition across non-linear datasets (Tian et al., 2025; Nimmala & Nimmala, 2022).

Machine learning methods such as regression models, decision trees, and convolutional neural networks can process complex interactions between environmental variables (temperature, precipitation, emissions) and financial metrics (asset exposure, operational losses). These techniques allow for more accurate estimation of potential damages and facilitate stress testing across multiple climate scenarios (Di Febo et al., 2025).

Nevertheless, interpretability remains essential. As emphasized by the Bank for International Settlements – Financial Stability Institute (BIS-FSI, 2025), models used in decision-making must be explainable, traceable, and aligned with good governance principles. Combining ML output with expert validation enhances transparency and ensures that technical complexity does not undermine managerial accountability.

Evaluation, Monitoring, and Continuous Improvement

The final stage of the structured approach emphasizes evaluation, monitoring, and feedback loops. Climate risk assessment is not a one-off exercise but a continuous learning process. Regularly updating models, reviewing assumptions, and incorporating new data allow organizations to adapt their risk posture as external conditions evolve (IPCC, 2022; Simpson et al., 2025).

Evaluation involves comparing model results against actual performance metrics to validate reliability and refine parameters. Monitoring mechanisms such as dashboards and key risk indicators (KRIs) support decision-makers by visualizing trends in exposure, vulnerability, and adaptive capacity. Over time, the integration of ML-based monitoring tools enables adaptive risk management, where organizations transition from risk registers to dynamic, data-driven decision systems (Rolnick et al., 2022; NGFS, 2025).

Feedback loops also reinforce organizational learning, embedding risk approach and resilience thinking into strategic planning and culture. By aligning with ISO 31000's principle

of continual improvement, this cyclical process ensures that risk management remains relevant, evidence-based, and responsive to both physical and transition risks (ISO, 2018).

4. Managerial Implications

The structured framework has significant implications for managers and policy-makers tasked with integrating climate risk into business strategy. First, managers must embed climate risk assessment within enterprise risk management, linking it to capital allocation, investment planning, and performance measurement (IFRS Foundation, 2023; TCFD, 2017/2021). This ensures that climate risks are considered not only as environmental factors but as financial and operational issues.

Second, successful implementation requires investment in data architecture and analytical capabilities. Managers should prioritize interoperable data systems, recruit analytical talent, and establish model-validation routines to ensure data integrity (NGFS, 2025; Tian et al., 2025). Partnerships with research institutions and technology providers can also accelerate model development and knowledge transfer.

Third, fostering a culture of explainability and ethical AI is crucial. Transparent communication of assumptions and uncertainty builds trust across management layers and stakeholders (BIS–FSI, 2025). Incorporating explainable AI into risk management processes aligns with regulatory expectations and strengthens decision accountability.

Finally, climate risk management should be seen as an iterative learning process. By institutionalizing regular reviews and scenario testing, organizations can continuously refine their risk understanding and resilience strategies (Simpson et al., 2025; IPCC, 2022). Over time, this structured approach transforms climate risk assessment from a compliance obligation into a strategic capability that enhances competitiveness, innovation, and sustainability performance.

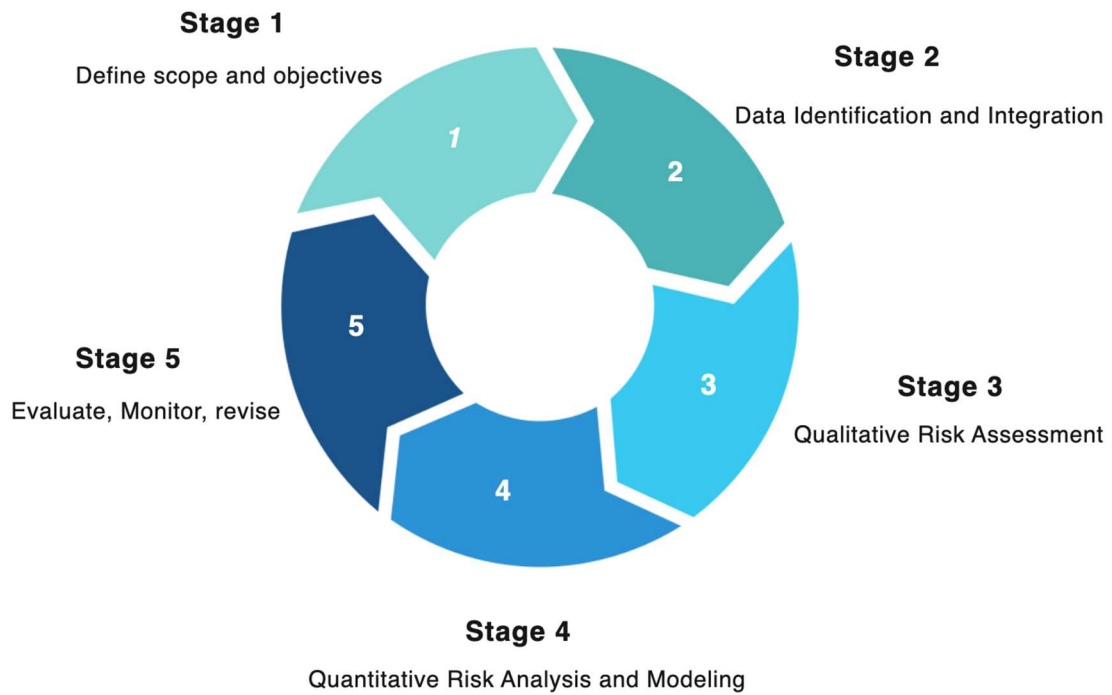


Figure 1: Climate risk assessment process framework

5. Conclusions

This paper has examined how the integration of traditional risk management frameworks and data-driven analytical methods can enhance organizational preparedness for climate-related risks. By bridging theoretical insights from established frameworks such as ISO 31000 and the TCFD with modern applications of data science and machine learning, the study developed a structured approach to climate risk evaluation that guides organizations from scoping and data identification through qualitative and quantitative analysis to continuous evaluation and learning.

The proposed process contributes to both academic and practical understanding of climate risk management. It demonstrates that effective climate risk management requires more than technical modeling; it relies on leadership commitment, and an organizational culture that supports transparency and adaptation (IPCC, 2022; IFRS Foundation, 2023; NGFS, 2025). The findings also reinforce the value of explainable and ethical AI in maintaining managerial trust and regulatory compliance, ensuring that advanced analytical tools strengthen rather than obscure decision-making processes (BIS–FSI, 2025).

From a practical perspective, the research highlights that embedding climate risk evaluation within enterprise risk management can transform sustainability efforts from reactive to proactive. Organizations that invest in robust data infrastructure, cross-functional collaboration, and adaptive learning mechanisms will be better equipped to anticipate disruptions, allocate resources effectively, and identify innovation opportunities arising from the low-carbon transition (Simpson et al., 2025; Patnaik & Fabrizio, 2023).

Nevertheless, the paper has certain limitations. The structured approach, while comprehensive, depends on the availability and reliability of data, interdisciplinary expertise, and institutional support. Variability in data quality and limited model interpretability remain persistent challenges that constrain broader application across sectors and regions. Future research should focus on developing standardized indicators for climate risk quantification, exploring explainable machine-learning architectures, and testing the framework across diverse sectors and company sizes.

In conclusion, this study advances the field of climate risk management by offering a process that unites risk theory, data analytics, and strategic practice. By institutionalizing structured, adaptive, and transparent risk processes, organizations can move toward greater resilience and sustainability in an era of accelerating environmental and economic change.

To operationalize this process, managers should prioritize three key actions. First, embed climate risk into enterprise management systems, ensuring that risk data informs capital allocation, operational planning, and sustainability targets. Second, invest in data systems and analytics capabilities that enable integration of climate, financial, and supply chain data and indicators. Finally, foster a culture of continuous learning and cross-functional collaboration, empowering teams to interpret analytical results, adjust strategies dynamically, and strengthen organizational resilience. Together, these actions can translate climate risk awareness into strategic advantage.

References

1. BIS FSI. (2025). Artificial intelligence explainability in finance: Challenges and policy considerations (FSI Insights on Policy Implementation No. 24). <https://www.bis.org/fsi/fsipapers24.pdf>
2. Bognár, F., Benedek, P. (2023): Multi-Method Risk Assessment Process for Sustainable Business – A Compliance Research Follow-up Case Study, *Acta Polytechnica Hungarica*, 20 : 4 pp. 45-64. <https://doi.org/10.12700/APH.20.4.2023.4.3>

3. Di Febo, E., Agliata, F., Caporale, D., & Sotgiu, G. (2025). Transition risk in climate change: A literature review. *Risks*, 13(4), 66. <https://doi.org/10.3390/risks13040066>
4. IFRS Foundation. (2023). IFRS S2 Climate-related Disclosures. <https://www.ifrs.org/issued-standards/ifrs-sustainability-standards-navigator/ifrs-s2-climate-related-disclosures/>
5. IFRS Foundation. (2024). Comparison: IFRS S2 Climate-related Disclosures and the TCFD Recommendations (Nov 2024). <https://www.ifrs.org/content/dam/ifrs/supporting-implementation/ifrs-s2/ifrs-s2-comparison-tcf.pdf>
6. International Organization for Standardization (ISO). (2018). ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines. <https://www.iso.org/standard/65694.html>
7. IPCC (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability (WG II) — Summary for Policymakers. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
8. ISO (2018). ISO 31000:2018 Risk Management – Guidelines,
9. Miloshevich, G., Cozian, B., Abry, P., Borgnat, P., & Bouchet, F. (2022). Probabilistic forecasts of extreme heatwaves using convolutional neural networks in a regime of lack of data. arXiv preprint arXiv:2208.00971. <https://arxiv.org/abs/2208.00971>
10. NGFS. (2025). Guide to Climate Scenario Analysis for Central Banks and Supervisors (Updated Jan 2025). <https://www.ngfs.net/en/publications-and-statistics/publications/guide-climate-scenario-analysis-central-banks-and-supervisors>
11. Nimmala, R., & Nimmala, J. (2022). Leveraging machine learning for enhanced climate risk compliance in financial institutions. *Journal of Artificial Intelligence & Cloud Computing*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/380195284_Leveraging_Machine_Learning_for_Enhanced_Climate_Risk_Compliance_in_Financial_Institutions
12. Oppenheimer, M., Little, C. M., & Cooke, R. M. (2021). Probabilistic sea-level projections at the coast by 2100. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 49(1), 111–142. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-080320-055847>
13. Patnaik, S., & Fabrizio, K. (2023). A new framework for how firms can manage climate risks. Brookings Institution. <https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2023/04/A-new-framework-for-how-firms-can-manage-climate-risks-FINAL.pdf>
14. Renn, O. (2008). *Risk governance: Coping with uncertainty in a complex world*. London, UK: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849772440>

15. Rolnick, D., Donti, P. L., Kaack, L. H., Kochanski, K., Lacoste, A., Sankaran, K., ... & Bengio, Y. (2022). Tackling climate change with machine learning. *ACM Computing Surveys*, 55(2), Article 42. <https://doi.org/10.1145/3485128>
16. Salcedo-Sanz, S., Pérez-Aracil, J., Ascenso, G., Del Ser, J., Casillas-Pérez, D., Kadow, C., Fister, D., Barriopedro, D., Restelli, M., & Giuliani, M. (2022). Analysis, characterization, prediction and attribution of extreme atmospheric events with machine learning: A review. arXiv preprint arXiv:2207.07580. <https://arxiv.org/abs/2207.07580>
17. Simpson, N. P., et al. (2025). Advances in complex climate change risk assessment for adaptation. *npj Climate Action*, 4, Article 74. <https://www.nature.com/articles/s44168-025-00281-y>
18. Simpson, N. P., Mach, K. J., Constable, A., Hess, J., Hogarth, R., Howden, M., & Lawrence, J. (2021). A framework for complex climate change risk assessment. *Annual Review of Environment and Resources*, 46(1), 1–31. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-080320-055847>
19. Simpson, N. P., Mach, K. J., Constable, A., Hess, J., Hogarth, R., Howden, M., & Lawrence, J. (2021). A framework for complex climate change risk assessment. *One Earth*, 4(4), 489–501. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.03.005>
20. TCFD. (2017; updated 2021). Recommendations of the TCFD. <https://www.fsb-tcfd.org/recommendations/>
21. Tian, Y., Zhang, L., Chen, Q., & Liu, Z. (2025). Machine learning applications in climate finance. *Technological Forecasting and Social Change*, 211, 123548. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2025.123548>
22. Zeng, B., & Bertsimas, D. (2023). Multimodal machine learning for flood risk prediction: Integrating geospatial and historical data. arXiv preprint arXiv:2301.12548. <https://arxiv.org/abs/2301.12548>

Measuring What Matters: Compliance Maturity Models for Risk-Informed Decision-Making

Béla Bottyán

PhD student, Ludovika University of Public Service

Abstract

Corporate compliance is no longer a one-off project, but a continuously evolving risk management function whose maturity changes over time. In practice, a variety of compliance maturity models exist, yet they are often difficult to align due to their different focal points. The predominantly 4–5 level, CMMI/OCEG-based process maturity models describe how structured and standardized the compliance function is, while program maturity frameworks – such as the U.S. Department of Justice’s Evaluation of Corporate Compliance Programs and the Ethics & Compliance Initiative’s High-Quality Ethics & Compliance Program (HQP) – primarily assess the substantive quality and effectiveness of ethics and compliance programs. The aim of this paper is to present a combined, risk-based approach that integrates these two model families into a single assessment tool. It introduces a matrix linking a five-level process maturity scale (1–5) to key elements derived from the DOJ and HQP frameworks (tone at the top, speak-up mechanisms, accountability, risk assessment, incentives and discipline). This matrix enables structured self-assessment of the current state, visualisation through a “heat map”, and the identification of risk-based development priorities. The paper emphasises that the objective is not to reach the highest maturity level in every area; rather, compliance maturity should be proportionate to the organisation’s risk profile. In this way, the combined matrix functions not as an end in itself or a scoring contest, but as a practical decision-support tool to guide effective resource allocation between compliance and broader risk management.

