



Közzététel: 2022. szeptember 21.

A tanulmány címe:

A vállalati kockázatkezelésben használt aggregálófüggvények jellemzése

Szerzők:

KOVÁCS ZOLTÁN,

a Pannon Egyetem, Gazdaságtudományi Kar, Menedzsment Intézet, Ellátási Lánc Menedzsment Intézeti Tanszék egyetemi tanára. E-mail: kovacs.zoltan@gtk.uni-pannon.hu

CSIZMADIA TIBOR,

a Pannon Egyetem, Gazdaságtudományi Kar, Menedzsment Intézet, Szervezési és Vezetési Intézeti Tanszék egyetemi docense, a Menedzsment Intézet igazgatója. E-mail: csizmadia.tibor@gtk.uni-pannon.hu

MIHÁLCZ ISTVÁN,

a SIIX Corporation Quality menedzsere, valamint a Pannon Egyetem Gazdálkodás- és Szervezéstudományok Doktori Iskola PhD-hallgatója. E-mail: istvan.mihalcz@siix.hu

KOSZTYÁN ZSOLT TIBOR,

a Pannon Egyetem, Gazdaságtudományi Kar, Menedzsment Intézet, Kvantitatív Módszerek Intézeti Tanszék intézeti tanszékvezető egyetemi tanára. E-mail: kosztyan.zsolt@gtk.uni-pannon.hu

DOI: <https://doi.org/10.20311/stat2022.9.hu0821>

Az alábbi feltételek érvényesek minden, a Központi Statisztikai Hivatal (a továbbiakban: KSH) Statisztikai Szemle c. folyóiratában (a továbbiakban: Folyóirat) megjelenő tanulmányra. Felhasználó a tanulmány vagy annak részei felhasználásával egyidejűleg tudomásul veszi a jelen dokumentumban foglalt felhasználási feltételeket, és azokat magára nézve kötelezőnek fogadja el. Tudomásul veszi, hogy a jelen feltételek megszegéséből eredő valamennyi kárért felelősséggel tartozik.

1. A jogszabályi tartalom kivételével a tanulmányok a szerzői jogról szóló 1999. évi LXXVI. törvény (Sztj.) szerint szerzői műnek minősülnek. A szerzői jog jogosultja a KSH.
2. A KSH földrajzi és időbeli korlátozás nélküli, nem kizárólagos, nem átadható, térítésmentes felhasználási jogot biztosít a Felhasználó részére a tanulmány vonatkozásában.
3. A felhasználási jog keretében a Felhasználó jogosult a tanulmány:
 - a) oktatási és kutatási célú felhasználására (nyilvánosságra hozatalára és továbbítására a 4. pontban foglalt kivétellel) a Folyóirat és a szerző(k) feltüntetésével;
 - b) tartalmáról összefoglaló készítésére az írott és az elektronikus médiában a Folyóirat és a szerző(k) feltüntetésével;
 - c) részletének idézésére – az átvevő mű jellege és célja által indokolt terjedelemben és az eredetihez híven – a forrás, valamint az ott megjelölt szerző(k) megnevezésével.
4. A Felhasználó nem jogosult a tanulmány továbbértékesítésére, haszonszerzési célú felhasználására. Ez a korlátozás nem érinti a tanulmány felhasználásával előállított, de az Sztj. szerint önálló szerzői műnek minősülő mű ilyen célú felhasználását.
5. A tanulmány átdolgozása, újra publikálása tilos.
6. A 3. a)–c) pontban foglaltak alapján a Folyóiratot és a szerző(ke)t az alábbiak szerint kell feltüntetni:
„*Forrás: Statisztikai Szemle c. folyóirat 100. évfolyam 9. számában megjelent, Kovács Zoltán – Csizmadia Tibor – Mihálcz István – Kosztyán Zsolt Tibor által írt, A vállalati kockázatkezelésben használt aggregálófüggvények jellemzése című tanulmány (link csatolása)*”
7. A Folyóiratban megjelenő tanulmányok kutatói véleményeket tükröznek, amelyek nem feltétlenül esnek egybe a KSH vagy a szerzők által képviselt intézmények hivatalos álláspontjával.

Kovács Zoltán – Csizmadia Tibor – Mihálcz István – Kosztyán Zsolt Tibor

A vállalati kockázatkezelésben használt aggregálófüggvények jellemzése*

The characterization of aggregation functions in enterprise risk management

Kovács Zoltán, a Pannon Egyetem, Gazdaságtudományi Kar, Menedzsment Intézet, Ellátási Lánc
Menedzsment Intézeti Tanszék egyetemi tanára

E-mail: kovacs.zoltan@gtk.uni-pannon.hu

Csizmadia Tibor, a Pannon Egyetem, Gazdaságtudományi Kar, Menedzsment Intézet, Szervezési és Vezetési
Intézeti Tanszék egyetemi docense, a Menedzsment Intézet igazgatója

E-mail: csizmadia.tibor@gtk.uni-pannon.hu

Mihálcz István, a SIIX Cooperation Quality menedzsere, valamint a Pannon Egyetem Gazdálkodás- és Szerve-
zéstudományok Doktori Iskola PhD-hallgatója

E-mail: istvan.mihalcz@siix.hu

Kosztyán Zsolt Tibor, a Pannon Egyetem, Gazdaságtudományi Kar, Menedzsment Intézet, Kvantitatív Módsze-
rek Intézeti Tanszék intézeti tanszékvezető egyetemi tanára

E-mail: kosztyan.zsolt@gtk.uni-pannon.hu

Az aggregálás a kockázatok értékelésének fontos lépése. Történhet eredő kockázat összetevőkből történő meghatározása során, vagy a különböző területek, szervezeti szintek átfogó kockázatának megállapításakor. A tanulmányban a szerzők meghatározzák az aggregálófüggvényekkel kapcsolatos elvárásokat. Monte-Carlo-szimulációt alkalmazva különböző aggregálófüggvényeket jellemeznek ezen szempontok szerint. Kifejtik a gyakorlatban használatos, szorzással adódó RPN kritikáját, s érvelnek a geometriai átlag alkalmazása mellett. Megvizsgálják bizonyos aggregálófüggvények viselkedését a figyelmeztetőrendszerben.

Tárgyszó: aggregálófüggvények, kockázatkezelés, Monte-Carlo-szimuláció, RPN

Aggregation is an important step in risk assessment. It can happen during the determination of resultant risk from components, domains or organizational levels. In this article authors define requirements for aggregating functions. According to these aspects they characterize different aggregation functions using Monte Carlo simulation. They give the critique of the multiplication based RPN calculation used in practice and argue for the use of geometric mean. The behavior of certain aggregate functions in the warning system is examined.

Keyword: aggregating functions, risk management, Monte Carlo simulation, RPN

* A közlemény a TKP2021-NVA-10 számú projekt keretében a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2021. évi Tématerületi Kiválóság Program pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Az egyik leggyakrabban alkalmazott statisztikai eljárás az adatok aggregálása. Ennek egy sajátos területe a kockázatkezelés. A kockázatok mérésére, értékelésére a gazdaság és a társadalom számos területén van szükség. A vállalatok különböző irányítási rendszereiben – például a minőségügy, a környezetvédelem, a munkabiztonság és az egészségvédelem, az IT-rendszerek biztonsága kapcsán, a pénzügyi kockázatok kezelése során – ez napi szinten történik. Ma már a különféle autóiipari vagy egészségügyi termékek fejlesztése sem valósulhat meg formalizált kockázatkezelési rendszer nélkül. A kockázatok csökkentésének egyik módja pedig a biztosításkötés, amelyre egy teljes pénzügyi szektor épült.

A Pannon Egyetemen több éve foglalkozunk kockázatkezelési rendszerek vizsgálatával. Azt tapasztaltuk, hogy a vállalati gyakorlatban különböző, egymástól nagyon eltérő megoldásokat használnak az eredő kockázat összetevőkből történő meghatározására. A leginkább elterjedt szorzat (RPN: *Risk Priority Number* – kockázati prioritási érték) mellett talákoztunk például az adott helyzetben indokolatlanul alkalmazott összefüggvénnyel is. A 2.1. fejezetben, a validitási elvárásról szóló részben kifejtjük, hogy mikor célszerű és mikor nem javasolt az összegzés és más aggregálási módszer használata. Úgy gondoljuk, hogy az aggregálófüggvény kiválasztása a jelenleg alkalmazott gyakorlathoz képest jóval alaposabb megfontolást igényel, amelynek során egyaránt figyelembe kell venni az aggregálandó összetevők és – az ettől nem független – skálák jellemzőit.

A szervezeteknél egyidejűleg több olyan hierarchia is létezik, amely mentén az aggregálás szükségessé válhat. Ilyenek például a következők:

- **termékek:** alkatrész – modul – késztermék,
- **folyamatok:** művelet – részfolyamat – folyamat.

A folyamatok kockázatai különböző szempontok szerint továbbaggregálhatók:

- **szervezeti hierarchia:** csoport folyamatai – csoport – osztály stb.,
- **területeken belüli és területek közötti összevonások:** a minőségügy folyamatai – a minőségügy teljes, a környezetvédelem folyamatai – a környezetvédelem teljes, az IT folyamatai – az IT teljes, a pénzügy folyamatai – a pénzügy teljes stb.,
- ezek szintén továbbaggregálhatók, például: minőségügyi kockázatok – környezetvédelmi kockázatok – ... – pénzügyi kockázatok stb.

Tanulmányunk célja, hogy segítséget nyújtson a megfelelő aggregálófüggvény kiválasztásában. Bár a leírtak konkrétan a kockázatkezelési rendszerekre vonatkoznak, az alkalmazott megoldások, például az aggregálófüggvények kiválasztá-

sával kapcsolatos megfontolások ennél szélesebb körben is alkalmazhatók, például a többtényezős döntések területén.

A vonatkozó szakirodalom áttekintése után ismertettünk egy absztrakt kockázatkezelési keretrendszert. Metahálós leképezés alkalmazásával bemutatjuk a teljes kockázatkezelési rendszer felépülését. Ennek keretében meghatározzuk az aggregálófüggvényekkel kapcsolatos követelményeket, illetve Monte-Carlo-szimuláció alkalmazásával megvizsgáljuk a gyakorlatban legelterjedtebb aggregálófüggvények tulajdonságait. Szemléltetjük az egyes függvények alakját 2, 3 és 6 figyelembe vett kockázati összetevő esetén. Elemezzük, hogy az egyes függvények – egyenletes eloszlású kockázatiösszetevő-értékek esetén – hogyan felelnek meg a korábban támasztott követelményeknek. Módszert javaslunk, amely egyedi és aggregált értékek alapján megadja a várható beavatkozások számát, továbbá példát is mutatunk a várható beavatkozások számának előrejelzésére.