Keywords: compliance maturity, compliance programs, risk management, organisational culture

1. Introduction

Over the past few decades, corporate compliance has evolved from a support function ensuring adherence to legal requirements into a strategic risk management area. The rapid pace of regulatory change, the continuous tightening of supervisory expectations, the growing magnitude of reputational risks, and digitalisation together compel organisations to view compliance not as a static, one-off project but as a mode of operation embedded in organisational culture and subject to continuous development. Compliance is therefore not a task to be “ticked off” once, but an ongoing process of learning and adaptation, whose maturity changes over time – and can be deliberately developed.

In this context, compliance maturity models emerge as important tools, they help organisations map where they stand at a given point in time, where they would like to get to, and the steps needed to reach the desired level of sophistication. At the same time, the literature and practice offer a wide range of maturity models that differ in several respects. On the one hand, classic, typically four- or five-level process maturity models have appeared – following CMMI or OCEG logic – which primarily capture the organisation, integration, standardisation and measurability of the compliance function. These models address the question of how ad hoc or how structured and data-driven the compliance operation is.

On the other hand, frameworks that explicitly assess the substantive quality and effectiveness of the corporate ethics and compliance program, as well as the state of the ethical culture, have become increasingly prominent – most notably the U.S. Department of Justice’s guidance on the Evaluation of Corporate Compliance Programs and the Ethics & Compliance Initiative’s High-Quality Ethics & Compliance Program (HQP) model. These approaches and methods focus on what makes a program genuinely “high quality”, going beyond the mere existence of formal processes and documents. In practice, however, many organisations struggle with how to align these different models. Process maturity ladders do not separately assess the actual effectiveness of the compliance program or the organisation’s ethical culture, whereas program maturity frameworks do not necessarily provide guidance on the step-by-step development of operational processes. In addition, an increasing number of studies address the role and significance of compliance programs (Bottyán, 2025), as well as their concrete content and design, which helps to provide an overall picture of the developmental trajectories of such programs described in the literature to date (Weber & Wasieleski, 2013).

Furthermore, the principle of proportionality – that is, the alignment of compliance maturity with the organisation’s risk profile – is often stated only at a declarative level and is not linked

to a specific self-assessment tool. The aim of this paper is to propose a practice-oriented, risk-based approach to aligning the various compliance maturity models. To this end, we first suggest a multi-level CMMI/OCEG-based scale for measuring the maturity of compliance processes, and second, we populate the content dimensions of this scale with key elements drawn from the DOJ and HQP frameworks – including leadership example (tone at the top), speak-up mechanisms, accountability, risk assessment, and incentives and discipline. The resulting matrix enables a structured assessment of both process maturity and program quality, and supports risk-proportionate resource allocation and the identification of development priorities.

2. Theoretical background

Two complementary levels can be distinguished in interpreting compliance maturity, namely process maturity models and program maturity frameworks. Process maturity models help to assess how organised, standardised and measurable the compliance function is, while program maturity frameworks analyse the substantive quality and actual effectiveness of the corporate ethics and compliance program.

Process maturity models are typically four- or five-level “ladders” based on CMMI or OCEG logic (OCEG, 2023). The CMMI process assessment framework is presented in detail in the volume by Chrissis, Konrad and Shrum (Chrissis, Konrad, & Shrum, 2011). The lowest level denotes ad hoc operation, whereas the highest level describes formalised, data-driven and continuously improved compliance processes. These models primarily answer the question of “how mature is the functioning of the compliance function” – that is, what the governance looks like, how standardised the procedures are, and how monitoring, training and IT support operate.

Program maturity frameworks, by contrast, focus not on the technical sophistication of processes but on the overall quality and impact of the program. The U.S. Department of Justice’s Evaluation of Corporate Compliance Programs guidance examines the design, implementation and actual effectiveness of the program through questions relating, among others, to leadership example, risk assessment, reporting mechanisms, investigations, and incentives and discipline (U.S. Department of Justice, Criminal Division, 2024). The Ethics & Compliance Initiative’s High-Quality Ethics & Compliance Program (HQP) model, for its part, defines, in a research-based way, what makes an ethics and compliance program “high quality”, with particular emphasis on ethical culture, the speak-up environment, and accountability (Ethics & Compliance Initiative, 2018). These frameworks thus seek to answer the question of

“how good and how effective is the compliance program itself”, beyond the mere existence of formal processes.

Table 1: Process vs. program maturity approaches in compliance

Type of approach	Focus	Typical form	Example frameworks	Key question
Process maturity models	Organisation, standardisation and measurability of the compliance function	4–5 level ladder (ad hoc, defined, managed, optimised)	CMMI-based models, OCEG-based GRC maturity models	How mature is the operation of the compliance processes?
Program maturity frameworks	Substantive quality and effectiveness of the ethics and compliance program, and its impact on ethical culture	Thematic checklist / assessment framework (design, implementation, effectiveness)	DOJ Evaluation of Corporate Compliance Programs, ECI HQP	How good and how effective is the compliance program itself?

The approaches presented in the table above are not mutually exclusive alternatives, but rather complementary perspectives. One focuses primarily on the organisational maturity of the compliance function, while the other focuses on the substantive quality of the compliance program. Building on a systems-based perspective, ethics and compliance can be understood as related but distinct dimensions of governance, rather than being fully absorbed into a single legalistic function (de Klerk, 2021).

3. The combined matrix

The process maturity models and program maturity frameworks presented above are each useful on their own; however, in practice, real added value arises when the two are brought together into a single assessment tool. One possible way to do this is through a combined matrix in which one dimension is a five-level maturity scale based on CMMI/OCEG logic, and the other dimension consists of key elements derived from the DOJ and HQP frameworks.

On the horizontal axis of the proposed matrix, we find a five-level, generic process maturity scale with the following stages: (a) ad hoc, (b) basic, (c) defined, (d) managed, and (e) optimised. This scale specifically captures the maturity of compliance processes, the extent to which the various operational elements are organised, documented, repeatable, measurable, and integrated. On the vertical axis of the matrix, we see areas highlighted both by the DOJ and the ECI HQP as critical for program quality, for example: (a) tone at the top & governance; (b) speak-up and reporting channels; (c) accountability; (d) risk assessment; and (e) incentives and discipline.

The table below provides an illustrative example of the combined compliance maturity matrix, which links process maturity levels with program elements (tone at the top, speak-up, accountability, etc.). The level descriptions should not be regarded as universal standards. The specific wording and expectations should be tailored by each organisation to its own risk profile, regulatory context and maturity objectives. The primary purpose of the matrix is to provide a thinking framework for self-assessment and risk-proportionate development priorities, rather than to serve as a template to be adopted “as is”.

Table 2: Illustrative combined compliance maturity matrix

Program element / Level	1. Ad hoc	2. Basic	3. Defined	4. Managed	5. Optimised
Tone at the top & governance	No formal role, reactive, ad hoc responses	Responsible person exists, but leadership messages are weak and sporadic	Governance structure in place, regular communication on compliance	Leaders act as role models; compliance is part of decision-making	Consistent accountability for leaders, external benchmarking, continuous improvement
Speak-up and reporting channels	No or unknown channels; fear of retaliation	Channel exists, but trust and usage are low	Multiple channels; procedures are known and accessible	Speak-up is actively encouraged; visible “no retaliation” practice	High level of trust; trend-based learning and continuous improvement
Accountability	Consequences are ad hoc and person-dependent	Basic disciplinary regime with inconsistent application	Documented and mostly consistent system of consequences	Accountability applies at all organisational levels, including leaders	Data-driven, transparent, values-based accountability
Risk assessment	No formal risk assessment	Ad hoc or audit-driven assessments	Regular, documented risk assessments	Risk-based planning and data-driven reporting	Continuous monitoring, rapid response, and strategic integration
Incentives & disciplines	Compliance not reflected in performance evaluation; sanctions are rare	Sanctions exist, but positive incentives are scarce	Ethical/compliance criteria embedded in HR processes; documented procedures	Deliberate rewards for desired behaviour; consistent sanctions	Integrated, transparent, data-driven incentive and disciplinary system

Naturally, the list can be further expanded to meet the organisation’s specific needs (e.g., management of third parties, M&A, training and communication, investigations/forensics, etc.), but the five elements above provide a suitable starting point for the core dimensions of an ethics and compliance program. Each cell of the matrix provides a textual description of what levels 1–5 mean for the given element. For example, in the “speak-up and reporting channels” row,

level 1 means that there is no channel or it is barely known and fear of retaliation is prevalent; level 3 means that there are multiple channels and documented procedures, and a meaningful proportion of employees are aware of and occasionally use them; while at level 5 speak-up is a natural part of the culture, trust is high, the organisation learns from reports, analyses trends, and provides feedback.

Level descriptions for the other rows (tone at the top, accountability, risk assessment, incentives & discipline) can be formulated along similar lines. The aim is not to display textbook-style definitions in each table cell, but to provide practice-oriented descriptions that are easy to understand for those carrying out the self-assessment.

The main advantage of the combined matrix is that it makes visible, at the same time, the process maturity of each area (how structured, repeatable, measured and managed the operation is) and the quality of the ethics and compliance program (where the organisation stands in terms of tone at the top, speak-up, accountability, etc.). Thus, for example, a company may be at level 4 in risk assessment (risk-based, regular, data-driven), while only at level 2 in speak-up mechanisms (channels exist formally, but trust and usage are low). This type of “profile” helps to make it clear that the program is not uniformly developed but rather mosaic-like – certain elements are more advanced, while others lag behind.

One of the most straightforward uses of the matrix is structured self-assessment. It is advisable to carry out the self-assessment in the form of a workshop or questionnaire, in which the level descriptions for each row are jointly reviewed by the relevant stakeholders (compliance, legal, risk management, HR, business units), who then assign a score between 1 and 5 to the current state. Divergent scores should be discussed by the participants and, where possible, the final values should be supported by concrete evidence (statistics, reports, policies, audit findings). It is worth noting that a heat map can also be generated from the completed document (e.g. colouring cells red for levels 1–2, yellow for level 3, and green for levels 4–5), which, in a single visual, highlights where the main development opportunities lie. This helps to identify critical gaps (e.g. adequate tone at the top but low accountability; advanced risk assessment but weak speak-up), on the basis of which short- and medium-term development projects can be defined (policy updates, training, implementation of systems, changes in governance, modification of HR processes, etc.). This resonates with the view that HR processes and people management have a central role in compliance culture, and HR instruments – from performance management to disciplinary procedures – are among the most powerful levers of compliance culture (Benedek, 2014a, 2014b).

The method has the advantage of being relatively easy to implement, while still providing a more structured and considered picture than an informal, “naked-eye” assessment. Repeating the completion of the matrix from time to time (e.g., annually or every two years) also allows tracking trends, making visible where real progress is being made and where the program is stagnating.

In principle, the combined matrix can be applied in organisations of any size, but it can add the greatest value in the following situations. If a company has subsidiaries in several countries and needs to compare the compliance levels across different regions or business lines, the matrix allows separate “profiles” to be drawn up by country or business line, making internal similarities and differences clearly visible. In highly regulated sectors (e.g., financial services, pharmaceuticals, energy, telecommunications), the application of the matrix can also be particularly important, as compliance and risk management are closely linked and there is strong demand from senior management for structured reporting. In addition, the matrix may be particularly useful in organisations where a formal compliance program already exists, but there is a desire to take it to a higher level. For smaller organisations, a simplified version with fewer rows and shorter level descriptions can also be helpful, especially where compliance roles are not fully separated, and it is important to have a “one-page” tool that still provides an overview of where the organisation stands.

Overall, the combined matrix functions as a connecting framework that brings together the structured nature of process maturity models and the substantive depth of program maturity frameworks (DOJ, HQP). This makes it particularly suitable not only for describing compliance maturity but also as a practical tool for supporting risk-based decision-making and resource allocation.

4. Proportionality in assessing compliance maturity

One of the most important – yet often underrated – principles in applying compliance maturity models is proportionality. It is particularly worth highlighting that ISO 37301 explicitly emphasises the need for compliance management systems to be based on a risk-based approach and proportionality, meaning that the depth of controls should be aligned with the level of exposure (ISO, 2021). Recent empirical work on multi-method compliance risk assessment also underlines that the design of assessment processes has a direct impact on how effectively compliance can support sustainable business decision-making (Bognár & Benedek, 2023). In everyday practice, this means that it cannot be the objective for every organisation to

reach the highest maturity level in every single area. The more relevant question is which level of maturity is justified and sustainable given the risk profile of a given area.

The combined matrix provides a useful framework for this way of thinking as well. If the organisation assigns a score between 1 and 5 to each element (tone at the top, speak-up, accountability, risk assessment, incentives & discipline, etc.), it can not only map the current state but also define the target state. For example, in the case of a smaller subsidiary operating in a less regulated market, a “3” (defined, consistently applied practice) may be entirely acceptable in certain areas, whereas in a highly regulated, high-exposure business line, a “4” or “5” may be the appropriate target for the very same element.

A practical consequence of the risk-proportionate approach is that a distinction must be made between critical and lower-risk areas. Critical areas include, for example: (a) those with significant criminal or administrative exposure (e.g. corruption, money laundering, breaches of competition law), (b) those involving heightened data protection or information security risks (e.g. large volumes of personal data, processing of health data), (c) those where an incident caused by error may have serious consumer protection or product safety consequences, and (d) those where the organisation’s business model is subject to close regulatory supervision by design (e.g. banks, investment service providers, pharmaceutical manufacturers). In the banking sector, for instance, recent work on compliance risk assessment has proposed pairwise comparison-based methods to assess these high-risk areas in a consistent and transparent way (Bognár, Szentes, & Benedek, 2023).

In such areas, it is generally advisable to set higher target values in the matrix cells (e.g. levels 4–5), especially for elements such as accountability, risk assessment or speak-up mechanisms. By contrast, for lower-risk, more supportive processes (e.g. certain internal administrative processes, low-volume, highly standardised activities), a stable medium level of maturity (levels 2–3) may realistically be sufficient, provided that the basic controls are functioning and there is no material exposure.

The combined matrix thus functions not only as a diagnostic tool but also as an instrument to support resource allocation. If the organisation assigns not only a “current” value but also a target value to each row and column, three types of situations can be identified.

Table 3: Typical situations in risk-based compliance maturity assessment

Situation	Description / consequence
1. Lagging in a critical area	A high-risk element (e.g. AML, anti-corruption) is at a low maturity level (1–2), while the target would be 4–5. In such cases it is clear that a development project is needed (policy and process development, training, additional controls, system solutions, etc.).
2. Over-developed but low-risk area	A relatively low-risk process has been “built up” to level 4–5, although from a proportionality perspective a level 3 would be sufficient. This may indicate that too many resources are being spent here, while other, more critical areas suffer from a lack of resources.
3. Stable area at the target level	The current maturity level broadly corresponds to the target set on the basis of the risk profile. In these areas the main task is maintenance and ongoing fine-tuning rather than major development.

For compliance leaders and risk management professionals, this distinction has direct decision-support value. Based on the maturity matrix, it is possible to prepare a summary that shows, for example: (a) in which rows (elements) the gap between the “current” and the “target” maturity level is the largest; (b) which of these belong to the high-risk category; and (c) where both are true, whether it is justified to allocate a dedicated project, program or budget.

In practical terms, applying the principle of proportionality also means that management must consciously accept certain “non-level 5” states. If, based on the matrix, it can be clearly documented that in a low-risk area the organisation operates at level 3 by conscious decision, this is not a deficiency but a rational allocation of resources – provided that this is properly justified and periodically reviewed.

Ultimately, embedding proportionality into maturity assessment serves two important purposes. First, it prevents compliance maturity models from turning into an end-in-themselves “scoring contest”, in which organisations strive to reach the highest level at all costs, regardless of the actual risk environment. Second, it helps the compliance function direct the available, typically limited resources to where they most contribute to legal compliance, effective risk reduction, and the strengthening of ethical culture. Some ways in which ethical values can be embedded in corporate operations are highlighted in Murphy’s 1988 article (Murphy, 1988).

5. Conclusion

The primary value of the combined maturity matrix lies in bringing together, within a single framework, the operational maturity of compliance processes and the substantive quality of the ethics and compliance program. By linking a five-level CMMI/OCEG-style scale with DOJ/HQP-based key elements (tone at the top, speak-up, accountability, risk assessment, incentives and discipline), organisations gain a practical tool that can be used not only for a

structured assessment of the current state, but also for defining development directions and priorities.

The matrix is particularly useful for self-assessment, creating a “heat map”, and supporting risk-proportionate resource allocation, it helps identify where rapid intervention or targeted development is justified and where maintaining existing practice is sufficient. In this way, compliance maturity models cease to be instruments for collecting scores for their own sake and become decision-support tools that contribute directly to risk management.

This paper has focused on the practical presentation of the combined matrix and its possible applications, but it can also be understood as an extract from a broader theoretical framework. A more detailed background – including a comparative analysis of the various process and program maturity models (CMMI, OCEG, DOJ, HQP, sector-specific frameworks), as well as the impact of digitalisation and data-driven approaches – will be set out in a planned journal article. The aim of this conference paper has therefore been primarily to offer a concrete tool, easily applicable in everyday practice, for compliance and risk management professionals, helping them to move their organisations gradually from reactive legal compliance towards proactive, value-creating compliance.

References

1. Benedek, P. (2014). Compliance menedzsment HR szemmel, *Munkaügyi Szemle Online*, 2014(5), pp. 50-61.
2. Benedek, P. (2014). A vállalati compliance értékelése, *Vezetéstudomány*, 2014(45), pp. 29-39. <https://doi.org/10.14267/VEZTUD.2014.07.03>
3. Bognár, F., Benedek, P. (2023). Multi-Method Risk Assessment Process for Sustainable Business – A Compliance Research Follow-up Case Study, *Acta Polytechnica Hungarica*, 20(4), pp. 45-64. <https://doi.org/10.12700/APH.20.4.2023.4.3>
4. Bognár, F., Szentes, B., Benedek, P. (2023). Compliance Risk Assessment in the Banking Sector – Application of a Novel Pairwise Comparison-based PRISM Method, *Complexity Volume*, 2023, Issue 1. <https://doi.org/10.1155/2023/9165815>
5. Bottyán, B. (2025). A compliance paradigmája. *Pro Publico Bono – Magyar Közigazgatás*, 13(2), 97–112. <https://doi.org/10.32575/ppb.2025.2.5>
6. Chrissis, M. B., Konrad, M. D., & Shrum, S. (2011). *CMMI for development: Guidelines for process integration and product improvement* (3rd ed.). Addison-Wesley.

7. de Klerk, J. J. (2021). Combining ethics and compliance: A systems-based approach for more effective governance. *Business Ethics: A European Review*, 30(4), 734–748. <https://doi.org/10.1111/beer.12336>
8. Ethics & Compliance Initiative. (2018). High-quality ethics & compliance program measurement framework. Ethics & Compliance Initiative.
9. International Organization for Standardization. (2021). ISO 37301:2021 compliance management systems - Requirements with guidance for use. International Organization for Standardization.
10. Murphy, P. E. (1988). Implementing business ethics. *Journal of Business Ethics*, 7(12), 907–915.
11. OCEG. (2023). The GRC Capability Model 3.5 (Red Book). OCEG. <https://www.oceg.org/grccapabilitymodel35/>
12. U.S. Department of Justice, Criminal Division. (2024). Evaluation of corporate compliance programs (Updated September 2024). U.S. Department of Justice. <https://www.justice.gov/criminal/criminal-fraud/page/file/937501>
13. Weber, J., & Wasieleski, D. M. (2013). Corporate ethics and compliance programs: A report, analysis, and critique. *Journal of Business Ethics*, 112(4), 609–626. <https://doi.org/10.1007/s10551-012-1561-6>

A PRIZMA módszertan páros összehasonlítással történő integrációja

Szentes Balázs

mesteroktató, Pannon Egyetem, Gazdaságtudományi Kar

Absztrakt

A kockázatok mind személyes, mind üzleti életünket számtalan területen átszövik. Döntéseink meghozatala zömében ezen kockázatok kezelésére, lehetőség szerint megszüntetésére törekednek. Hogy megalapozott döntéseket hozhassunk, szükséges a kockázatok pontos azonosítása, hogy azokat a mértékük szerint tudjuk kezelni. A kockázatok azonosítására számtalan módszer áll rendelkezésre, a maguk előnyeivel és hátrányaival. A módszerek közül választásom a PRIZMA módszertanra esett, mely egy rendkívül szemléletes, a részkockázatok hatásainak bemutatására kiválóan alkalmas módszertan, ám bizonyos tényezők, mint például az értékelői szubjektivitás, az egyes kockázatok összemérésének helyén való kezelése stb. gyengeségek jeleit mutatja. Jelen tanulmányomban bemutatom, hogy a PRIZMA módszertan páros összehasonlítási technikákkal való kombinációja milyen előnyöket (és hátrányokat) nyújthat az alap PRIZMA módszertanhoz képest a kockázatok háttérének feltárása során. A célom eléréséhez bemutatom a módszertanfejlesztés sajátosságait, a kidolgozott módszertanok tesztelésének tapasztalatait, eredményeit.

Kulcsszavak: kockázatmenedzsment, PRIZMA, MCDM, módszerfejlesztés

1. Bevezetés

A kockázatok az üzleti működés megannyi területét áthatják. Gondolhatunk akár működési kockázatokra (erre kiváló – bár szomorú – példa a Delta Airlines 2016-ban, egy számítógépes rendszerhiba miatti, 2000 járatot érintő járatkimaradása, mely nagyságrendileg 150 millió dolláros veszteséget okozott), szabályozási környezet okozta kockázatokra (erre példa lehet a Volkswagen csoport körüli dízelskandalv, amely csak az Egyesült Államokban 25 milliárd dollár veszteséget okozott 2018-ban a vállalatnak), vagy akár tekinthetünk pozitívan is a kockázatokra, mint az innováció és a növekedés elősegítőjére (erre ékes példa a különféle streaming szolgáltatók másolásvédelemmel és szerzői jogok védelmével kapcsolatos fejlesztései, törekvései) (Gibson, 2023). A példák listája tetszőleges hosszúságban folytatható lenne, elemeiről megállapítható közös nevezőként, hogy a kockázatok időben történő felismerése, a szükséges döntések meghozatala jelentős károktól menthette volna meg a kockázatok következményeit elszenvedő szervezeteket.

Fel kell tennünk a kérdést: milyen megfontolások szükségesek a kockázatok kezeléséhez? Mint a menedzsment tudomány számos területén, a kockázatok menedzsmentjében sem létezik az egyetemleges csodaszerként alkalmazható megoldás. Számtalan módszer áll a döntéshozók rendelkezésére, melyek közül nem egyszerű a választás. Tanulmányom következő fejezeteiben bemutatom, hogy a kockázatok értékelésére szolgáló PRIZMA módszertan egyes korlátai hogyan oldhatóak fel a különféle páros összehasonlító technikákkal való integrációval.

2. A kockázatok és azonosításuk PRIZMA módszertannal

A kockázatok kezelése a legtöbb esetben a bizonytalanságok közepette meghozott vezetői döntések meghozatalát foglalja magában, mely mögött az információhiány áll (László, 2014).

De mit is tekinthetünk kockázatnak? A vállalati működés során kockázatnak tekinthetünk minden olyan akár külső, akár belső forrásból származó zavarokat, eseményeket, melyek bekövetkezése esetén veszélybe kerül(het) a vevői/ ügyféligények kielégítése vagy a vállalati érintettek biztonsága. (Horváth és Szilágyi, 2011).

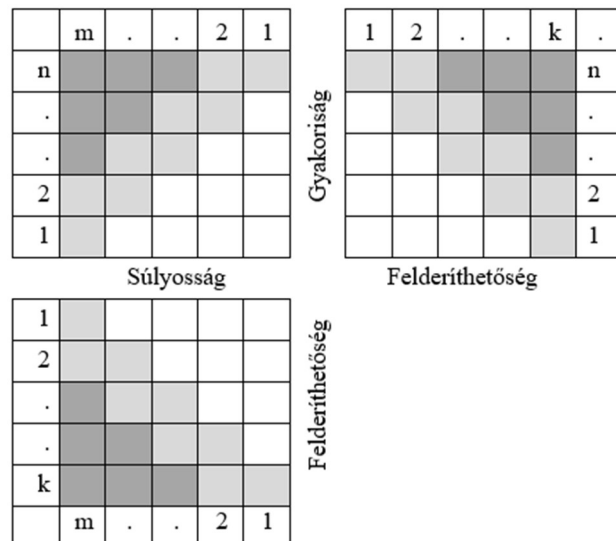
Az emberi elme a korlátai miatt mindig törekszik az egyszerűsítésre, próbálja egy –vagy néhány mutatóval – kifejezni a kockázatot (lásd például az FMEA módszertanát). A lehetséges hatások (károk) és a bekövetkezési valószínűségek összekapcsolásával az egyes események várható kimenetének értékei mérhetővé válnak (Galambos és Fekete, 2005), így a kockázatok azonosításával az azokra való felkészülés megkezdhető.

Az emberi gondolkodás sajátossága az is, hogy próbál képekben, sémákban, vizuálisan megjeleníthető formákban gondolkodni. A kockázatok értékelése során erre egy jó lehetőséget kínál a PRIZMA módszertan alkalmazása.

A PRIZMA módszertan a kockázatok egyes dimenziók szerint történő, a valós súlyuk szerinti azonosítását, kezelését teszi lehetővé, amennyiben kockázati mátrixok segítségével felírjuk a részleges kockázatok az alábbi 3 részkockázati mátrix segítségével (lásd 1. ábra). (Benedek és tsai., 2021)

A PRIZMA módszer épít az FMEA három kockázatértékelő dimenziójára (gyakoriság, súlyosság, felderíthetőség), ám alkalmazása során kockázatok értelmezése és összevetése, kezelése jelentősen különbözik az FMEA módszertan esetén alkalmazott megközelítéstől, az FMEA módszertan ugyanis az egyes vizsgált események összesített kockázati szintjére összpontosít, azok összesített rangsorolására világít rá. A kockázat értékelés során rendszeresen alulértékeli azon eseményeket, melyek ugyan magas részleges kockázatokkal rendelkeznek, ám összesített RPN számuk alacsonyabb, ami azonban az üzleti folyamatokban jelentős hibákat, akár leállásokat is okozhatnak (Bognár és Hegedűs, 2022).

A PRIZMA módszer általános felépítését szemlélteti az 1. ábra.