1. A kockázatok aggregálása a szakirodalomban

Az általános felfogás szerint a kockázat valamely cselekvéssel járó veszély, veszteség lehetősége. Más felfogás szerint (az Európai Parlament és a Tanács 178/2002/EK rendelete alapján) a kockázat egy veszély következményeként jelentkező egészségkárosító hatás és a hatás súlyosságának valószínűsége. A minőségmenedzsmenthez kapcsolódó újabb szabványokban a kockázat a bizonytalanság hatása (a célokra). Megjegyezzük, hogy az utóbbi felfogás szerint a kockázat pozitív tartalmú is lehet, ami azonban ellentétes a közfelfogással. Mi a továbbiakban a veszélyalapú megközelítésből indulunk ki, amelynél a kockázat mértékétől függően javító, megelőző beavatkozás válhat szükségessé.

A kockázatok aggregálásának alapvető előfeltétele, hogy valamilyen módon mérni, számszerűsíteni tudjuk őket. Ehhez ismerni kell a kockázatok összetevőinek értékét. Az értékek meghatározása általában előredefiniált skálákon történik. A skálák szintje befolyásolja az értékeikkel elvégezhető műveleteket, ezért az alkalmazott skála hatással van arra, hogy milyen aggregálófüggvényt választhunk. Fontos figyelembe venni, hogy a kockázati összetevők alapjául szolgáló valós mennyiségek nem feltétlenül arányosak az észlelt vagy megítélt kockázattal. Például egy kis pénzürtéknek vagy a többszörösének az elvesztése ugyanolyan kis kockázatú lehet a konkrét összegtől függetlenül, de egy adott határon túli nagy érték többszörösének is azonos lehet a megítélése. Utóbbira példa egy gépkocsi totálkára, amely mögött nagyon eltérő műszaki tartalom, maradványérték állhat, mégis gyakorlatilag a teljes gépkocsi elvesztését jelenti. Hasonló példa

a nukleáris katasztrófa vagy a háború, amelyeknek, bár lehetnek fokozataik, mégis elkerülendők. Ezekben az esetekben a kockázat megítélésénél felértékelődik a valószínűség. Ebből a szempontból a kockázatok aggregálása hasonló a többtényezős döntések problémaköréhez, ahol – modelltől függően – szintén egyfajta aggregált utilitásérték meghatározására kerül sor. Valószínű, hogy a kockázatkezelés és a többtényezős döntések alkalmazott módszertanának további közelítése még hordoz magában kutatási potenciált, ahogyan arra *Bognár–Hegedűs (2022)* is példával szolgált. Ennek részletesebb tárgyalása azonban túlmutat jelen tanulmányunk tartalmi és terjedelmi keretein.

A közgazdasági megközelítés szerint a kockázatokat egy összetevő alapján értékelték, ez pedig a mérhető bizonytalanság, vagy másként fogalmazva a számszerűsíthető valószínűség (*Knight, 1921; Vasvári, 2015*). A minőségmenedzsment területét tekintve az ISO 9001:2015 szabvány szerint a kockázatokat két összetevő – a bizonytalanság és a hatás – alapján lehet kezelni. Ennek a két összetevőnek az aggregálásával adható meg az eredő kockázat. *Renn (1998)* megfogalmazásában a kockázat szintén két összetevővel írható le, a bekövetkezés valószínűségével és a hatással. Ez azonban felveti azt a dilemmát, hogy hogyan kezeljük a nagy bekövetkezési valószínűségű, de ritka, illetve fordítva, a ritkán bekövetkező, de nagy hatású kockázatokat. A vállalati gyakorlatban legelterjedtebb módszer, az FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis* – hibamód- és hatáselemzés) a kockázatokat három összetevő alapján vizsgálja (súlyosság, előfordulás, észlelhetőség), és ennek a három összetevőnek az aggregálásával (szorzásával) adja meg az eredő kockázatot. Ám hogyan kezeljük azokat az eseteket, ahol nem lehet, vagy nem érdemes mindhárom összetevő szerint értékelni, illetve további összetevőket kellene bevonni, de a módszer ezt nem teszi lehetővé? Általánosítva, a következő problémával szembesültünk: hogyan lehet a kockázatkezelés során érintett összetevők aggregálását a tényleges vállalati igényekre szabni? Számos módszert (*Azadeh-Fard et al., 2015; MacKenzie, 2014*) találunk a kockázatok aggregálására. A rendelkezésre álló információkat nehéz egyetlen számban aggregálni (*MacKenzie, 2014*), ezért fontos, hogy az aggregálás során gondosan válasszuk ki az összetevőket, a súlyukat és a matematikai műveleteket (*Azadeh-Fard et al., 2015; Ni et al., 2010*). A legismertebb módszer, az FMEA a kockázati összetevők szorzataként határozza meg az RPN-értéket (*Fattahi-Khalilzadeh, 2018*). Magát az FMEA-módszert azonban számos kritika érte (*Liu et al., 2013*). Amint azt később látni fogjuk, a kritika jogosságát a jelen tanulmány alapjául szolgáló vizsgálataink is megerősítették. Jelentős továbbfejlesztési irány a fuzzy-alapú FMEA-módszerek kidolgozása (*Petrović et al., 2014; Tay-Lim, 2006*), illetve az aggregáláshoz geometriai átlagot (*Kokangül et al., 2017; Maheswaran-Loganathan, 2013; Wang et al., 2009*), mediánt (*Karasan et al., 2018*) és radiális euklideszi távolságot (*Malekitabar et al., 2018*) is használtak. További problémát

jelent, hogy az új FMEA (*VDA&AIAG, 2019*) már nem alkalmaz aggregálófüggvényeket, a kockázati összetevők rangsorolt értékei alapján táblázatból olvashatók ki a kockázati szintek (alacsony, közepes, illetve magas), és ezt a táblázatot a vállalati felhasználók maguk állítják össze.

Az aggregálófüggvények mellett fontos az aggregálás módszertana is. Az utóbbi időben új trend alakult ki a kockázatok aggregálása terén, mégpedig az integrált módszerek használata, például fuzzy TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) fuzzy AHP-val (*Kutlu és Ekmekçioğlu, 2012*), VIKOR (*Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*) fuzzy logikával (*Liu et al., 2013*). Ezek a módszerek azonban nem aggregálták a különböző területeken jelentkező kockázatokat. Erre megoldásként *Kosztján (2020)* és munkatársai egy teljes kockázatértékelési keretrendszer nevű módszert dolgoztak ki, amely az összetevőket, súlyokat és aggregációs függvényeket egy ún. hármas (*triplet*) **aggregálási protokoll** alapján kezeli. A protokollt rekurzívan alkalmazva, az aggregálást különböző kockázatértékelési szinteken lehet használni, mint például összetevő, hatás, mód, folyamat és szervezet. A TREF (*Total Risk Evaluation Framework*) módszer tehát a különböző irányítási rendszerek – például minőség, környezet, egészségvédelem és biztonság – területeire is kiterjeszhető, valamint ezek a területek egy vállalati szintű kockázatértékelési rendszerbe ágyazhatók. Mindezek mellett a TREF lehetővé teszi tetszőleges számú kockázati összetevő figyelembevételét, ellentétben például a hagyományos FMEA három összetevőjével (*Fattahi–Khalilzadeh, 2018*), és az értékelési skálák közül egyaránt kezeli az elődefiniált skálákat (*Gauthier et al., 2018; Kinney–Wiruth, 1976; Liu et al., 2013, 2012; Malekitabar et al., 2018*) és az utólag meghatározott skálákat (*Bognár et al., 2011; Merrick et al., 2005*). A módszert továbbfejlesztettük (TREF2), így a felhasználó többféle aggregálási függvény közül választhat, a folyamatfa bevezetésével pedig a TREF2 rugalmasan alkalmazható a szervezeti igényekhez igazítva a szintek, a területek, a rendelkezésre álló információk és a használt aggregálóeljárások függvényében.

A beavatkozásra való figyelmeztetések szintén fontos szerepet játszanak a kockázatértékelésben (*Khan et al., 2015; Øien et al., 2011*). A hagyományos kockázatértékelés hátránya, hogy sokszor nem veszi figyelembe az összetevők fontosságát, és esetenként indokolatlanul szigorú vagy engedékeny (*Kalantarnia et al., 2009*), egyetlen mutató (*Zheng et al., 2012*) vagy kockázati események listája (*Øien et al., 2011*) alapján figyelmeztet a beavatkozás szükségességére, ezért nem képes minden lényeges hibát jelezni. Számos előremutató megoldásról olvashatunk a kockázatértékelés beavatkozásra figyelmeztető rendszerének fejlesztése terén (*Ilangkumaran et al., 2015; Øien et al., 2011; Zheng et al., 2012*), de egyik sem képes az összetevőkről és az aggregálás különböző szintjeiről (hatások, módok, folyamatok, szervezet) átfogó figyelmeztető jelzést adni.

2. A kockázatkezelő keretrendszer bemutatása

A bevezetésben felvetett aggregálási lehetőségek egyidejű kezelése valósul meg a gyakorlatban. Ez különböző területeken és szinteken lévő kockázati összetevők aggregálását igényli. Az ilyen eseteket célszerű metaháló struktúrával modellezni. Módszerünk keretként egy ún. metaháló-struktúra¹ (Wang et al., 2018) háló reprezentációja helyett annak mátrixos reprezentációját alkalmaztuk. E keretrendszerként használt módszer segítségével írhatjuk le a kockázati összetevők, beavatkozások, célok, érintettek stb. közötti kapcsolatokat. A kapcsolatok leírására egy úgynevezett többdimenziós mátrixreprezentációt (*multi-domain mapping – MDM – matrix*) alkalmaztunk. Ezt a mátrixreprezentációt széles körben alkalmazzák komplex rendszerek leírására (Browning, 2016, 2014). Tanulmányunkban először a részhálózatokra koncentrálnunk, majd utalunk azok összefüggéseire is.

1. ábra

Metaháló reprezentációja
Representation of a meta-network

MDM	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	e_1	e_2	e_3	o_1	o_2	o_3	o_4	s_1	s_2	s_3
f_1		X	X														
f_2							X					X					
f_3																	
f_4																	
f_5								X									
f_6				X													
f_7																	
e_1										X							
e_2																	
e_3									X						X		
o_1															X		
o_2																	
o_3																	
o_4																	
s_1																X	
s_2																	
s_3											X						

Forrás: saját szerkesztés.