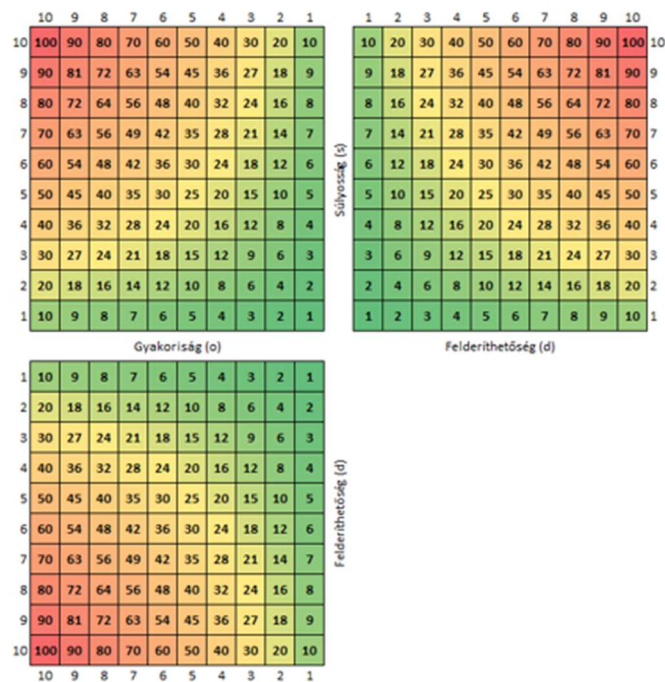
1. ábra: A PRIZMA módszertan általános modellje

forrás: Benedek és tsai., 2021

A PRIZMA módszer különösen jól alkalmazható olyan területeken, a kockázatok összemérhetősége azok különbözősége miatt nehézkes, ám mégis kiemelkedő fontosságú. Ilyen

terület lehet például fenntartható szervezetek compliance kockázatainak értékelése. (Bognár és Benedek, 2022)

A PRIZMA módszer igen szemléletes (egyfajta hőtérképként értelmezhető) képet tud festeni a kockázatok mibenlétéről a 3x2 dimenzió szerinti értékelés alapján létrejött PRIZMA minta segítségével, melyet a 2. ábra szemléltet. (Bognár és Hegedűs, 2022)



2. ábra: A PRIZMA minta szórás módszerrel
forrás: Bognár és Hegedűs, 2022 alapján

Bár a PRIZMA módszertan megoldást kínál az alulértékelt részleges kockázatok feltárására és kezelésére, a módszertan korlátairól sem feledkezhetünk meg. Kovács és társai (Kovács és tsai., 2022) rámutatnak, hogy a módszertan az FMEA elemzésnek csak három dimenziójára fókuszál, csak azokat vizsgálja. További kihívás, hogy a PRIZMA módszertan alkalmazási feltétele, hogy az értékelési dimenziók faktor súlya azonos legyen, máskülönben az eredmények torzítottak lesznek. Az értékelési folyamat az újszerű többtényezős döntési módszertanok (MCDM) nevezéktanából származó determinisztikus értékelési skálákon alapszik (Cinelli és tsai., 2022). A determinisztikus értékelési skálák rugalmatlanságából fakadóan, így a PRIZMA módszer esetén is, az alkalmazott adatok érzékenysége kulcsfontosságú.

3. A PRIZMA módszer integrációja többtényezős döntési technikákkal

A többtényezős döntési módszerek (Multi Criteria Decision Methods, MCDM) egy módszercsalád összefoglaló elnevezése, melybe olyan módszerek tartoznak, amik segítik azon döntések meghozatalát, ahol egyszerre több, gyakran egymással konfliktusba kerülő feltételnek kell egyszerre megfelelni. (Taherdoost és Madanchian, 2023) A módszertanok leggyakrabban a páros összehasonítás elvére alapoznak, így lehetővé teszik komplex rendszerek vizsgálatát és kiértékelését. Ilyen módszer például Guilford eljárás (Guilford, 1928), melyben az összehasonlítandó elemek párba rendezése után azok közötti preferenciák kerülnek meghatározásra és elemzésre.

A többtényezős döntéshozatali problémák – mint amilyen például a kockázatok kezelése is – megoldása során egy jól alkalmazható technika az Analytic(al) Hierarchy Process (AHP) (Saaty, 1980), mely működése során a matematikai és pszichológiai alapokra építve együttesen képes megoldani a Guilford-eljárás kritikájaként említett nagyszámú összehasonlítandó elemek együttes kezelését pusztán az elvégzendő páros összehasonlítások számának csökkentésével (Vaidya – Kumar, 2006).

A TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) módszertan egy többtényezős döntéshozatali módszertan, mely segít rangsorolni a különféle választási lehetőségeket aszerint, hogy azok milyen „távolságra” esnek az értékelendő szélőséges értékeiktől (Chakraborty, 2022). A legjobb választásnak, döntésnek tekinti azt az alternatívát, amelyik legkisebb távolságra található az ideális pozitív megoldástól, és a legtávolabb található a negatív ideálistól. (Chakraborty, 2022) Az egyes köztes alternatívák pedig az ideálisnak tekintett alternatívától számított távolságok szerint sorba rendezhetők.

Az MCDM módszerek talán legnagyobb előnye úgy foglалható össze, hogy képesek strukturált, átfogó, és egyben mégis kellően részletes támogatást adni a döntéshozatalhoz (Vatankhah és tsai., 2023).

A *Guilford eljárással kombinált PRIZMA módszertan* folyamatát mutatja be a 3. ábra. Az egyes lépések részletes leírása megtalálható Bognár és társainak publikációjában (Bognár és tsai, 2023)

A PRIZMA módszertan esetén alkalmazott 3x2 dimenzió az RPN-hez képest pontosabb kép kialakítására képes, míg a relatív fontosság kifejezése a páros összehasonlítás alkalmazásával lehetővé válik a szakértői konzisztencia vizsgálhatósága mellett. A bővítés eredményeként egy reális és teljes kép kapható a kockázatokról, melyet akár grafikusán ábrázolva szemléletesen lehet a döntéshozók számára bemutatni.

1. lépés	2. lépés	3. lépés
Az értékelés előkészítése	Az értékelési listák elkészítése	Az egyéni preferenciák felvétele és konzisztencia vizsgálat
A szakértői csoport összehívása, célok kitűzése, kockázatok listázása.	A Ross féle optimális elrendezés szerint az értékelendő kockázatok párba rendezése, mind gyakoriság (o), mind a súlyosság (s), mind a felderíthetőség (d) dimenziók szerint.	Az értékelők a 3 darab értékelési lista kitöltésével megadják egyéni értékeléseiket, melyek a Guilford eljárást alkalmazva feldolgozásra kerülnek. Az értékelők konzisztencia vizsgálata megtörténik.
4. lépés	5. lépés	6. lépés
Az egyéni értékelések hasonlóság vizsgálata	Az egyedi értékelések aggregálása és skálázása	A PRIZMA minta kiszámítása
A kockázatok sajátosságaihoz illeszkedő korrelációs együtthatók alapján az értékelők véleményegyezésének vizsgálata.	Az aggregálás és a skálázás végrehajtása mindhárom dimenzió szerint (gyakoriság, súlyosság, felderíthetőség).	Statisztikai elemzés végrehajtása a végső rangsor előállítására.
7. lépés	8. lépés	9. lépés
A PRIZMA érték kiszámítása minden eseményhez	Az események rangsorolása és hasonlóság vizsgálata	Kockázatkezelési akciótervek készítése és végrehajtása
Minden esemény több PRIZMA értékkel rendelkezik az alkalmazott PRIZMA függvényről függően.	A hasonlóság vizsgálat alapján az egyes szakértők véleménye minősíthető, jellemezhető.	Az események rangsorolása alapján a kockázatok kezelése prioritizálható.

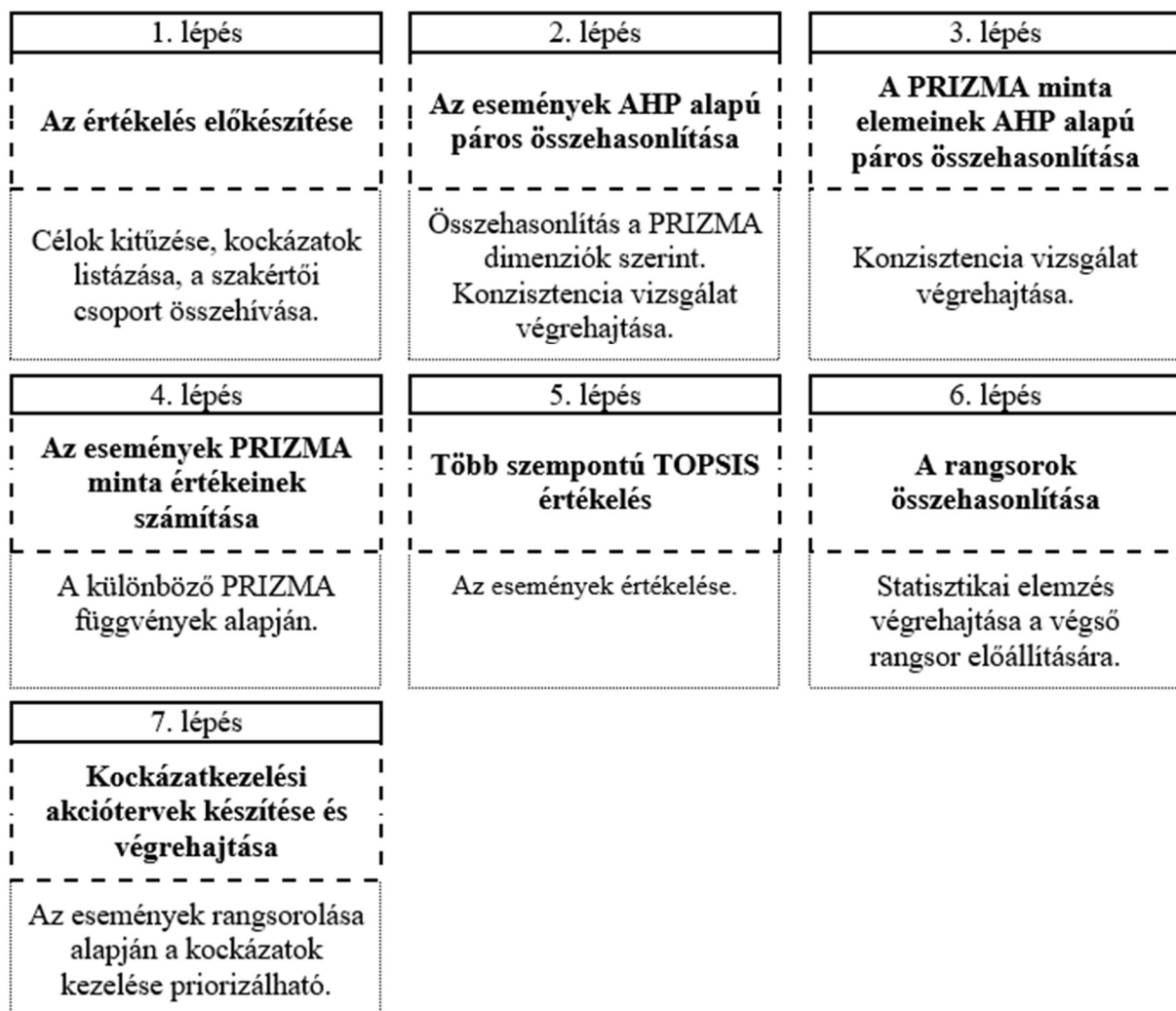
3. ábra: A Guilford eljárással kombinált PRIZMA módszertan folyamata

forrás: Bognár és tsai., 2023

A PRIZMA módszertan kombinálása Guilford azonban nem tud megoldást adni az értékelési tényezők azonos faktorsúlyának problémájára, azt nem képes orvosolni. További probléma a Guilford-eljárással kombinált PRIZMA módszertan esetén, hogy az ott alkalmazott páros összehasonlítás során az azonos minősítés nem megengedett, egyértelműen állást kell foglalni az értékelőnek a preferenciáival kapcsolatban. A gyakorlatban ez erős megkötés lehet – főleg a műszaki kockázatértékelés során – mert előfordulhat olyan összehasonlítás, ahol a preferenciát

az értékelő nem tudja egyértelműen megadni. Az AHP-TOPSIS alapú páros összehasonlítás esetében az azonos minősítés megengedett, továbbá megoldást kínál faktorsúlyok problémájának kezelésére.

Az *AHP-TOPSIS* alapokon bővített *PRIZMA* módszertan folyamata látható a 4. ábrán, részletes leírása megtalálható Bognár és tsai. tanulmányában (Bognár és tsai., 2022)



4. ábra: Az AHP-TOPSIS alapokon bővített PRIZMA módszertan folyamata

forrás: Bognár és tsai., 2022

A továbbfejlesztett módszertanok alkalmazhatóságnak vizsgálatára esettanulmányok kerültek felvételre és elemzésre. A *Guilford eljárással kombinált PRIZMA módszertan* alkalmazhatóságának vizsgálatára egy kereskedelmi bank compliance kockázatainak vizsgálatára felvett esettanulmányt alkalmazva került sor. Az eset kiválasztását indokolta, hogy az egyes potenciális kockázatok számszaki összevetése (így rangsorolása) meglehetősen nehéz,

mivel nagyon ritkán fordul elő két azonos minősítésű esemény. A Guilford eljárás a páros összehasonlítások során nem engedi meg az egyes összehasonlítandó elemek azonos minősítését, így az esetválasztás megfelelő volt. A hagyományos módszerek alkalmazhatóságának korlátja a számszaki összevetések nehézsége, így a páros összevetés alkalmazása megfelelő volt.

A módszertan alkalmazása segítségével a bank által korábban használt kockázati mátrixon alapuló, 4 kockázati kategóriát alkalmazó beméréshez képest egy pontosabb bemérés vált lehetővé a lehetséges folyamatos skála alkalmazásával. Mind az abszolút, mind a relatív fontosság is megállapíthatóvá vált, a PRIZMA dimenziók mentén. Az alkalmazott módszertan a banki compliance szakértők tetszését is elnyerte, a módszertant integrálták kockázatértékelési folyamatukba.

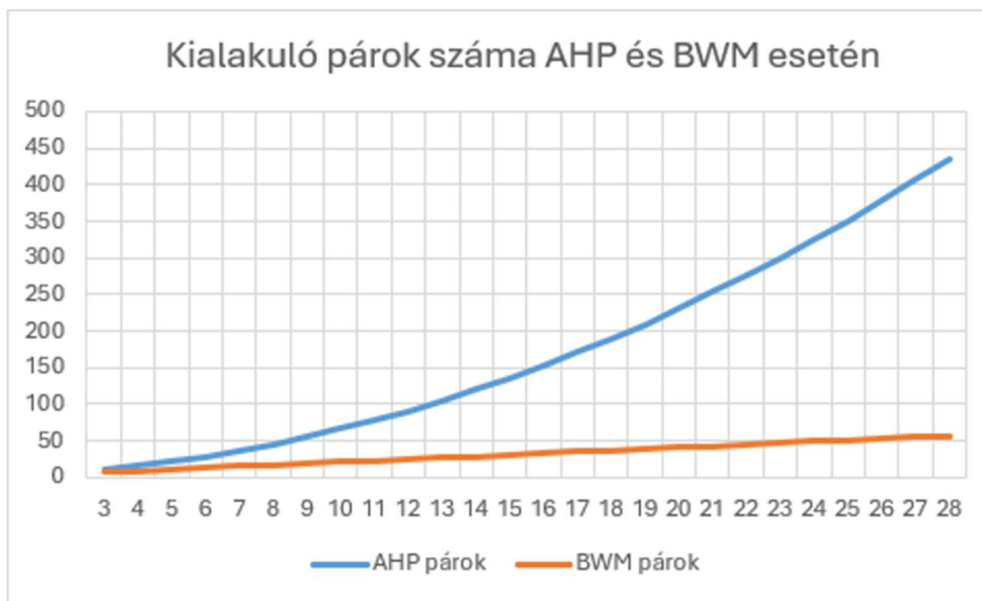
Az *AHP-TOPSIS* eljárással kombinált *PRIZMA* módszertan alkalmazhatóságának vizsgálatára egy atomerőmű logisztikai osztályának működését érintő kockázatok felmérésére felvett esettanulmányt alkalmazva került sor. Azért esett a választás a logisztikai osztály kockázatainak vizsgálatára, mivel azok jellemzően műszaki jellegűek, zömében pontosan mérhető, számszerűsíthető kockázatok voltak. A gyakran előforduló azonos kockázat minősítések nem tették lehetővé a Guilford alapú páros összehasonlítás alkalmazását (ahol az indifferencia nem megengedett az összehasonlítás során), így más páros összehasonlítás, az AHP-TOPSIS módszertan bizonyult működőképes kiterjesztésnek a PRIZMA módszertanhoz.

Az eredeti PRIZMA módszer kritikájaként azonosított, eltérő faktorsúlyok problémája az AHP-TOPSIS módszertannal való kombinációval kezelhetővé vált. Az egyes kockázatok, alternatívák mélységben történő elemzése lehetővé vált a pozitív és a negatív ideális megoldásokkal való összevetetés révén.

4. A módszerfejlesztés tapasztalatai

1. A páros összehasonlítással való integrációval a PRIZMA módszertan továbbra is alkalmas marad a kockázatok vizsgálatára. A kockázatok pontosan összevethetőek lesznek. A párok számossága azonban (elsősorban az értékelői elme korlátai miatt) korlátozó tényezőt jelent a módszer alkalmazhatósága szempontjából. A nagy számú kockázatok páros összevetése megterhelő az értékelők számára. Ennek kiküszöbölésére alapvetően két út mutatkozik. Az első szerint a páros összehasonlítással kiterjesztett módszerek alkalmazása a nagy számú, operatív kockázatok helyett inkább stratégiai fókuszú kell legyen. Ekkor a kockázatok számossága csökkenthető, ám jelentőségük többnyire magasabbá válik. A másik lehetséges fejlesztési irány más páros

összehasonlító technikákkal történő integráció lehet. Alkalmasnak tűnik erre a célra a Best Worst Method (BWM) technika alkalmazása (Rezaei, 2015), mely az összehasonlítandó párok számosságát jelentősen tudja csökkenteni mind a Guilford, mind az AHP alapú páros összehasonlításokhoz képest. Az összehasonlítandó párok számának alakulását mutatja az egyes módszertanok esetén az összehasonlítandó elemek számosságának függvényében az 5. ábra.



5. ábra: A kialakuló párok száma AHP és BWM módszerek alkalmazása esetén
forrás: saját szerkesztés

2. A szakértők véleményalkotásának a páros összehasonlítás során fennálló bizonytalanságait nem lehetett kellően modellezni a Guilford eljárással történt kombináció során, mivel a javasolt módszer bináris kimenetet írt elő (az egyiket vagy a másikat preferálja az összehasonlítás során, az egyenlőség nem volt megengedett) a preferenciákkal kapcsolatban. Ez problémát okozhat az indifferencia esetének kezelése szempontjából. Például, ha azt kockázati helyzetet szeretnénk megvizsgálni, hogy egy repülőgép jobb szárnyának vagy a bal szárnyának leszakadásának a következménye lesz-e súlyosabb a repülőgép levegőben maradása szempontjából, akkor belátható, hogy a Guilford-eljárással egy megoldhatatlan probléma áll elő, mert a Guilford-eljárás nem engedi meg az indifferenciát a döntéshozó számára. Ezt a problémát át lehet hidalni úgy, hogy a „szárny leszakadás” kategóriában szerepeltetjük a tételt az összehasonlításban és nem teszünk különbséget jobb és bal szárny között. A limitáció hatása markánsan ott

jelenik meg, amikor a fent említett példa során például a repülőgép farok és szárny leszakadásának következményét szeretnénk összehasonlítani. A problémára megoldást kínál az AHP, vagy az AHP-TOPSIS módszertanokkal történő integráció.

3. A kockázati faktorok becslései zömében korábbi megfigyeléseken és tapasztalatokon alapulnak, ezért megfontolandó a javasolt módszertanok kibővítése a megfigyelések bizonytalanságának vagy a döntési hibák kockázatainak kezelésével. A szakértői bizonytalanság kezelésére megoldást adhat például a fuzzyfikáció alkalmazása.

5. Összefoglalás

A kockázatok azonosítása, minősítése, helyén való kezelése minden vezető számára elsődleges fontosságú az üzleti működés sikerességének biztosítása szempontjából. Ehhez számtalan módszer áll rendelkezésükre, azonban a különféle kockázatmenedzsment technikák előnyeik mellett hátrányokkal is bírnak. Ezek a hátrányok egy tudatos módszerfejlesztéssel, megfelelően kiválasztott módszertanok segítségével kiküszöbölhetőek.

Tanulmányomban a PRIZMA módszertan egyes gyengeségeinek kiküszöbölésére bemutattam a PRIZMA módszertan páros összehasonlítással történő integrációjának két lehetséges fejlesztési irányát. A kidolgozott módszertanok alkalmazhatóságát esettanulmányok tanulságaival szemléltettem, majd az eredményekre építve útmutatást adtam a módszertanok közötti választásra. A bemutatott módszertani fejlesztések működőképes kockázatrangsoroló technikákat eredményeztek, azonban a módszertanok további korlátokkal is rendelkeznek: a páros összehasonlítások nagy számossága miatt (például az operatív kockázatok nagy száma esetén), azok nehézkesen alkalmazhatóak az értékelők számára. Ennek orvoslására a PRIZMA módszertannak egyéb technikákkal (például a Best Worst Method – BWM) történő integrálása megoldást adhat, mely későbbi fejlesztési terveim között szerepel. Az értékelői indifferencia kezelésére az AHP illetve AHP-TOPSIS alapú bővítése a PRIZMA módszertannak megfelelő megoldást jelenthet. Az értékelői bizonytalanságok kezelésére például a fuzzyfikáció adhat megoldást.

Felhasznált irodalom

1. Benedek, P., Bognár, F., Kövesi, J. (2021). A rejtett kockázatok becslésének egy új lehetősége - A PRIZMA módszer alkalmazása compliance menedzsment érzékeny területen. *in. Szentes, Balázs (szerk.): A digitális transzformáció hatásai és kitörési lehetőségei a COVID utáni időszak karbantartásában – Nemzetközi konferencia*

kiadványa. Pannon Egyetem Gazdaságtudományi Kar, Veszprém (2021) pp. 81-92. , 12 p.
ISBN: 978-963-396-213-8

2. Bognár, F., Benedek, P. (2022). Multi-Method Risk Assessment Process for Sustainable Business—A compliance research Follow-up Case Study. *Acta Polytech. Hung.*
https://acta.uni-obuda.hu/Bognar_Benedek_133.pdf
3. Bognár, F., Hegedűs Cs. (2022). Description and Consequences on some Aggregation functions of PRISM (Partial Risk Map) Risk Assessment Method. *Mathematics* 10(5): 676. <https://doi.org/10.3390/math10050676>
4. Bognár, F., Szentes, B., Benedek, P. (2022). Development of the PRISM risk assessment method based on a multiple AHP-TOPSIS approach. *Risks*, 10(11), 213.
<https://doi.org/10.3390/risks10110213>
5. Bognár, F., Szentes, B., Benedek, P. (2023). Compliance Risk Assessment in the Banking Sector: Application of a Novel Pairwise Comparison-Based PRISM Method. *Complexity*, 2023(1), 9165815. <https://doi.org/10.1155/2023/9165815>
6. Chakraborty, S. (2022). TOPSIS and Modified TOPSIS: A comparative analysis. *Decision Analytics Journal*, 2, 100021. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2021.100021>
7. Cinelli, M., Kadziński, M., Miebs, G., Gonzalez, M., Słowiński, R. (2022). Recommending multiple criteria decision analysis methods with a new taxonomy-based decision support system. *European Journal of Operational Research* 302(2): 633-651.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.01.011>
8. Galambos, P., Fekete, I. (2005). Kockázatelemzés lépésről lépésre. ETK Szolgáltató Zrt. ISBN 963 86905 0 X
9. Gibson, K. (2023). What Is Risk Management & Why Is It Important? *Harvard Business School*. <https://online.hbs.edu/blog/post/risk-management> letöltve: 2025.11.20.
10. Guilford, J. P. (1928). The method of paired comparisons as a psychometric method. *Psychological Review*, 35(6), pp. 494–506. <https://doi.org/10.1037/h0071114>
11. Horváth, Zs., Szlávik, P. (2011). Vállalati integrált kockázatkezelés I–II. *Minőség és Megbízhatóság*, 2011/3. szám pp. 124–130 és 2011/4. szám pp. 219–226.
12. Kovács, Z., Csizmadia, T., Mihálcz, I., Kosztyán, Zs. T. (2022). Multipurpose Aggregation in Risk Assessment. *Mathematics* 10: 3166.
<https://doi.org/10.3390/math10173166>
13. László, G. (2014). Kockázatértékelés, kockázatmenedzsment. Nemzeti Közszolgálati Egyetem.

14. Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega* 53: 49–57.
<https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009>
15. Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*, New York: McGraw-Hill, ISBN:978-0070543713
16. Taherdoost, H., Madanchian, M. (2023). Multi-criteria decision making (MCDM) methods and concepts. *Encyclopedia*, 3(1), 77-87.
<https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010006>
17. Vaidya, O. S., Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of operational research*, 169(1), 1-29.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.028>
18. Vatankhah, S., Darvishmotevali, M., Rahimi, R., Jamali, S. M., Ale Ebrahim, N. (2023). Assessing the application of multi-criteria decision making techniques in hospitality and tourism research: a bibliometric study. *International Journal of Contemporary Hospitality Management*. 35 (7): 2590–2623. <https://doi.org/10.1108/IJCHM-05-2022-0643>

FMEA-alapú döntéstámogató keretrendszer fenntarthatósági átmenetek kockázatainak értékelésére - Összehasonlító módszertani elemzés és döntéstámogató keret fejlesztése

Bucsi György Ferenc

Oktatási asszisztens, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gazdaság- és Társadalomtudományi Kar, Menedzsment és Vállalkozásgazdaságtan Tanszék

Absztrakt

A fenntarthatósági átmenetek kockázatkezelése olyan döntési környezetben zajlik, amelyet heterogén kockázattípusok, hosszú időtávok és jelentős bizonytalanság jellemeznek. Ezek a sajátosságok megkérdőjelezzik a hagyományos, technikai fókuszú kockázatelemzési módszerek általános alkalmazhatóságát, különösen akkor, amikor a kockázatok nem kizárólag diszkrét eseményekhez, hanem rendszerszintű, intézményi és normatív folyamatokhoz kapcsolódnak. A tanulmány célja annak elméleti–módszertani vizsgálata, hogy az FMEA-alapú döntéstámogatás milyen feltételek mellett alkalmazható a fenntarthatósági átmenetek kockázatainak értékelésére.

A tanulmány tipizálja a fenntarthatósági átmenetekhez kötődő kockázatokat, majd elemzi, hogy ezek milyen mértékben és milyen korlátok mellett strukturálhatók FMEA-logika mentén. Bemutatja a klasszikus Risk Priority Number, az Action Priority és a kiterjesztett, többkritériumos FMEA-megközelítések alkalmazhatóságát, valamint azok döntéstámogatási következményeit a különböző kockázattípusok esetében. Az elemzést empirikus eredmények is alátámasztják, amelyek rámutatnak arra, hogy a prioritizálási módszer megválasztása azonos bemeneti információk mellett is eltérő kockázati rangsorokhoz és döntési kimenetekhez vezethet. A tanulmány fő következtetése szerint az FMEA nem univerzális kockázatkezelési megoldás, hanem kontextusfüggő döntéstámogató eszköz, amely akkor járul hozzá érdemben a fenntarthatósági átmenetek sikeréhez, ha alkalmazása során a módszertani kompromisszumok explicitté válnak, és a kockázatok jellegéhez illeszkedő prioritizálási logika kerül kiválasztásra.