¹ Meg kell jegyezni, hogy a metaháló helyett hálózatelméleti szempontból helytállóbb lenne a többretegű (multilayer) hálózat kifejezés használata, ugyanakkor a szakirodalom a metaháló elnevezést alkalmazza, éppen ezért mi is ezt követjük (lásd 1. ábra).

A mátrixreprezentáció előnye, hogy egyszerűen megvalósítható és szimulálható az összetevők közötti függőség. A metaháló részhálózatai tetszőlegesen cserélhetők, kombinálhatók. Lehetőség nyílik a kockázatok hierarchikus ábrázolására is. Ugyanakkor egy-egy kockázati összetevőnek a célokra gyakorolt közvetlen hatását is modellezni lehet.

A következő alfejezetekben sorra vesszük a metaháló egyes komponenseit, kezdve a kockázati összetevőkkel, a kockázati eseményekkel, a célokkal, valamint az érintettekkel.

2.1. Hierarchikus kockázatértékelő rendszer

A kockázati összetevők (rész)hálózata (a mátrixreprezentációban a kockázati összetevők részmatrixa), maga is több szintből és rétegből (a mátrixreprezentációban több részmatrixából, ún. domainből) állhat. Ugyanakkor általában ezek a kockázati összetevők és azok aggregálásai egy hierarchiát követnek.

1. definíció: Legyen $\mathbf{f} = [f_1, f_2, \dots, f_n]^T$, ($n \geq 2$) ún. kockázati összetevőket tartalmazó vektor, ahol f_i vagy valós szám, vagy egy valós számokon értelmezett valós számokba képező folytonos függvény. Legyen továbbá $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$, ($n \geq 2$) egy nemnegatív értékekből álló súlyvektor ($w_i \in \mathbb{R}^+$). Jelölje $r = S(\mathbf{f}, \mathbf{w})$ az **aggregált kockázati értéket**, ahol S monoton aggregálófüggvény, vagyis $\forall \mathbf{f}, \mathbf{w}, \mathbf{f}_1 > \mathbf{f}_2, \mathbf{w}_1 > \mathbf{w}_2 \Rightarrow S(\mathbf{f}_1, \mathbf{w}) \leq S(\mathbf{f}_2, \mathbf{w})$ és $S(\mathbf{f}, \mathbf{w}_1) \leq S(\mathbf{f}, \mathbf{w}_2)$, valamint $S(\mathbf{f}_1, \mathbf{w}_1) \leq S(\mathbf{f}_2, \mathbf{w}_2)$. Jelölje továbbá $(\mathbf{f}, \mathbf{w}, S)$ hármas a **kockázati aggregáló protokollt**.

1. példa: A hagyományos FMEA-elemzés esetén: $n = 3$, $w_i := 1$, $f_i \in \{1, 2, \dots, 10\}$, $i := 1, \dots, n$, $S := \prod_{i=1}^n f_i$.

2. példa: A fuzzy FMEA esetén $n = 3$, $w_i := 1$, $f_i := \tau_i(x)$, $\tau_i(x) : I \rightarrow [0, 1]$ egy ún. tagsági függvény, $i := 1, \dots, n$, $S(\mathbf{f}, \mathbf{1}) := \prod_{i=1}^n \int_I f_i dx = \prod_{i=1}^n \int_I \tau_i(x) dx$.

3. példa: Amennyiben a kockázatértékelés a Fine Kinney-megközelítést követi, akkor $n = 3$, $w_i := 1$, $f_1 \in \{0.1, 0.2, \dots, 10.0\}$, $f_2 \in \{0.5, 1.0, \dots, 10.0\}$, $f_3 \in \{1.0, 2.0, \dots, 100.0\}$, $S := \prod_{i=1}^n f_i$.

4. példa: Vizsgálatainkban $n \in \{2, 3, 4, 5, 6\}$, $w_i \in \mathfrak{R}^+$, $f_i \in \{1, 2, \dots, 10\}$,

$W = \sum_{i=1}^n w_i$ $i := 1, \dots, n$. Az alábbi függvényeket alkalmaztuk:

- $S_0(\mathbf{f}, \mathbf{w}) = \prod_{i=1}^n f_i^{w_i}$ a súlyozott szorzat;
- $S_1(\mathbf{f}, \mathbf{w}) = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^n w_i f_i$ a súlyozott aritmetikai átlaga,
- $S_2(\mathbf{f}, \mathbf{w}) = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n f_i^{w_i}}$ a súlyozott geometriai átlaga,
- $S_3(\mathbf{f}, \mathbf{w}) = \text{Median}(\{\mathbf{f}, \mathbf{w}\})$ a súlyozott mediánja,
- $S_4(\mathbf{f}, \mathbf{w}) = \frac{1}{\sqrt{W}} \sum_{i=1}^n w_i f_i^2$, a súlyozott euklideszi távolsága

az összetevőknek. Abban az esetben, amikor $w_i = 1/n$, az $S_0 - S_4$ függvények súlyértékei megegyeznek.

Meg kell említenünk, hogy az aggregálási függvény nem igényli, hogy \mathbf{f} -hez előredefiniált skálákkal rendelkezünk. Az összetevők értékei ugyanis maguk is származhatnak például páros összehasonlítás eredményéből (Bognár et al., 2011; Merrick et al., 2005), vagy más módon számolt, például válaszadói gyakoriságokból (Gauthier et al., 2018).

A vállalati folyamatokat is különböző szintekbe sorolhatjuk. Ezek hierarchiájának szemléltetésére bevezettünk egy ún. **folyamatfa** fogalmat.

2. definíció: Legyen adott a folyamatokat jellemző $GP(N, A)$ irányított, összefüggő körmentes gráf: **folyamatfa**, amely topológikus rendezés után m szintbe rendezhető. A 0. szinten helyezkedjenek el a folyamatfa levelei, az $m-1$. szinten pedig a fa gyökere(i).

A folyamatfa szintjeinek kialakítása ugyan vállalatfüggő lehet, de egy erre vonatkozó ajánlást is adunk a 4. definícióban. A kockázati protokollt a folyamatfán a 0. szinttől az $m-1$. szintig iteratívan is lehet alkalmazni, ekkor minden szintre megkaphatjuk az aggregált kockázati értékeket.

3. definíció: Legyen adott egy m szintű $GP(N, A)$ folyamatfa. Legyenek továbbá $(\mathbf{R}^{(N)}, \mathbf{W}^{(N)}, S)$, $(\mathbf{R}^{(N-1)}, \mathbf{W}^{(N-1)}, S)$ kockázati protokollok, ahol $\mathbf{R}^{(0)} = \mathbf{f}$, $\mathbf{W}^{(0)} \rightarrow \mathbf{w}$. Jelölje az i -edik összetevőre az $N \rightarrow 1, 2, \dots, m-1$ -edik folyamatszinten a teljes kockázatprioritási értéket} (angolul: *total risk priority number*, rövidítve: TRPN-t) a $TRPN_i^{(N)} = R_i^{(N)} = S(R_i^{(N-1)}, W_i^{(N-1)})$.

A javasolt módszer lehetőséget ad arra, hogy több szempontból is vizsgáljuk a kockázatokat. Egy kockázatnak ugyanis egy vállalat esetében több területre lehet hatása, például a minőségre, a környezetre, az egészségvédelemre és a biztonságra, vagy termékbiztonsági okokból a jogi perekre (Kovács *et al.*, 2014). Ezeket a kockázatokat a gyakorlatban külön értékelik még akkor is, ha integrált irányítási rendszert működtetnek. Még ebben az esetben sem valósul meg a területek értékelésszintű integrálása. Ugyanakkor a 3. definíciót, a folyamatfát követve a levelektől egészen a gyökerekig, az alábbi szintek szerint adhatók meg a kockázati értékek. A továbbiakban a 4. definíció szerint fogjuk megnevezni az egyes folyamatszinteket.

4. definíció: Legyen adott egy $GP(N, A)$ $m = 8$ szintű folyamatfa. Ekkor a 3. definícióban szereplő $TRPN_i^{(N)} = R_i^{(N)} = S(R_i^{(N-1)}, W_i^{(N-1)})$ iteratív formulát használva az alábbi szintek különböztethetők meg:

$N = 0$: kockázati összetevők (például észlelhetőség, súlyosság stb.);

$N = 1$: kockázati területek (például minőség, környezet, egészségvédelem és biztonság);

$N = 2$: kockázati hatások;

$N = 3$: hibamódok kockázati értéke;

$N = 4$: folyamatok kockázati értéke;

$N = 5$: folyamatterületek kockázati értéke, például minőség, környezet, információbiztonság;

$N = 6$: fő folyamatok kockázati értéke;

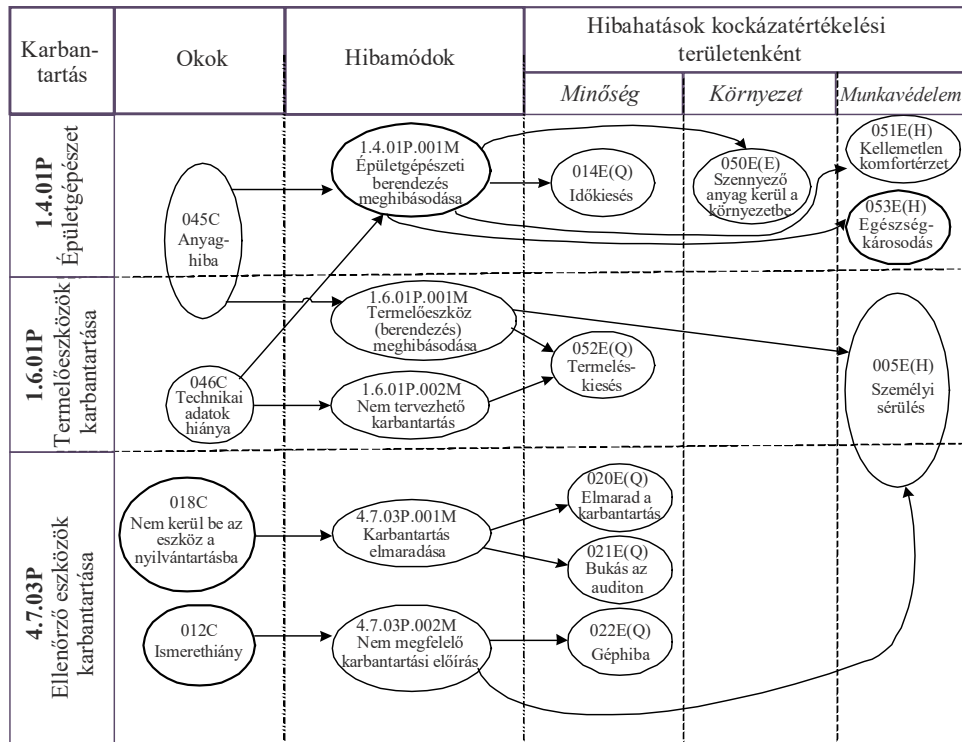
$N = 7$: vállalati szintű általános kockázati érték.