Kulcsszavak: fenntarthatósági átmenetek, kockázatkezelés, FMEA-alapú döntéstámogatás, Action Priority, többkritériumos döntéstámogatás

1. Bevezetés

A fenntarthatósági átmenetek – különösen az energetikai, technológiai és szervezeti átalakulások – napjaink gazdasági és társadalmi folyamataiban kiemelt jelentőséggel bírnak. Ezen átmenetek célja a hosszú távon fenntartható működés biztosítása, ugyanakkor megvalósításuk jelentős bizonytalanságokkal és összetett kockázatokkal jár. A döntéshozók számára ezért kulcskérdéssé vált olyan strukturált döntéstámogató eszközök alkalmazása, amelyek képesek a potenciális hibák, kockázatok és következmények azonosítására, valamint azok prioritizálására már a tervezési, vagy a megvalósítási szakasz korai fázisaiban.

A fenntarthatósági átmenetek kockázati sajátosságai több szempontból is eltérnek a klasszikus műszaki vagy működési kockázatoktól. Egyrészt gyakran hosszú időtávon jelentkeznek, másrészt többdimenziós hatásokkal bírnak, amelyek gazdasági, környezeti és társadalmi következményeket egyaránt magukban foglalnak. E kockázatok jelentős része nem determinisztikus jellegű, hanem bizonytalanságokkal, visszacsatolásokkal és nehezen kvantifikálható hatásokkal terhelt. Mindez korlátozza a kizárólag pénzügyi vagy statisztikai alapú kockázatelemzési módszerek alkalmazhatóságát, és előtérbe helyezi a kvalitatív, illetve részben kvantitatív döntéstámogató megközelítéseket.

A minőségmenedzsment és kockázatkezelés területén széles körben alkalmazott Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) módszer eredetileg műszaki rendszerek és folyamatok hibáinak megelőzésére szolgált, azonban alkalmazási köre napjainkra jelentősen kibővült. Az FMEA strukturált logikája – amely a lehetséges hibamódok azonosítására, azok okainak és következményeinek feltárására, valamint a kockázatok prioritizálására épül – elvileg alkalmassá teheti a módszert komplex, nem kizárólag műszaki jellegű problémák vizsgálatára is. Ennek ellenére a fenntarthatósági átmenetek kontextusában az FMEA alkalmazhatósága, valamint döntéstámogató értéke továbbra is vitatott.

A módszer egyik leggyakrabban kritizált eleme a hagyományos Risk Priority Number (RPN) mutató, amely a súlyosság (severity – S), az előfordulás (occurrence – O) és az észlelhetőség (detection – D) szorzataként határozza meg a kockázati prioritásokat. Számos tanulmány rámutatott arra, hogy az RPN matematikai tulajdonságai és gyakorlati értelmezhetősége korlátozott, különösen olyan esetekben, ahol a kockázatok heterogén jellegűek, illetve eltérő dimenziók mentén értelmezhetők. E problémákra válaszul jelent meg az Action Priority (AP) koncepció, amely a kockázatok kezelését nem egyetlen aggregált mutatóra, hanem döntési mátrixokra és szabályalapú prioritizálásra építi.

A fenntarthatósági átmenetek esetében különösen releváns kérdés, hogy az FMEA különböző változatai milyen mértékben képesek kezelni az összetett, gyakran nehezen

számszerűsíthető kockázatokat, és mennyiben járulnak hozzá a döntéshozatal átláthatóságához és megalapozottságához. Míg a klasszikus FMEA elsősorban műszaki-logikai keretet kínál, addig a kiterjesztett módszertani megoldások potenciálisan alkalmasak lehetnek a fenntarthatósági szempontok integrálására is. Ugyanakkor a módszertani kompromisszumok, a szubjektivitás szerepe és a szervezeti alkalmazhatóság kérdései továbbra is nyitottak.

Jelen tanulmány célja, hogy elméleti–módszertani megközelítésben vizsgálja az FMEA-alapú döntéstámogató keretrendszerek alkalmazhatóságát a fenntarthatósági átmenetek kockázatkezelésében. Nem empirikus esettanulmányra épül, hanem a releváns szakirodalom és módszertani irányzatok szisztematikus elemzésére. Ennek keretében bemutatja az FMEA alaplogikáját, áttekinti a klasszikus RPN-megközelítéssel szemben megfogalmazott kritikákat, valamint összehasonlítja az Action Priority és egyéb továbbfejlesztett prioritizálási megoldások döntéstámogató jellemzőit.

A tanulmány egyrészt strukturált módon értékeli, hogy az egyes FMEA-alapú megközelítések milyen erősségekkel és korlátokkal rendelkeznek a fenntarthatósági átmenetek sajátos kockázati környezetében. Másrészt rámutat azokra a módszertani szempontokra – így az átláthatóságra, a döntési támogatás minőségére és a szervezeti beágyazhatóságra –, amelyek meghatározóak lehetnek az FMEA jövőbeli alkalmazása során ezen a területen. A tanulmány felépítése ennek megfelelően a módszertani háttér bemutatását követően összehasonlító elemzést nyújt, majd a megvitatás és következtetések fejezeteiben foglalja össze a legfontosabb tanulságokat és további kutatási irányokat.

2. Az FMEA elméleti háttere

2.1. Az FMEA módszer alaplogikája és fejlődése

A Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) a kockázatok megelőzését szolgáló strukturált elemzési módszer, amelynek elsődleges célja a potenciális hibamódok azonosítása, valamint azok okainak és következményeinek feltárása még a tényleges meghibásodások bekövetkezése előtt. A módszer preventív szemlélete megkülönbözteti számos reaktív kockázatkezelési megközelítéstől, és különösen alkalmassá teszi komplex rendszerek, folyamatok és projektek vizsgálatára, ahol a hibák késői felismerése jelentős gazdasági, biztonsági vagy társadalmi károkat okozhat (Stamatis, 2003).

Az FMEA történeti gyökerei a múlt század közepéig nyúlnak vissza, a módszert először katonai és repülőipari alkalmazásokban használták a rendszer megbízhatóság növelése érdekében. Később az űripari programok, majd az autóipar játszott meghatározó szerepet az FMEA széles körű elterjedésében és módszertani formalizálásában (Kmenta & Ishii, 2004). Az

ipari szabványosítás eredményeként az FMEA fokozatosan a minőségmenedzsment egyik alapvető eszközévé vált, különösen olyan környezetekben, ahol a hibák következményei nem elfogadhatók.

A módszer fejlődésével párhuzamosan kialakultak az FMEA különböző típusai, amelyek eltérő elemzési fókuszokat képviselnek. A Design FMEA (DFMEA) elsősorban termékek és rendszerek tervezési hibáira koncentrál, míg a Process FMEA (PFMEA) a gyártási és működési folyamatok kockázatait vizsgálja. Az elmúlt évtizedekben megjelentek továbbá a szolgáltatási, szervezeti és projektalapú FMEA-alkalmazások is, amelyek a módszer logikáját nem műszaki kontextusokra terjesztették ki (Liu et al., 2013). Ez a kiterjesztés különösen releváns a fenntarthatósági átmenetek vizsgálata szempontjából, ahol a kockázatok gyakran szervezeti és rendszerszintű jellegűek.

Az FMEA alaplogikája három kulcselem köré szerveződik: a potenciális hibamódok meghatározása, a hibák hatásainak értékelése, valamint a kiváltó okok azonosítása. E lépések célja nem pusztán a kockázatok listázása, hanem azok összefüggéseinek feltárása, megértése és a beavatkozási lehetőségek meghatározása. A módszer egyik jelentős előnye, hogy elősegíti a multidiszciplináris szakértői tudás strukturált összegyűjtését, valamint támogatja a szervezetben belüli kommunikációt és tanulást (Carlson, 2012).

A kockázatok értékelése az FMEA-ban hagyományosan három dimenzió mentén történik: a hatás súlyossága, a bekövetkezési valószínűség (előfordulás), és az észlelhetőség. Ezek az értékelések jellemzően kvalitatív skálákra épülnek, amelyeket a gyakorlatban numerikus értékekkel közelítenek. Ez a részben kvantitatív megközelítés lehetővé teszi az FMEA alkalmazását olyan területeken is, ahol megbízható statisztikai adatok nem állnak rendelkezésre, ugyanakkor magában hordozza az értékelések szubjektivitásának kockázatát is (Ben-Daya & Raouf, 1996).

A módszer elméleti és gyakorlati fejlődése során egyre hangsúlyosabbá váltak azok a kritikák, amelyek az értékelési skálák konzisztenciáját, az aggregálás logikáját és a döntéstámogató eredmények értelmezhetőségét érintik. Ezek a kérdések különösen élesen jelennek meg olyan komplex kockázati környezetekben, ahol a hatások többdimenziósak és hosszú távon jelentkezők, mint például a fenntarthatósági átmenetek esetében. Ennek következtében az FMEA alkalmazhatósága egyre inkább nemcsak a módszer formális lépésein, hanem a prioritizálási és döntéstámogató eszközök minőségén is múlik (Zammori & Gabrielli, 2012).

Összességében az FMEA olyan rugalmas módszertani keretet kínál, amely alkalmas a komplex kockázatok strukturált feltárására, ugyanakkor döntéstámogató értéke jelentős

mértékben függ az alkalmazott értékelési és priorizálási megoldásoktól. E felismerés vezetett ahhoz, hogy a szakirodalom és a gyakorlat egyaránt fokozott figyelmet fordítson a klasszikus Risk Priority Number megközelítés korlátaira, amelyeket a következő alfejezet részletesen tárgyal.

2.2.A Risk Priority Number (RPN) alkalmazása és kritikái

A klasszikus FMEA-módszertan központi eleme a kockázatok priorizálására szolgáló Risk Priority Number (RPN), amely a hiba hatásának súlyosságának, bekövetkezési valószínűségének (előfordulásának) és az észlelhetőségnek a szorzataként kerül meghatározásra (Stamatis, 2003). Az RPN célja, hogy numerikus formában támogassa a kockázatok rangsorolását, és ezáltal iránymutatást adjon az intézkedések kijelöléséhez. A módszer egyszerűsége és könnyű kommunikálhatósága jelentős szerepet játszott abban, hogy az FMEA az ipari gyakorlat egyik legelterjedtebb kockázatelemzési eszközévé vált.

A szakirodalom ugyanakkor már korán rámutatott arra, hogy az RPN matematikai felépítése és döntéstámogató értéke korlátozott. Az egyik leggyakrabban hivatkozott probléma, hogy a szorzatalapú aggregálás különböző kockázati profilokat azonos RPN-értékre képez le, ami a kockázatok tényleges súlyosságának elfedéséhez vezethet (Bowles & Peláez, 1995). Ennek következtében előfordulhat, hogy egy alacsony súlyosságú, de gyakran előforduló hiba ugyanakkora prioritást kap, mint egy ritkán előforduló, ám potenciálisan súlyos következményekkel járó esemény.

További kritikai pontként jelenik meg az RPN diszkrét skálákra épülő jellege. A súlyosság, a bekövetkezési valószínűség és az észlelhetőség értékelése jellemzően kvalitatív megítélésen alapul, amelyet numerikus értékekkel közelítenek. Ez a gyakorlat növeli az értékelések szubjektivitását, és korlátozza az eredmények összehasonlíthatóságát különböző FMEA-csapatok vagy szervezetek között (Ben-Daya & Raouf, 1996). A probléma különösen hangsúlyos olyan kockázati környezetekben, ahol empirikus adatok nem, vagy csak korlátozott mértékben állnak rendelkezésre.

Az RPN alkalmazásával szemben további módszertani kifogás, hogy a három dimenzió implicit módon azonos súlyt kap a szorzás során. Ez a feltételezés ritkán tükrözi a valós döntési preferenciákat, különösen olyan helyzetekben, ahol a súlyosság elsődleges szerepet játszik a döntéshozatalban, például biztonsági, környezeti vagy társadalmi kockázatok esetében (Zammori & Gabbrielli, 2012). A fenntarthatósági átmenetek kontextusában ez a probléma tovább erősödik, mivel a hatások gyakran többdimenziósak és hosszú távon jelentkeznek.

A kritikai irodalom azt is hangsúlyozza, hogy az RPN nem biztosít egyértelmű döntési szabályokat az intézkedések kiválasztására. Az, hogy egy adott RPN-érték milyen beavatkozást indokol, gyakran szervezeti tapasztalaton vagy informális küszöbértékeken alapul, ami csökkenti a módszer transzparenciáját és reprodukálhatóságát (Liu et al., 2013). Ez különösen problematikus lehet olyan komplex átmeneti folyamatok esetében, ahol a döntések széles körű érintetti hatásokkal járnak.

E kritikák hatására az FMEA módszertan fejlesztése során számos alternatív prioritizálási megközelítés jelent meg, amelyek célja az RPN korlátainak kezelése. Ezek közé tartoznak a súlyozott RPN-modellek, a fuzzy logikán alapuló FMEA-variánsok, valamint a döntési mátrixokra épülő megoldások. Az ipari gyakorlatban azonban a legnagyobb hatású elmozdulást az Action Priority koncepció bevezetése jelentette, amely az RPN numerikus rangsorolását szabályalapú döntéstámogatással váltja fel (AIAG & VDA, 2019).