A folyamatfától elrugaszkodva, a 3. definíció iteratív kockázati meghatározását alkalmazva bármely, nem körmentes, topológikusan rendezett gráfon ki lehet számolni a kockázatokat. Így például meg lehet határozni azt is, hogy a közös okoknak milyen hatásuk van. Egy ilyen gráfra mutat példát a vállalati karbantartás területén a 2. ábra.

A gyakorlatban a w_i -k meghatározásánál figyelembe kell venni az alkalmazott aggregálófüggvény tulajdonságait. Például fontos az összetevők (a szakirodalomban gyakran „faktorok”) eloszlása aszimmetriájának, a kiugró értékeknek a kezelése. Néhány aggregálófüggvény ilyen tulajdonságát szemléltetik Malekita-bar és munkatársai (2018).

2. ábra

**Hibaokok, hibamódok és hibahatások rendszere
a vizsgált vállalat karbantartási területén**
*Causes, failure modes and failure effects in the maintenance area of
the examined company*



Az aggregálófüggvényekkel szemben támasztott követelmények

Az aggregálófüggvénnyel szemben többféle – tartalmi és matematikai – követelmény támasztható (Grabisch et al., 2009):

1. Validitás: Tükrözze azt, hogy a valóságban milyen módon adódik az összetevőkből az eredő kockázat. Ez egyfajta természetes követelmény, ami az aggregálandó jellemzők sajátosságaiból származik (Calvo et al., 2002; Grabisch et al., 2011, 2009; Kolesárová–Mesiari, 2015). Például több terület együttes kockázatának leírására a területenkénti összevonás (aggregálás) esetén megfelelő lehet egy additív modell, illetve ebből származtatva az aritmetikai átlag. Ilyen összeadható eset, amikor a kockázati összetevők azonos jellegűek, például pénzügyi károk kockázata, vagy alsóbb hierarchiaszintek eredő kockázatainak továbbaggregálása. Ugyancsak aggregálható összeadással például a generált fi-

gyelmeztetések száma. Nem aggregálhatók viszont összeadással a kockázati valószínűségek, de azok átlaga, terjedelme esetleg értelmezhető. Súlyosság- és előfordulás-összetevőkből történő aggregálás esetén a várható érték logikájának megfelelően a szorzat, illetve a geometriai átlag a célszerű választás. Ezt kiegészítve az észlelhetőséggel – amennyiben az független az előfordulástól –, az újabb szorzótényező még logikus, hiszen a kapott érték még mindig várható érték jellegű. Ebből a szempontból a gyakorlatban szokásos $RPN = \text{súlyosság} \times \text{előfordulás} \times \text{észlelhetőség}$ számítási mód elfogadható, még ha skála-, illetve súlyozási problémákat vet is fel. További összetevők bevonása azonban már problémákat okozhat, nemcsak az elvégzendő műveletek, hanem a függetlenség szempontjából is (Kosztján *et al.*, 2020). Ez a kedvezőtlen hatás súlyozással tompítható (Pitard, 2019). A továbbiakban matematikai követelményeket fogalmazunk meg. Ezek egyfajta torzításmentességet garantálnak.

2. Monotonitás: Bármely összetevő magasabb értéke esetén az aggregált érték nem lehet kisebb a többi összetevő változatlan értéke mellett (Calvo *et al.*, 2002; Grabisch *et al.*, 2009).

3. Szimmetrikusság: Szimmetrikus eloszlást követő összetevők esetén az aggregált értékek eloszlása is szimmetrikus (Calvo *et al.*, 2002; Grabisch *et al.*, 2009).

4. Egyenletesség, linearitás: Azonos, egyenletes eloszlást követő összetevők esetén az aggregált értékek eloszlása is legyen egyenletes (Calvo *et al.*, 2002; Grabisch *et al.*, 2009). Logikusnak tűnik, azonban nehezen teljesíthető követelmény, és nem is biztos, hogy – a szakirodalomban is fellelhető elvárásokkal szemben – megfelelő. Additív és multiplikatív modell esetén például egyaránt várható a közepes értékek nagyobb gyakorisága, mivel ilyen értékek nemcsak a közepes-közepes összetevő-kombinációkra, hanem a kis-nagy és nagy-kis összetevő-kombinációkra is adódhatnak.

5. Skálailleszkedés: Az alkalmazott skálaértékekkel legyenek elvégezhetőek az aggregálás műveletei (Marichal–Mesiar, 2009).

6. Skálavégpont-azonosság: Az eredmény lehetőleg azonos kezdő- és végpontú skálán keletkezzen, mint az összetevők skálája (ha azok azonosak), vagy egy közös skálán, ha különbözőek. Egyrészt az eredő kockázat értékelését segíti, ha az összetevőkkel azonos skálán keletkezik, ez egyfajta pszichológiai előny. Másrészt pedig az egymás utáni – például hierarchiaszintek közötti – többszörös aggregálás során torzítás léphet fel, ha az aggregált érték más kezdő- és/vagy végpontú skálán keletkezik (Zotteri *et al.*, 2005).

A 2–4. feltételek egyfajta torzításmentességet fogalmaznak meg, ami legtöbbször csak egy összetevő esetén valósul meg. Az aggregálófüggvény képzésénél azt is figyelembe kell venni, hogy az aggregálandó összetevők sokszor egész számok, bekorlátozva ezzel az eredő kockázat értékkészletét.

A fenti megkötések a metahálós keretrendszer nélkül is értelmezhetők. Ugyanakkor a metahálós megközelítés azt üzeni, hogy a kockázati összetevők és a *beavatkozási határok/szabályok, célértékek* kapcsolatával is foglalkozunk. Az aggregált kockázati érték mellett célszerű az alábbi jellemzőket elemezni:

- A vizsgált jellemző – kockázat – sajátosságaiból adódik, hogy nemcsak az abszolút értéke – a 0-tól való távolsága – az érdekes, hanem az attól az értéktől – a továbbiakban beavatkozási határ – vett távolság is, ahol már kockázatcsökkentő intézkedésekkel be kell avatkozni. A beavatkozási határ meghaladásának mértéke fontos kockázati indikátor, hiszen utal a meg nem tűrt kockázat mértékére. A határ alatti kockázat esetén nincs beavatkozás, ebből a szempontból közömbös lenne az érték. Mégis fontos lehet, hiszen a *határértéktől vett távolság* ebben az esetben utal a rendszerben lévő kockázati tartalékra.
- Mint más esetekben, a kockázat vonatkozásában is lehet *célérték*. Gazdasági kárral járó kockázatok esetén a nagy biztonság olyan erőforrás-ráfordítással járhat, ami már nem célszerű. A megelőzés például csak egy bizonyos előfordulási szintig éri meg, inkább lehet indokolt a kár csökkentése vagy részbeni áthárítása, megosztása, ha a káresemény bekövetkezik (például biztosítással). Tágítva a kört, a biztosítás során kért biztonságnak is van célszerűségi határa. A beavatkozási határhoz hasonlóan, a célértéktől vett eltérések is fontos értékelési szempontok lehetnek egy adott aggregálófüggvény esetén.

A gyakorlatban nem könnyű egyidejűleg megfelelni a validitásból adódó és a matematikai követelményeknek. Ebből következik, hogy az egyes aggregálófüggvények alkalmazásának vannak előnyei és hátrányai. Ez felveti a többváltozós eredményű (vektorral jellemzett kockázat-) aggregálás szükségességét, amely azonban nem tárgy a jelen tanulmánynak.

Az aggregálás megfelelőségének megítélésénél számolástechnikailag különbözik a diszkrét és a folytonos skálák kezelése. A diszkrét és a folytonos eset megkülönböztetése azért fontos, mert például a kockázati összetevőket egész értékű skálákon jellemzik, de ha kockázati számokat kell – például szervezeti szintek között – aggregálni, az összetevők törtszámok is lehetnek.

A jelen tanulmány vizsgálati területe:

- összetevőkből (2–6 féle) a kockázati érték meghatározása,
- diszkrét és folytonos értékek aggregálása, akár vegyesen is, például beavatkozásra figyelmeztető összetevők vagy RPN alapján,
- a kockázati összetevőkhöz nem rendelünk súlyokat,
- az egyes összetevőket azonos kezdő- és végpontú $\{1, 2, \dots, 10\}$, (a továbbiakban röviden $[1, 10]$) verbális skálákon mérjük (*Temesi, 2017*).

2.2. Hierarchikus figyelmeztetőrendszer

A kockázati összetevők még nem feltétlenül okoznak kockázati eseményeket. Azokat értékelni is kell. Erre javasolunk egy többszintű hierarchikus figyelmeztetőrendszert, amely követi a kockázati összetevők struktúráját. Az összetevők kapcsolatának megjelenítésére pedig a többdimenziós mátrixreprezentációt (MDM), hiszen itt lehet jelölni, hogy milyen kockázati összetevőre vagy aggregált kockázati értékre definiálunk beavatkozási határt.

A javasolt szabályalapú figyelmeztetőrendszer három típusú figyelmeztetést javasol.

5. definíció: Legyen $(\mathbf{R}^{(N)}, \mathbf{W}^{(N)}, S)$ és $(\mathbf{R}^{(N-1)}, \mathbf{W}^{(N-1)}, S)$ ($N \geq 1$) egy kockázataggregálási protokoll. Jelöljön továbbá $Cr^{(N-1)} \in \{0,1\}$ egy ún. kritikussági tényezőt a folyamatfa $N-1$ -ik szintjén. Legyen továbbá $\mathbf{T}^{(N)}, \mathbf{T}^{(N-1)}$ a beavatkozási határokat (*threshold*) tartalmazó vektor, ahol $\forall i, j, T_i^{(N-1)}, T_j^{(N)} \in \mathfrak{R}^+$. Jelölje a folyamatfa N -edik szintjén az i -edik összetevőre vonatkozó beavatkozási határt túllépő függvényt

$$K_i^{(N)} = \begin{cases} 1, & R_i^{(N-1)} > T_i^{(N-1)} \\ 0, & \text{különben} \end{cases} \quad (1)$$

Beavatkozás akkor történik, ha az alábbi három kritériumból legalább az egyik teljesül:

(W1): $\sum_i K_i^{(N-1)} \geq n^{(N-1)}$ (a kockázati összetevők közül legalább $n^{(N-1)}$ túllépi a

beavatkozási határt);

(W2): $\sum_j K_j^{(N)} \geq n^{(N)}$ (a kockázati összetevők aggregáltjai közül legalább $n^{(N)}$

túllépi a beavatkozási határt);

(W3): $Cr^{(N-1)} := 1$ (a kockázati összetevőt kritikusnak ítéltük).