2.3.Action Priority és továbbfejlesztett FMEA-prioritizálási megközelítések

A Risk Priority Number módszertani korlátainak felismerése nyomán az FMEA alkalmazók körében fokozott figyelem irányult a kockázatok prioritizálásának alternatív megoldásaira. Ezek a megközelítések közös célként fogalmazzák meg a döntéstámogató érték növelését, az értékelési bizonytalanságok kezelését, valamint a komplex, többdimenziós kockázatok differenciáltabb megjelenítését (Braglia et al., 2021). A fejlesztések jelentős része a többkritériumos döntéstámogatás (MCDM) eszköztárára, illetve a kvalitatív és kvantitatív elemek integrálására épül.

Az ipari gyakorlatban e módszertani törekvések közül kiemelkedő jelentőséggel bír az Action Priority (AP) koncepció, amelyet az AIAG & VDA által közösen kiadott FMEA Handbook formalizált (AIAG & VDA, 2019). Az Action Priority szakít az RPN egyetlen aggregált mutatóra épülő logikájával, és ehelyett szabályalapú döntési mátrixok segítségével rendeli hozzá az értékelt kockázatokat cselekvési prioritásokhoz. A módszer célja nem a numerikus rangsorolás finomítása, hanem annak egyértelmű meghatározása, hogy mely kockázatok esetében szükséges azonnali beavatkozás, további elemzés vagy dokumentált elfogadás.

Az Action Priority egyik legfontosabb módszertani újítása, hogy explicit módon kiemeli a hatás súlyosságának döntési szerepét. Bizonyos súlyossági szintek esetében a módszer automatikusan magas prioritást rendel a kockázathoz, függetlenül a bekövetkezési valószínűségtől vagy az észlelhetőségtől. Ez a megközelítés összhangban áll azokkal az akadémiai kritikákkal, amelyek szerint az RPN implicit súlyozása nem tükrözi a valós döntési

preferenciákat, különösen biztonsági, környezeti vagy társadalmi hatásokkal járó kockázatok esetében (Braglia et al., 2021).

A szakirodalom ugyanakkor rámutat arra, hogy az Action Priority elsősorban iparági szabványként értelmezhető, és módszertani értelemben nem tekinthető teljes körű megoldásnak az FMEA-priorizálás problémáira. Számos tanulmány ezért a többkritériumos döntéstámogatás irányába mozdult el, ahol az FMEA-értékelési dimenziók eltérő súlyokkal, illetve kiegészítő kritériumokkal kerülnek figyelembevételre. Lo et al. (2019) például olyan FMEA-modellt javasolnak, amely MCDM-technikák alkalmazásával képes kezelni az értékelések közötti inkonzisztenciákat és a döntési preferenciák explicit megjelenítését.

A fenntarthatósági átmenetek vizsgálata során különösen relevánsak azok a továbbfejlesztett FMEA-megközelítések, amelyek a hagyományos műszaki kockázatokon túl gazdasági, környezeti és társadalmi dimenziókat is integrálnak. A klasszikus prioritizálási logika önmagában nem képes kezelni a hosszú távú és rendszerszintű hatásokat. Hasonló következtetésre jut Pereira et al. (2022), akik a fenntarthatóság-orientált döntéshozatal támogatására fejlesztették tovább az FMEA módszertanát, hangsúlyozva a kvalitatív értékelések strukturált kezelésének szükségességét.

E megközelítések közös tanulsága, hogy az FMEA döntéstámogató értéke nem egyetlen „optimális” prioritizálási módszer alkalmazásából fakad, hanem a kontextushoz illeszkedő módszertani választásból. Az Action Priority ebben az értelemben stabil iparági referenciapontként szolgál, amely világos döntési szabályokat kínál, ugyanakkor kiegészítésre szorul olyan komplex környezetekben, mint a fenntarthatósági átmenetek. Ilyen esetekben a többkritériumos és fenntarthatóság-orientált FMEA-variánsok képesek tovább erősíteni a módszer döntéstámogató szerepét.

3. Módszertani összehasonlítási keret az FMEA-alapú döntéstámogatásban

3.1. Fenntarthatósági átmenetekhez kötődő tipikus kockázatok

A fenntarthatósági átmenetekkel kapcsolatos döntéshozatal középpontjában egyre inkább a kockázatok szisztematikus azonosítása és kezelése áll. A nemzetközi szakirodalom és szakpolitikai jelentések egyetértenek abban, hogy a klíma- és fenntarthatósági átmenetek során jelentkező kockázatok nem kizárólag technikai jellegűek, hanem fizikai, átmeneti (transition), intézményi és társadalmi kockázatok összefonódó rendszerét alkotják (IPCC, 2022; OECD, 2023).

Az egyik leggyakrabban tárgyalt kockázati kategóriát a fizikai és rendszerszintű kockázatok jelentik. Ezek közé tartoznak az éghajlatváltozás közvetlen hatásai (például extrém időjárási

események, hőhullámok, vízhiány), valamint az ezekhez kapcsolódó infrastruktúra- és ellátásbiztonsági kockázatok. Az IPCC kockázati keretrendszere szerint ezek a kockázatok a veszélyeztetettség, az expozíció és a sérülékenység együtteséből adódnak, és gyakran láncreakciós hatásokat indítanak el az energetikai, közlekedési és ipari rendszerekben (IPCC, 2022). Ezek a kockázatok ugyan fenntarthatósági eredetűek, de gyakran konkrét funkcionális meghibásodásokban öltenek testet.

A fenntarthatósági átmenetek második meghatározó kockázati csoportját az ún. átmeneti (transition) kockázatok alkotják. Ezek a kockázatok a dekarbonizációhoz és fenntarthatóbb működéshez kapcsolódó szabályozási, technológiai, piaci és preferenciaváltozásokból erednek. A szakirodalom hangsúlyozza, hogy a szigorodó környezetvédelmi szabályozás, a karbonárzás, valamint az új technológiák gyors térnyerése jelentős kockázatot hordozhat a meglévő üzleti modellek és folyamatok számára (NGFS, 2023; OECD, 2023). Ezek a kockázatok tipikusan nem hirtelen események, hanem fokozatosan kibontakozó, de kumulatív hatású folyamatok.

A gazdasági és pénzügyi kockázatok a fenntarthatósági átmenetekben szorosan összefonódnak az átmeneti kockázatokkal. A beruházási döntések, a finanszírozási költségek és a megtérülési pályák erősen függenek attól, hogy az átmenet üteme és iránya mennyire kiszámítható. Több elemzés rámutat arra, hogy a fenntarthatósági célokkal kapcsolatos bizonytalanság növeli a beruházási kockázatot, különösen a nagy tőkeigényű, hosszú élettartamú infrastruktúrák esetében (IEA, 2021; OECD, 2023).

A fenntarthatósági átmenetekhez kötődő kockázatok további fontos dimenzióját képezik az intézményi és végrehajtási kockázatok. Ezek a kockázatok abból fakadnak, hogy az átmeneti célok megvalósítása gyakran több szintű kormányzást, eltérő érdekeket és komplex végrehajtási mechanizmusokat igényel. A nem megfelelő intézményi koordináció, a szakpolitikai inkonzisztencia vagy a végrehajtási kapacitások hiánya önálló kockázati tényezőként jelenik meg a fenntarthatósági átmenetekben (UNEP, 2021).

Végül a szakirodalom egyre nagyobb hangsúlyt helyez a társadalmi és elfogadottsági kockázatokra, amelyek a fenntarthatósági átmenetek legitimitását és politikai fenntarthatóságát érintik. Az érintettek ellenállása, az igazságossági szempontok figyelmen kívül hagyása vagy a költségek és hasznok egyenlőtlen eloszlása olyan kockázatokot hordoz, amelyek késleltethetik vagy akár meg is hiúsíthatják az átmeneti folyamatokat (IPCC, 2022; OECD, 2023).

3.2. Az FMEA alkalmazhatósága különböző fenntarthatósági kockázatok esetében

A fenntarthatósági átmenetekhez kapcsolódó kockázatok eltérő természete alapvetően meghatározza, hogy az FMEA-alapú döntéstámogatás milyen mértékben és milyen céllal alkalmazható. A szakirodalom egybehangzóan rámutat arra, hogy a klíma- és fenntarthatósági kockázatok nem egységes kockázati kategóriát alkotnak, hanem különböző strukturálhatóságú és időtávú kockázattípusok együttese, ami szükségessé teszi a módszertani eszközök szelektív alkalmazását (IPCC, 2022; OECD, 2023).

A fizikai klímakockázatok esetében az FMEA elsősorban akkor alkalmazható hatékonyan, amikor a kockázatok konkrét technikai vagy működési meghibásodásokhoz kapcsolódnak. Az extrém időjárási események által kiváltott infrastruktúra-kiesések, berendezéshibák vagy ellátásbiztonsági zavarok jól leírhatók funkció–hiba–hatás logika mentén, ami lehetővé teszi az FMEA strukturált alkalmazását az érintett folyamatlépések azonosítására és a megelőző intézkedések prioritizálására (IPCC, 2022). Ugyanakkor a fizikai klímakockázatok lánreakciós és rendszerszintű jellege korlátozza az FMEA önálló alkalmazhatóságát, ezért a módszer ezekben az esetekben elsősorban operatív, kiegészítő döntéstámogató eszközként értelmezhető.

Az átmeneti (transition) kockázatok – ideértve a szabályozási szigorodást, a technológiai váltásokat és a piaci preferenciák átalakulását – esetében az FMEA alkalmazhatósága már jelentősen korlátozottabb. Ezek a kockázatok jellemzően nem diszkrét események, hanem fokozatosan kibontakozó folyamatok, amelyek észlelhetősége alacsony, hatásuk viszont kumulatív és hosszú távú. A szakirodalom szerint az ilyen kockázatok kezelése során a döntéstámogatás célja nem a pontos rangsorolás, hanem a sérülékeny üzleti és működési funkciók azonosítása és a kockázati kitettség tudatosítása (NGFS, 2023; OECD, 2023). Ebben az értelemben az FMEA az átmeneti kockázatoknál inkább feltáró és strukturáló, semmint prioritizáló eszközként értelmezhető.

A gazdasági és pénzügyi kockázatok esetében az FMEA alkalmazása szintén csak részleges döntéstámogatást nyújt. A beruházási megtérülés bizonytalansága, a finanszírozási költségek változása vagy a fenntarthatósági szabályozásokhoz kapcsolódó költségkockázatok jellemzően nem fordíthatók le egyértelmű hibamódokra. A fenntarthatósági finanszírozással foglalkozó nemzetközi irodalom hangsúlyozza, hogy ezek a kockázatok kockázati pályákhoz kapcsolódnak, és kezelésük csak több elemzési eszköz együttes alkalmazásával lehetséges (IEA, 2021; OECD, 2023). Az FMEA ebben a kontextusban elsősorban a költségérzékeny folyamatlépések és kritikus döntési pontok azonosítását támogatja.

Az intézményi és végrehajtási kockázatok esetében az FMEA adaptált alkalmazása bizonyos feltételek mellett indokolt. Az ilyen kockázatok – például a megfelelési követelmények változása, a végrehajtási kapacitások hiánya vagy a szervezeti koordinációs problémák – gyakran konkrét működési zavarokban öltenek testet. Egy fenntarthatósági compliance-környezetben végzett empirikus vizsgálat kimutatta, hogy az FMEA képes strukturált módon feltárni a megfelelési folyamatok kockázati pontjait, ugyanakkor a különböző kockázátértékelési módszerek eltérő rangsorolási eredményeket produkálnak, ami a módszerválasztás döntéstámogatási jelentőségére hívja fel a figyelmet (Bognár & Benedek, 2023; UNEP, 2021).

A társadalmi és elfogadottsági kockázatok esetében a klasszikus FMEA alkalmazhatósága a legkorlátozottabb. Az érintetti ellenállás, az igazságossági kérdések vagy a legitimitáció hiánya nehezen írhatók le hibamód-hatás párok formájában. A klíma- és fenntarthatósági kockázatokkal foglalkozó szakirodalom hangsúlyozza, hogy az ilyen kockázatok kezelése elsősorban deliberatív és részvételi döntéstámogatási eszközöket igényel, amelyekhez az FMEA legfeljebb kiegészítő, tudatosító funkcióval járulhat hozzá (IPCC, 2022; OECD, 2023).

3.3. Prioritáslogikák illeszkedése a fenntarthatósági kockázatokhoz

A fenntarthatósági átmenetekhez kapcsolódó kockázatok kezelése során a prioritizálás nem pusztán technikai rangsorolási feladat, hanem döntéstámogatási kérdés, amely magában foglalja a bizonytalanság, a normatív megfontolások és az erőforrás-korlátok együttes kezelését. A szakirodalom hangsúlyozza, hogy a klíma- és fenntarthatósági kockázatok esetében a „mely kockázatokkal foglalkozunk először” kérdése gyakran legalább olyan fontos, mint az egyes kockázatok becsült nagysága (IPCC, 2022; OECD, 2023). Ennek megfelelően az FMEA-alapú prioritizálási logikák értékelése csak a vizsgált kockázattípusok kontextusában értelmezhető.

A klasszikus Risk Priority Number (RPN) megközelítés elsősorban azoknál a fenntarthatósági kockázatoknál alkalmazható hatékonyan, amelyek jól strukturálható, ismétlődő és operatív jellegű hibamódokként jelennek meg. Ilyenek lehetnek például az extrém időjárási események által kiváltott konkrét infrastruktúra-meghibásodások vagy az új technológiák üzemeltetéséhez kapcsolódó működési zavarok. Ezekben az esetekben az RPN egyszerűsége előnyt jelenthet, mivel gyors rangsorolást tesz lehetővé, és támogatja a rövid távú erőforrás-allokációt. Ugyanakkor a fenntarthatósági szakirodalom rámutat arra, hogy az aggregált mutatók alkalmazása elfedheti azokat a kockázatokot, amelyek alacsony

bekövetkezési valószínűségük ellenére súlyos vagy visszafordíthatatlan következményekkel járhatnak, ami különösen problémás a klíma- és környezeti kockázatok esetében (IPCC, 2022).