Hierarchia szerinti aggregálás esetén az egyel magasabb szintre aggregálunk. Például a kockázati területek szintjén kiértékeljük a kockázati összetevőket, majd meghatározzuk az ezek aggregáltjaként számolható kockázati értékeket is. Valamennyi esetben beavatkozunk, ha a túllépések egy meghatározott beavatkozási szintet meghaladnak. A következő szinten a (W2)-es figyelmeztetések (W1)-es figyelmeztetések lesznek.

2.3. A célok meghatározása

A célok prioritásáról az érintettek bevonásával a menedzsment dönt. Maguk a prioritások a vállalati célokból eredeztethetők. Ebből adódóan a célok, hasonlóan a kockázati összetevőkhöz, illetve a figyelmeztetőrendszerhez, szintén gyakran rendezhetők hierarchikus módon. Vizsgáltuk a kockázati célok és a tényleges értékek viszonyát is. A kapott eredmények utalnak a rendszerben lévő kockázati tartalomokra és a szűk keresztmetszetekre. A vizsgálat ezen részére terjedelmi okból nem térünk ki a jelen tanulmányban.

2.4. Az érintettek modellezése

Végül, de nem utolsósorban az érintetteket és azok kapcsolódásait is modellezni lehet. Az érintettek (*stakeholders*) a kockázatkezelésben kettős szerepben jelennek meg. Lehetnek kockázatok forrásai és kockázati események elszenvedői is. A vállalati dolgozók nem megfelelő munkavégzése például minőségi kockázatot jelent, de a munkahelyen érheti őket baleset, egészségkárosodás. Ugyanígy, a társadalmi környezetet tekintve például előfordulhat dézsmakár egy közeli vállalatnál, a vállalati működés pedig előidézhethet különféle környezeti problémákat a közelben lakóknál (például zaj, rezgések, kellemetlen szagok), ami általában véve az életminőség romlásával jár. Hasonló kettőség figyelhető meg a többi érintett, például a beszállítók, vevők, tulajdonosok, menedzsment, finanszírozók, vagy akár az államigazgatás esetén is. Az érintetteknek lehet saját megtűrt kockázati szintjük, amely felett már beavatkozást igényelnek. Egymástól eltérő módon aggregálhatnak, egymásétól eltérő lehet náluk például az összetevők súlya és a skálák. Harmincezer forint anyagi kár például mást jelent egy egyéni vevőnek és mást a gyártó vállalatnak. Egy hűtőszekrény házhoz szállítása kisebb súlyosságú problémát okoz a kereskedőnek, mint a visszaszállítása egy egyéni vevőnek. A kockázatkezelés – s ezen belül az aggregálás – elvégezhető az ő szempontjukból is. Ez technikailag azt jelenti, hogy a skálák kialakítása, az összetevők kockázati értékeinek megítélése, az aggregálási módszer kiválasztása az ő véleményük alapján történik. A vállalati kockázatkezelést alapvetően a menedzsment alakít(tat)ja ki, ezért közvetlenül a vezetők véleményét tükrözi. Az egyes részterületeken a kockázatok megítélése, a javító, megelőző intézkedések kidolgozása a szakértő belső vagy külső munkatársak feladata. A gyakorlatban, vizsgálatunk során mi is vállalati szakemberekkel folytatott interjúk alapján alakítottuk ki a kockázatok kezelését. Ez a többi érintettel is elvégezhető hasonló módon.

2.5. További elemek bevonása a metahálóba

A metaháló-elemzés nem zárja ki további elemek bevonását sem. Lehetőség van például a javító, megelőző tevékenységek bevonására. Ennek segítségével ütemezni lehet ezeket a tevékenységeket. A kockázati összetevők rendszerszintű modellezéséről és a javító, megelőző tevékenységek összekapcsolásáról már született hazai (Kosztján *et al.*, 2016) és nemzetközi (Kosztján, 2018; Kosztján *et al.*, 2019) tanulmány is. Jelen írásban az ütemezési kérdésekkel már nem foglalkozunk, mert az már szétfeszítené e cikk kereteit. Ugyanakkor e négy terület kapcsolatainak bemutatása és modellezése is számos lehetőséget nyújt a kockázatok értékelésére, illetve a megfelelő aggregálási módszerek kiválasztására.

3. A szervezeti kockázatok meghatározása

A javasolt metaháló-struktúra lehetővé teszi, hogy egy-egy részhalóra koncentráljunk, ugyanakkor lehetőséget teremt a részhalók kapcsolatainak vizsgálatára is. Modellezhetjük azt az esetet, amikor a kockázati összetevők függetlenek egymástól, de azt is, hogy közöttük kölcsönös vagy adott irányú függés van.

3.1. Kutatási kérdések

K1: A vizsgált aggregálófüggvények közül a megfogalmazott kritériumokat mely aggregálófüggvény teljesíti?

Ehhez megvizsgáljuk a szokásosan alkalmazott és még szóba jövő aggregálófüggvényeket, és meghatározzuk jellemzőiket az alkalmazhatóság szempontjából. A torzító hatások elkerülése érdekében nem alkalmaztunk súlyozást. Ez a Monte-Carlo-szimuláció használatával a kivitelezésben nem jelentett könnyítést. A súlyok figyelembevétele az érzékenységvizsgálatnál válik különösen érdekessé, azonban terjedelmi okokból az érzékenységvizsgálatra nem mutatunk példát. A kísérletek száma 1 100 000 volt. (Nem mindegyik eset igényelt ennyit, azonban a kb. 10 másodperces futási idő nem indokolta a változtatást.)

K2: Egy adott aggregálófüggvény és adott beavatkozási határok esetén hogyan alakul a beavatkozás szükségességére vonatkozó figyelmeztetések gyakorisága?

Az összetevőkre vonatkozó kritikus értékek mellett az aggregált értékekre adott beavatkozási határok hatását is vizsgáljuk. További kérdés, hogy az össze-

tevőkre vonatkozó határértékek helyettesíthetők-e az aggregált értékre megadott határértékekkel? A határértékektől való távolságok utalnak a rendszerben lévő biztonsági tartalékra.

3.2. Az aggregálófüggvények vizsgálata

Ebben a fejezetben 2, 3, valamint 6 összetevőre vonatkozóan tekintjük végig, hogy az egyes aggregálófüggvények értékei hogyan alakulnak, ha az összetevők 1 és 10 között bármely egész számot felvehetnek, diszkrét egyenletes eloszlást követve.

A szimulációk során ötféle aggregálófüggvényt vizsgáltunk meg (lásd 4. példa súlyozatlan esetei):

- **Egyszerű (aritmetikai) átlag:** $f_R = S_1(f, 1) = \sum_{i=1}^n f_i / n$. Az eredmény az eredeti [1, 10] skálák értékeire képződik le. Additív modell esetén használható.
- **Szorzat:** $f_R = S_0(f, 1) = \prod_{i=1}^n f_i$. A vállalati gyakorlatban leginkább használt aggregálófüggvény, ahol az előfordulás, a súlyosság és az észlelhetőség értékét szorozzák össze, és így adódik az RPN (*Risk Priority Number*). Az eredmény az [1, 10^n] skálára képződik le. Az eredményt az eredeti [1, 10] skálához közelítés érdekében $10^{(n-1)}$ osztással az eredetihez közeli [$1/10^{n-1}$, 10] skálára képezzük le, de további transzformációt nem végzünk. Várható érték típusú modellhez illeszkedik.
- **Geometriai átlag:** $f_R = S_2(\mathbf{f}, 1) = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n f_i}$. A szorzat egyfajta transzformációja, ami javítja a linearitást. Az eredmény az eredeti [1, 10] skálák értékeire képződik le.
- **Euklideszi távolság:** $f_R = S_4(\mathbf{f}, 1) = \sqrt{\sum_{i=1}^n f_i^2}$. Az eredmény a [\sqrt{n} , $10\sqrt{n}$] skálák értékeire képződik le. Az eredő RPN-eket \sqrt{n} -nel történő osztással az eredeti [1, 10] skálára képeztük le. Valamilyen előírt vagy célértéktől való távolság esetén megfontolandó a használata. Alapesetben az összetevők kockázati értékei a 0-tól vett távolságot tartalmazzák. Ezen aggregálófüggvény használatakor a továbbiakban mi is az összetevők értékeivel fogunk dolgozni.

- **Medián:** $f_R = S_3(\mathbf{f}, 1)$. 50%-os decilis, középső érték. $n=2$ esetén megegyezik az aritmetikai átlaggal. Jellemzője, hogy kevésbé érzékeny a kiugró (kilógó) adatokra. Az eredmény az eredeti $[1, 10]$ skálák értékeire képződik le.

3.3. Az aggregálófüggvények jellemzése

Két kockázataggregálási témakör különíthető el:

- Aggregálás a legalsó szinten. Az összetevők meglehetősen különböznek egymástól, heterogének, mint például az előfordulás és a súlyosság, emiatt kérdéses, hogy például összegezhető-e. Az összetevők általában diszkrét skáláról származnak, az eredő kockázat jellemzően a multiplikatív modell szerint alakul.
- Területi és szervezeti aggregálás. Eredeti összetevőkből történő aggregálás esetén diszkrét, RPN-ekből történő aggregálás esetén tört aggregálandó értékek is lehetségesek. Az RPN-ek között többféle művelet végezhető. A kockázatok inkább összeadódnak.