Az Action Priority (AP) koncepció e korlátok egy részére reagál azáltal, hogy a prioritizálást explicit cselekvési elvárásokhoz köti. A szabályalapú logika különösen releváns azoknál a fenntarthatósági kockázatoknál, ahol a magas hatás súlyossága önmagában indokolja a beavatkozást, függetlenül a pontos bekövetkezési valószínűségtől. Ilyen kockázatok lehetnek például az ellátásbiztonságot veszélyeztető átmeneti zavarok vagy a kritikus infrastruktúrákat érintő klímakockázatok. A nemzetközi kockázatkezelési irodalom hangsúlyozza, hogy az ilyen esetekben a döntéstámogatás célja nem az „optimális” rangsor kialakítása, hanem a késlekedés elkerülése és a minimálisan szükséges intézkedések azonosítása (OECD, 2023). Az AP logika ebből a szempontból jól illeszkedik a fenntarthatósági átmenetek „no-regret” döntési helyzeteihez.

A prioritizálási logikák közötti választás döntéstámogatási jelentőségét empirikus eredmények is alátámasztják. Egy fenntarthatósági compliance-környezetben végzett többmódszeres kockázatértékelési vizsgálat kimutatta, hogy az FMEA, a kockázati mátrix és más rangsorolási megközelítések alkalmazása érdemben eltérő prioritási sorrendeket eredményez, még azonos kockázati inputok mellett is (Bognár & Benedek, 2023). A szerzők eredményei arra utalnak, hogy a módszerválasztás nem pusztán technikai kérdés, hanem befolyásolja azt, hogy a döntéshozók mely kockázatokot tekintik kritikusnak, és melyek szorulnak háttérbe. Ez különösen releváns a fenntarthatósági átmenetekben, ahol a prioritizálás normatív elemeket is hordoz, és a rangsorolási eredmények közvetlen hatással lehetnek a beavatkozások irányára és időzítésére.

A kiterjesztett, többkritériumos FMEA-megközelítések elsősorban azoknál a fenntarthatósági kockázatoknál indokoltak, amelyek többdimenziósak, normatív elemeket tartalmaznak és érintetti konfliktusokkal terheltek. A társadalmi elfogadottsághoz, igazságossághoz vagy gazdasági átalakuláshoz kapcsolódó kockázatok esetében a prioritizálás nem választható el az értékválasztásoktól. A fenntarthatósági döntéstámogatással foglalkozó szakirodalom szerint az ilyen helyzetekben a többkritériumos megközelítések előnye nem a precíz rangsor, hanem az, hogy láthatóvá teszik a döntési kompromisszumokat, és támogatják az érintettek közötti párbeszédet (UNEP, 2021; IPCC, 2022).

A fenntarthatósági átmenetek kockázati környezetében ezért a prioritizálási logika megválasztása maga is stratégiai döntésnek tekinthető. A szakirodalom egybehangzóan hangsúlyozza, hogy a klíma- és fenntarthatósági kockázatok kezelésében nem létezik univerzálisan alkalmazható rangsorolási módszer; ehelyett a döntéshozóknak a kockázatok

természetéhez, időtávjához és következményeihez illeszkedő prioritizálási elveket kell alkalmazniuk (NGFS, 2023). Ebben a keretben az RPN, az Action Priority és a kiterjesztett FMEA nem egymást kizáró alternatívák, hanem különböző döntési helyzetekhez illeszkedő eszközök.

4. Döntéstámogatási kompromisszumok a fenntarthatósági átmenetekenél

A fenntarthatósági átmenetek kockázatkezelése során a döntéshozók olyan problématerben mozognak, ahol a kockázatok természete, időtávja és következményei jelentősen eltérnek a klasszikus műszaki vagy működési rendszerekben megszokottól. A 3. fejezet bemutatta, hogy az átmenetekhez kapcsolódó kockázatok – ideértve a fizikai klímakockázatokat, az átmeneti (transition) kockázatokat, valamint az intézményi és társadalmi kockázatokat – eltérő mértékben strukturálhatók, és ebből következően eltérő döntéstámogatási megközelítéseket igényelnek. Ennek fényében az FMEA-alapú módszerek alkalmazása nem technikai automatizmus, hanem tudatos kompromisszumok sorozata.

A döntéstámogatási kompromisszumok:

- **Egyszerűség és értelmezhetőség:** Az olyan prioritizálási logikák, mint az RPN, előnyt jelentenek azokban az esetekben, amikor a fenntarthatósági kockázatok konkrét működési vagy technikai meghibásodások formájában öltenek testet. Ugyanakkor a fenntarthatósági kockázati irodalom hangsúlyozza, hogy a klíma- és átmeneti kockázatok jelentős része nem redukálható diszkrét eseményekre, hanem hosszú távú kockázati pályák mentén bontakozik ki (IPCC, 2022). Ilyen környezetben az egyszerű rangsorolás könnyen félrevezető lehet, mivel elfedi a döntések mögött húzódó normatív feltételezéseket.
- **Priorizálás és cselekvési orientáció:** Az Action Priority megközelítés alkalmazása jól illeszkedik azokhoz a fenntarthatósági kockázatokhoz, ahol a súlyos következmények elkerülése önmagában indokolja a beavatkozást, függetlenül a pontos bekövetkezési valószínűségtől. A klímakockázatokkal és ellátásbiztonsággal foglalkozó szakirodalom szerint az ilyen „no-regret” vagy elővigyázatossági döntési helyzetekben a döntéstámogatás célja nem az optimális rangsor, hanem a késlekedés elkerülése és a minimálisan szükséges intézkedések meghatározása (OECD, 2023). Ugyanakkor az AP szabályalapú jellege kompromisszumot jelent a részletezettség rovására, ami a komplex, egymással összefüggő kockázatok kezelését korlátozza.
- **Strukturálhatóság és a komplexitás:** A társadalmi elfogadottsághoz, igazságossághoz vagy intézményi megvalósításhoz kapcsolódó fenntarthatósági kockázatok csak

korlátozottan írhatók le FMEA-logikával. Ezekben az esetekben a kiterjesztett, többkritériumos FMEA-megközelítések előnye nem a „pontos” prioritizálás, hanem az, hogy láthatóvá teszik a döntési kompromisszumokat, és támogatják az érintetti szempontok explicitté tételét. A fenntarthatósági döntéshozatallal foglalkozó nemzetközi irodalom hangsúlyozza, hogy az ilyen kockázatok kezelése csak több módszer kombinációjával lehetséges, ahol az elemző eszközök a tanulást és a párbeszédet is szolgálják (UNEP, 2021).

A döntéstámogatási kompromisszumok gyakorlati jelentőségét empirikus eredmények is alátámasztják. Egy fenntarthatósági compliance-környezetben végzett többmódszeres kockázatértékelési vizsgálat rámutatott arra, hogy az FMEA és más prioritizálási megközelítések alkalmazása eltérő kockázati rangsorokat eredményez, még azonos bemeneti információk mellett is (Bognár & Benedek, 2023). Ez az eredmény megerősíti, hogy a prioritizálási logika megválasztása nem pusztán technikai döntés, hanem közvetlen hatással van arra, hogy a döntéshozók mely kockázatokot kezelnek sürgősnek, és melyek maradnak háttérben. A fenntarthatósági átmenetek kontextusában ez különösen jelentős, mivel a rangsorolási eredmények hosszú távú és nehezen visszafordítható döntéseket alapozhatnak meg.

A fenti kompromisszumok alapján megállapítható, hogy az FMEA-alapú döntéstámogatás fenntarthatósági átmenetekben nem univerzális megoldás, hanem kontextusfüggő eszközrendszer. A módszer akkor járul hozzá érdemben a döntések minőségéhez, ha alkalmazása illeszkedik a vizsgált kockázatok jellegéhez, időtávjához és következményeihez. A nemzetközi klíma- és fenntarthatósági kockázati keretrendszerek is egybehangzóan hangsúlyozzák, hogy a döntéshozatal sikeressége nem az egyes módszerek „helyességén”, hanem a módszerválasztás tudatosságán és átláthatóságán múlik (NGFS, 2023).

Felhasznált irodalom

1. AIAG & VDA. (2019). *FMEA handbook* (1st ed.).
2. Aven, T. (2016). *Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation*. European Journal of Operational Research, 253(1).
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023>
3. Aven, T., & Renn, O. (2010). *Risk management and governance: Concepts, guidelines and applications*. Springer.
<https://doi.org/10.4000/rccs.1395>

4. Barsalou, M. (2022). *Investigation into a potential reduction of FMEA efforts using action priority*. *Management and Production Engineering Review*, 13(4).
<https://doi.org/10.24425/mper.2022.142395>
5. Ben-Daya, M., & Raouf, A. (1996). *A revised failure mode and effects analysis model*. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 13(1).
<https://www.emerald.com/ijqrm/article-pdf/13/1/43/941416/02656719610108297.pdf>
6. Bognár, F., & Benedek, P. (2023). *Multi-method risk assessment process for sustainable business – A compliance research follow-up case study*. *Acta Polytechnica Hungarica*, 20(4).
<https://doi.org/10.12700/APH.20.4.2023.4.3>
7. Bonjean Stanton, M. C., & Roelich, K. (2021). Decision making under deep uncertainties: A review of the applicability of methods in practice. *Technological Forecasting and Social Change*, 171.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120939>
8. Bowles, J. B., & Peláez, C. E. (1995). Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 50(2).
[https://doi.org/10.1016/0951-8320\(95\)00068-D](https://doi.org/10.1016/0951-8320(95)00068-D)
9. Braglia, M., Frosolini, M., & Montanari, R. (2021). FMEA-based risk assessment: Advances and open issues. *Quality and Reliability Engineering International*, 37(1).
<https://doi.org/10.1002/qre.2679>
10. Carlson, C. S. (2012). *Effective FMEAs: Achieving safe, reliable, and economical products and processes using failure mode and effects analysis*. Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9781118312575>
11. Geels, F. W., Sovacool, B. K., Schwanen, T., & Sorrell, S. (2017). Sociotechnical transitions for deep decarbonization. *Science*, 357(6357).
<https://doi.org/10.1126/science.aao3760>
12. IEA. (2021). *Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector*. International Energy Agency.
13. IPCC. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781009325844>

14. Kmenta, S., & Ishii, K. (2004). Scenario-based failure modes and effects analysis using expected cost. *Journal of Mechanical Design*, 126(6).
<https://doi.org/10.1115/1.1799614>
15. Lempert, R. J., Lawrence, J., Kopp, R. E., Haasnoot, M., Reisinger, A., Grubb, M., & Pasqualino, R. (2024). The use of decision making under deep uncertainty in the IPCC. *Frontiers in Climate*, 6.
<https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1380054>
16. Liu, H. C., Liu, L., & Liu, N. (2013). Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert Systems with Applications*, 40(2).
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.010>
17. Lo, H. W., Liou, J. J. H., Huang, C. N., & Chuang, Y. C. (2019). *A novel failure mode and effects analysis model based on multiple criteria decision making*. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(4).
<https://doi.org/10.1016/j.jress.2018.11.018>
18. Mangla, S. K., Kumar, P., & Barua, M. K. (2015). *Risk analysis in green supply chain using fuzzy AHP approach: A case study*. *Resources, Conservation and Recycling*, 104.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.01.001>
19. Marchau, V. A. W. J., Walker, W. E., Bloemen, P. J. T. M., & Popper, S. W. (Eds.). (2019). *Decision making under deep uncertainty: From theory to practice*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-05252-2>
20. Markard, J., Raven, R., & Truffer, B. (2012). Sustainability transitions: An emerging field of research. *Research Policy*, 41(6).
<https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.02.013>
21. Mecca, B. (2023). Assessing the sustainable development: A review of multi-criteria decision analysis for urban and architectural sustainability. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*.
<https://doi.org/10.1002/mcda.1818>
22. NGFS. (2023). *Climate-related risks and financial stability*. Network for Greening the Financial System.
23. OECD. (2023). *Managing climate risks, facing up to loss and damage*. OECD Publishing.
[Full Report: Managing Climate Risks, Facing up to Losses and Damages | OECD](#)
24. Pereira, P., Santos, J., & Ferreira, L. P. (2022). Failure mode and effects analysis for sustainability-oriented decision-making. *Sustainability*, 14(3).
<https://doi.org/10.3390/su14031524>

25. Renn, O. (2008). *Risk governance: Coping with uncertainty in a complex world*. Earthscan.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6799-0>
26. Stamatis, D. H. (2003). *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution* (2nd ed.). ASQ Quality Press.
[Stamatis, D. H.-failure Mode and Effect Analysis - FMEA From Theory to Execution- American Society for Quality \(ASQ\) \(2003\)](#)
27. UNEP. (2021). *The production gap report 2021*. United Nations Environment Programme.
[PGR2021_web_rev.pdf](#)
28. Więckowski, J. (2023). Recent advances in multi-criteria decision analysis. *Knowledge-Based Systems*.
<https://doi.org/10.3233/KES-230487>
29. Zammori, F., & Gabrielli, R. (2012). ANP/RPN: A multi-criteria evaluation of the risk priority number. *Quality and Reliability Engineering International*, 28(1).
<https://doi.org/10.1002/qre.1217>
30. Zanazzi, J. F., Zanazzi, J. L., & Pontelli, D. (2022). Group multicriteria method to prioritize actions in failure mode and effects analysis. *Production*, 32.
<https://doi.org/10.1590/0103-6513.20210057>