3.3.1. Aggregálás a legalsó szinten

A multiplikatív modellezés (a gyakorlatban alkalmazott szorzásos eredőképzés) és a feltételezett függetlenség miatt az aggregálandó összetevőket, mint például az előfordulás (O), a súlyosság (S), az észlelhetőség (D), gyakran faktoroknak nevezik. A 2.1. fejezetben tárgyalt értékelési szempontokat a következők szerint alkalmaztuk:

- **Validitás:** Ahogyan azt korábban (a 2.1 fejezetben) kifejtettük, a validitás annak mértéke, hogy a függvény mennyire jól írja le azt a folyamatot, ahogyan az összetevőkből az eredő kockázat kialakul. Konkrét esettől függ, megítélése részben kvalitatív elemzés eredménye. Vizsgálataink során feltételeztük, hogy az eredő képződésének logikája illeszkedik az aggregálófüggvényhez.
- **Monotonitás:** Csak olyan függvényeket vizsgáltunk, amelyek megfelelnek a korábban definiált monotonitási elvárásnak.
- **Szimmetrikusság:** Mérésére a ferdeség mutatószámát vettük. A ferdeség az eloszlás aszimmetriájának mértéke. Szimmetrikus eloszlás esetén 0. Pozitív érték esetén az eloszlás sűrűségfüggvénye jobbra nyúlik el, negatív érték esetén balra. A függvények képe ugyancsak illusztrálja a ferdeséget (3–5. ábrák).

- **Egyenletesség, linearitás:** Az egyenleteseloszlás-függvénytől (CPF) vett, egy adatpontra jutó átlagos abszolút eltérés. (*Mean Absolute Deviation*, a továbbiakban MAD) A szimulációs kísérletekből kapott 1000 elemű mintából határoztuk meg. Az egyenletesség megítélését segíti még a legnagyobb eltérés abszolút értéke (*Max. AD*). Néhány esetben az eltéréseket az egyenletes eloszlástól az RPN függvényében grafikusán is megjelenítettük. Ahogyan azt a 2.1. fejezetben kifejtettük, az egyenletesség nem várható el még egyenletes eloszlású összetevők esetén sem, ezért a mutatószámmal vagy a függvény képével történő jellemzés inkább szolgál összehasonlításra, mint a jószág megítélésére.
- **Skálailleszkedés:** Az alkalmazott skálaértékekkel legyenek elvégezhetőek az aggregálás műveletei. Feltételeztük, hogy a műveletek elvégezhetőek.
- **Skálavégpont-azonosság:** A skálák végpontjait, ahol szükséges volt, egy egyszerű transzformációval illesztettük az $[1, 10]$ intervallumhoz, egy esetben pedig meghagytuk az $[1/\sqrt{n}, 10]$ intervallumot.

További értékelési szempontok is lehetségesek, például: a kiugró értékek, a függőség kezelése, vagy a gyakorlati megvalósítás egyszerűsége. Ezeket részben érintjük.

Kétféle összetevő-eloszlást alkalmaztunk:

- Az $[1, 10]$ intervallumon egyenletes eloszlású egész értékek. Ebben az esetben az eredők szimmetrikusságát és linearitását vizsgáltuk.
- $m=4, \sigma=1,5$ normális eloszlású egész értékek. Itt csak a szimmetrikusságot vizsgáltuk, hiszen az összetevők csak szimmetrikusak voltak, de nem egyenletesek.

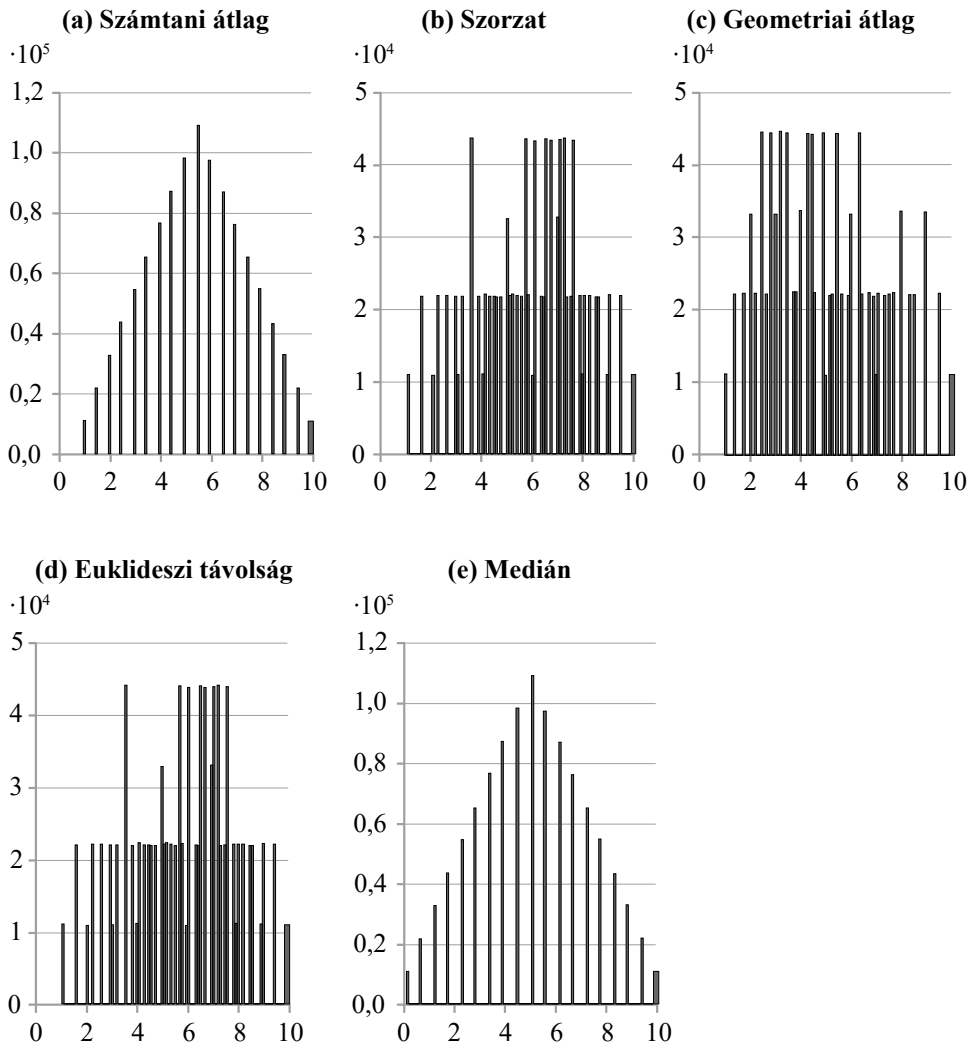
A követhetőség érdekében először két összetevőre (előfordulás és súlyosság), súlyozottanul számoltuk a kockázati értékeket.

A követelmények közül részletesebben a szimmetrikusságot és a linearitást vizsgáltuk. Ezekhez – a megfelelő mutatók kiszámítása mellett – célszerű megjeleníteni a függvények képét. Az aggregált értékek eloszlását egyenletes eloszlású összetevők esetén az RPN függvényében felvett gyakorisági hisztogramok mutatják (3–5. ábra). A futtatások során kapott függvények egyfajta fésűs jelleget mutatnak.

A diszkrét összetevőértékek miatt az aggregált értékek is hézagosak. Bár nem szerepelt az értékelési szempontok között, de megfigyelhető, hogy az átlag és a medián a többinél kevesebb értéket szolgáltat, ami némileg hátrányos, különösen a többlépcsős aggregálás során. Azért csak némileg, mert az aggregálandó adatok is tartalmaznak bizonytalanságot. Már a kétösszetevős modell is mutatja (lásd 3. ábra), hogy bár ez egyenletes eloszlású összetevőértékek esetén várható volna, a kimenet nem mindegyik esetben szimmetrikus.

3. ábra

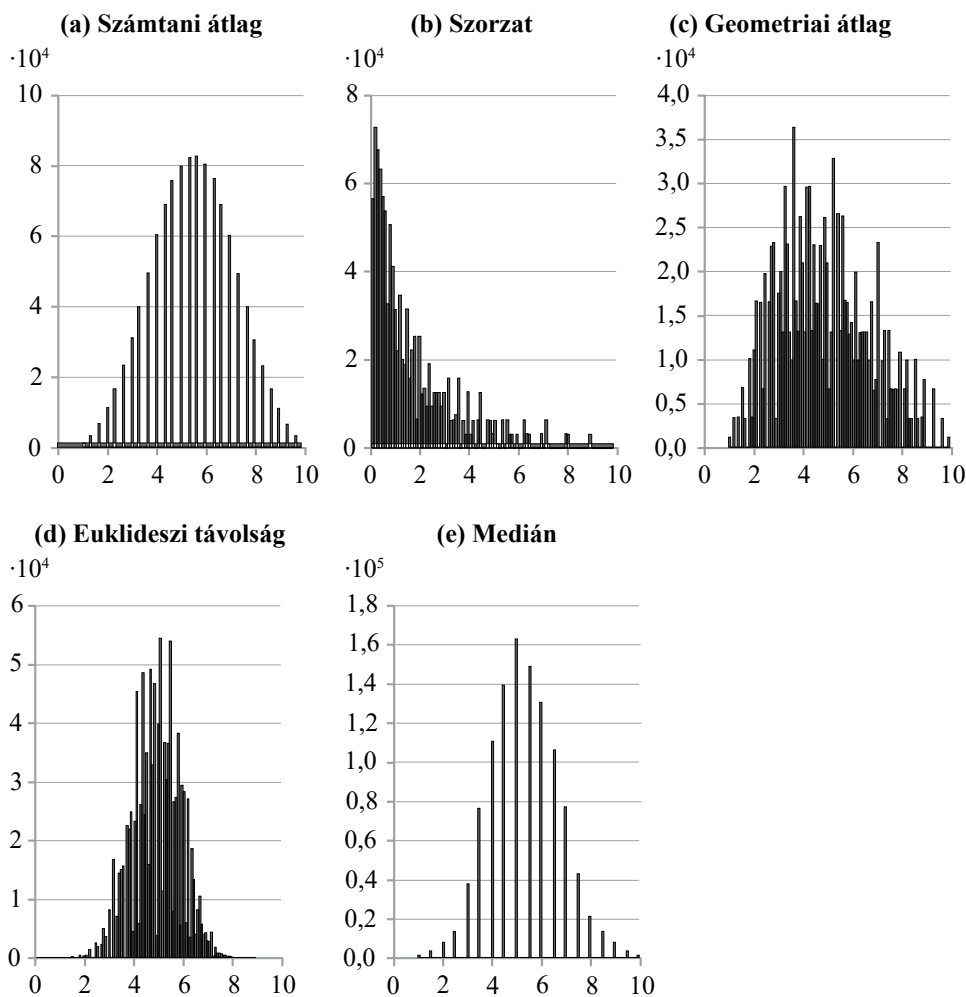
Az aggregált értékek eloszlásai két, egyenletes eloszlású összetevő esetén
Distributions of aggregate values for two uniformly distributed components



A gyakorlatban nemcsak kettő, hanem több összetevő alapján is történik aggregálás. Az FMEA-nál leggyakrabban az előfordulást (O), a súlyosságot (S) és az észlelhetőséget (D) veszik figyelembe, az aggregálás pedig szorzással történik. A 4. ábra (b) része mutatja, hogy ez mennyire rossz megoldás a szimmetrikusság szempontjából.

4. ábra

Az aggregált értékek eloszlásai három, egyenletes eloszlású összetevő esetén
Distributions of aggregated values for three uniformly distributed components

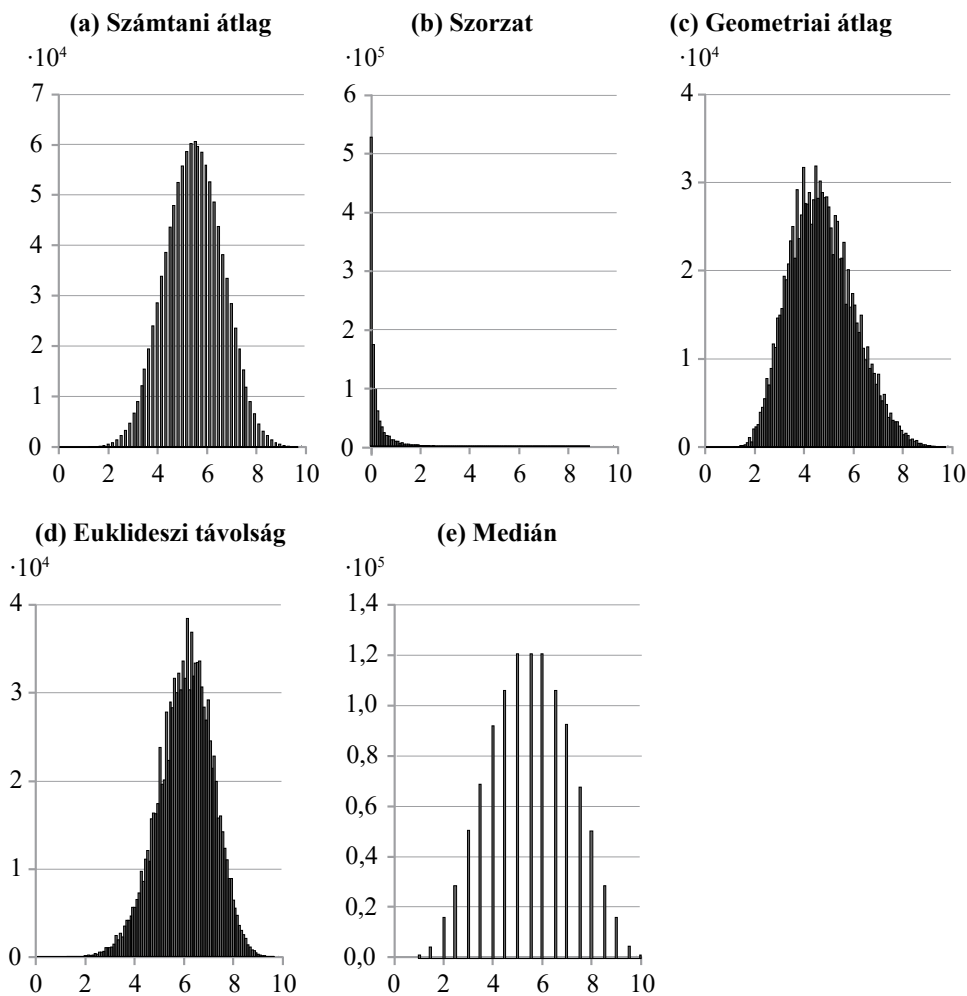


Korábban már születtek javaslatok további kockázati összetevők bevonására (Karasan *et al.*, 2018; Kovács *et al.*, 2014; Maheswaran–Loganathan, 2013). Az eddigi legtöbb összetevőt kezelő modell Kovács és munkatársai (2014) nevéhez fűződik. Mindazonáltal mi is úgy véljük, hogy a kockázati összetevők száma függ az adott kockázati területtől. Ráadásul az, hogy hány összetevőt értékelnek, vesznek figyelembe, menedzseri döntés.

Az általunk kidolgozott kockázatkezelési rendszerben az említettekhez (OSD) még hozzájöhethet a befolyásolhatóság (C), a kiterjedtség (R) és az információellátottság (I). Hat összetevő esetén már a szorzaton alapuló, hagyományos FMEA-modellt követő aggregálómódszerek kevésbé alkalmazhatók (lásd 5. ábra, (b) Szorzat).

5. ábra

Az aggregált értékek eloszlásai hat, egyenletes eloszlású összetevő esetén
Distributions of aggregated values for six uniformly distributed components



A szimmetriát legjobban a medián és a számtani átlag adja vissza. Ugyanakkor az utóbbi alkalmazása alapvetően sorrendi skálán értékelt kockázati összetete-

vők esetén meglehetősen kétséges. Ugyancsak problémát vet fel, ha az aggregálható értékek különböző összetevőkből származnak. Kérdéses például, hogy a súlyosság és az előfordulás esetén az előfordulás adott számértékéhez tartozó kockázat mennyiben tekinthető azonosnak a súlyozás azonos számértékéhez tartozó kockázattal. Önmagában mindkettő kevés információt tartalmaz a kockázatról, éppen ezért van szükség több összetevőre és ezek aggregálására. Az aszimmetrikus eredményt szolgáltató függvények gyakorlati alkalmazására talán csak az szolgálhat mentesül, hogy a függvénynek csak a bal oldali, kis eredő kockázathoz tartozó intervallumát használják. A nagy kockázatra utaló hosszú elnyúlás irreleváns, még ha hordoz is információt.

A szimmetrikusság indikátorául szolgáló ferdeségértékek az 1–2. összefoglaló táblázatokban láthatók.

Az 1. táblázat azonos ([1, 10] intervallumon egyenletes) kockázatiösszetevő-eloszlások és különböző aggregálófüggvények esetén foglalja össze az eltérésindikátorokat különböző számú összetevők esetén.

1. táblázat

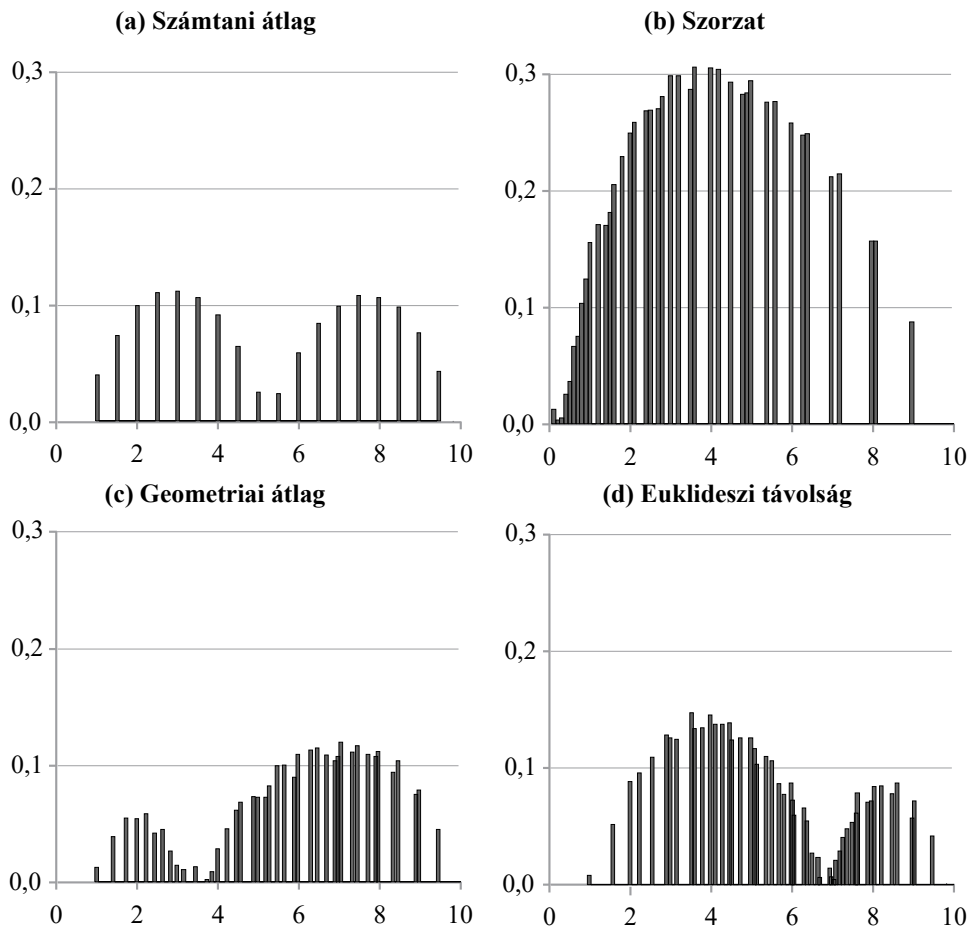
A különböző aggregálófüggvények jellemzői egyenletes eloszlású összetevők esetén
Characteristics of different aggregation functions for uniform distributed components

Aggregálófüggvény	Mutatószám	Összetevők száma (n)		
		2	3	6
Átlag	Ferdeség	0,001535	0,0022	-0,00053
	MAD	0,086	0,122	0,162
	Max. AD	0,1514	0,218	0,303
Szorzat / 10^{n-1}	Ferdeség	0,9154	1,67	4,34
	MAD	0,1647	0,288	0,399
	Max. AD	0,2624	0,4616	0,666
Geometriai átlag	Ferdeség	0,2643	0,341	0,357
	MAD	0,0686	0,112	0,155
	Max. AD	0,1249	0,172	0,23
Euklideszi távolság / \sqrt{n}	Ferdeség	-0,296	-0,343	-0,2845
	MAD	0,1059	0,1419	0,1855
	Max. AD	0,207	0,28	0,3768
Medián	Ferdeség	0,001535	0	0,00119
	MAD	0,08594	0,0607	0,12
	Max. AD	0,1514	0,1035	0,2069

Ahogy említettük, a linearitást csak egyenletes eloszlású összetevők esetén célszerű vizsgálni, ha egyáltalán elvárható. Bár a függvények képe mutatja az egyenletes eloszlástól való eltérést, szemléletesebb, ha megjelenítjük az eloszlásfüggvények eltérését az RPN függvényében. A függvények egyenletestől való eltérései két egyenletes eloszlású összetevő esetén az RPN függvényében a 6. ábrán láthatók.

6. ábra

Eltérés az egyenletes eloszlástól két, egyenletes eloszlású összetevő esetén
Deviation from uniform distribution for two uniformly distributed components



A jellemzők alapján megállapítható, hogy a legkisebb eltéréssel (a leginkább lineárisan) az aritmetikai átlag, a medián és a geometriai átlag képezi az eredő értéket. Az adott értékelési szempontokat alapul véve éppen a gyakorlatban legin-

kább alkalmazott szorzat a legrosszabb. Ennél még az euklideszi távolság is jobb jellemzőkkel rendelkezik.

A normális eloszlású összetevőkkel adódó RPN-ek esetén a linearitás nem várható el, a szimmetrikusság viszont azonos, szimmetrikus eloszlású összetevők esetén igen. A 2. táblázat tartalmazza a ferdeségértékeket különböző számú összetevők esetén.

2. táblázat

**A különböző aggregálófüggvények ferdeségértékei
normális eloszlású összetevők esetén**
*Skewness values of different aggregation functions for
standard normal distribution components*

Aggregálófüggvény	Összetevők száma (n)		
	2	3	6
Átlag	0,1	0,00772	0,061
Szorzat / 10^{n-1}	0,817	1,2368	2,86
Geometriai átlag	0,0963	0,0343	0,0785
Euklideszi távolság / \sqrt{n}	0,0633	-0,05085	0,03038
Medián	0,101	0,7436	0,0294

A legjobb eredményt adók közül a további elemzésekben a geometriai átlagot használtuk fel. Ennek indoka, hogy az előfordulás és a súlyosság a gyakorlatban mindig szerepel a kockázatelemzésben. Ezek eredője célszerűen várható érték jellegű, ami szorzással adódik. Ennek torzítását csökkenti a gyökvonás. Az észlelhetőség bevonása ezen nem ront, hiszen feltételessé teszi a kockázat kezelését. Az összetevők függetlenségét feltételezzük.

3.3.2. Területi és szervezeti aggregálás

Az eredő kialakítása itt várhatóan additív jellegű. Emiatt az aritmetikai átlag jó mutató lehet. Fontos vezetői információt hordoz az összetevők közül a legnagyobb kockázat értéke. Egy adott terület kockázati értékeinek terjedelme utal a szórásra. Az összetevők eloszlása pedig Pareto-elemzést alapoz meg, támogatva a kockázati szempontból lényeges területekre való összpontosítást. A medián ugyancsak javasolható.

Sajátos aggregálást jelent a legnagyobb érték kiválasztása, ami alapján a területek, egységek kockázati szempontból rangsorolhatók. Erre azért van lehetőség, mert a területi és szervezeti aggregálandó összetevők tartalmukat tekintve homogén sokaságot alkotnak. Ha az összetevők azonos tartalmúak, például mindegyik

egy korábbi aggregálásból származó RPN, akkor kiválasztható a valamilyen szempontból jellemző, például a legnagyobb érték, modulus, terjedelem.

Ha a kockázati összetevők eltérő jellegűek, akkor – legyenek bár azonos végpontú skálákon mérve –, nem biztos, hogy ezt meg lehet tenni. Nehezen védhető ugyanis az olyan állítás, mint például az, hogy „a 8 értékű észlelhetőség nagyobb kockázatot hordoz, mint a 7 értékű súlyosság”. A skálák felállításakor az ilyen, skálák közötti összehasonlíthatósági szempontot nem veszik figyelembe.

Az aggregálófüggvények összefoglaló értékelését a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat

A különböző aggregálófüggvények vizsgálatának eredménye
The result of the evaluation of different aggregation functions

Aggregálófüggvény	Előny	Hátrány
Átlag	Egyszerű a számítása. Viszonylag jó linearitás. Az eredő skála azonos az összetevőkkel, [1,10] intervallumon.	Csak additív összetevőkhöz illeszkedik.
Szorzat / 10^{n-1}	Várható érték típusú eredőhöz jól illeszkedik.	Nem [1,10], hanem $[1/10^{n-1}, 10]$ skálára képez le. A gyakorlatban használt szorzat pedig az $[1, 10^n]$ intervallumra.
Geometriai átlag	Az eredő skála azonos az összetevőkkel, [1,10] intervallumon. Jó linearitás.	Számolása a gyakorlatban nem egyszerű. Inkább illeszkedik a multiplikatív modellhez.
Euklideszi távolság / \sqrt{n}	A többi függvényhez képest közepesen jó linearitás.	Számolása a gyakorlatban nem egyszerű.
Medián	Az eredő skála azonos az összetevőkkel, [1,10] intervallumon. Jó linearitás. Sorrendi szintű skálánál is használható.	Számolása a gyakorlatban nem egyszerű. Viszonylag durva skálafelosztás. Csak homogén kockázati összetevők esetén tekinthető korrektnek.

Megjegyezzük, hogy a gyakorlati számolások nehézségét elsősorban nem a konkrét érték kiszámítása jelenti, hiszen erre ma már rendelkezésre állnak például táblázatkezelők, hanem a rugalmasság érdekében figyelembe vett eseteknek, például a súlyozásnak, a különböző számú összetevők figyelembevételének a kezelése, a kapcsolódó megfontolások kialakítása. Ez inkább a fejlesztői, s kevésbé az alkalmazói oldalon jelenik meg. A korlátokat természetesen az utóbbinál is figyelembe kell venni.

4. A beavatkozásra való figyelmeztetések vizsgálata

A kockázatok kezeléséhez nem elég az összetevők szerinti és aggregált értékek meghatározása (*evaluation*). Az is fontos, hogy a kockázatok mértékét az esetleg szükséges beavatkozások szempontjából értékeljük (*assessment*). Ez a folyamat oldaláról történik, a még megtűrhető kockázatok figyelembevételével, aminek során – többnyire megítélés alapján – kritikus értéket határozunk meg. Itt első- és másodfajú hibát egyaránt el lehet követni. A túl magas kritikus érték esetén a kockázat alábecsült, és még indokolt esetben sem történik beavatkozásra figyelmeztetés. Túl alacsony érték esetén pedig hamis, nem indokolt beavatkozásra figyelmeztetés következik be. Az is előfordulhat, hogy a rosszul megválasztott kritikus értékek annyi figyelmeztetést eredményeznek, ami már meghaladja a szervezet kockázatsökkentő kapacitását. Fontos kérdés tehát, hogy szervezeti vagy területi szinten egy elkészített kockázatelemzés és -értékelés után mennyi figyelmeztetés várható, s ezek mely összetevőkhöz/kritikus értékekhez köthetők.

Az általunk kidolgozott rendszer két szinten generál figyelmeztetéseket, amelyeket azután továbbaggregál területi, illetve szervezeti szinteken. A továbbiakban ezt a két témakört vizsgáljuk: figyelmeztetések egyedi összetevő- és aggregált értékek alapján, figyelmeztetések aggregálása.

4.1. Beavatkozásra figyelmeztetések egyedi és aggregált értékek alapján

A legalsó – még nem aggregált – szintet az összetevőknél beállított beavatkozási határok jelentik. Ezek bármelyikének túllépése figyelmeztetést vált ki. Az egyes összetevők eloszlásának ismeretében a figyelmeztetések várható aránya (ami a valószínűség becslése) előrejelezhető. A gyakorlatban az alsó szintű összetevők közül általában a súlyossághoz rendelnek egyedi beavatkozási határértéket a törvénysértés és a személyi sérülések megelőzése érdekében. Ugyancsak előfordul, hogy az RPN-ben nem szereplő, összetevőnek nem tekinthető, egyedi kritikusságot jelző mutatót is alkalmaznak, ami a többi (összetevő, RPN) értékétől függetlenül válthat ki figyelmeztetést. Ezeknek a – kétértékű – mutatóknak az eloszlása is figyelembe vehető a figyelmeztetések várható alakulásának előrejelzése érdekében.

A következő szint az RPN értékéhez kapcsolódó figyelmeztetés generálása. Az RPN-hez is rendelhető olyan kritikus érték, amelynek túllépése figyelmeztetést vált ki. A gyakorlatban ez az összetevők skálaközepi értékéhez tartozó RPN-érték. Háromtényezős szorzat aggregálófüggvény esetén például $S \times O \times D = 125$, $[1, 10]$ intervallumú skálákat feltételezve.

Ha az összetevők mindegyikére van kritikus érték, akkor ezeknek az adott összetevő eloszlásfüggvényébe történő behelyettesítésével adódik annak valószínűsége, hogy nem történik figyelmeztetés. Ennek a komplementere a figyelmeztetés valószínűsége. Az eloszlásfüggvény – elméleti vagy tapasztalati – ismeretében a számolás analitikusan elvégezhető. Ez a logika alkalmazható az eredő (RPN) esetében is, hiszen az aggregálófüggvény – ismert összetevő-eloszlások esetén – meghatározza az RPN eloszlását.

A gyakorlatban azonban beavatkozásra figyelmeztetés kiváltása az egyes összetevők szerinti döntések logikai „VAGY” kapcsolata alapján történik. Ekkor a figyelmeztetések számának analitikus előrejelzése csak speciális esetekben lehetséges. Kézenfekvő megoldás a Monte-Carlo-szimuláció alkalmazása, aminek eredményét – egyenletes eloszlások esetén – a 4. táblázat tartalmazza.

4. táblázat

A beavatkozások valószínűsége az összetevőértékek egyenletes eloszlása esetén

Probability of interventions in case of uniform distribution of component values

A beavatkozás alapja	Súlyosság	Előfordulás	Eredő beavatkozás	RPN
Függvény	Egyenletes [1,10]	Egyenletes [1,10]		Geometriai átlag
Kritikus érték	4	7	A „VAGY” kapcsolatok „igaz” értéke	5
A beavatkozás valószínűsége analitikusan	0,6	0,3	$1-(1-0,6)(1-0,3)=0,72$	0,47
A beavatkozás valószínűsége szimulációval	0,6	0,3	0,73	0,47

Az ilyen módon kapott eredmények több döntést is megalapozhatnak. A valószínűségi értékek utalnak a jövőbeni beavatkozásokra való figyelmeztetések előfordulására. A 4. táblázat adataiból kiolvasható, hogy ha a súlyosság határértéke (4), a figyelmeztetés valószínűsége a rendszerben lévő súlyosságértékek eloszlása mellett 0,6, ami már önmagában is nagynek tekinthető. Az előfordulás magasabb (7) kritikus értéke kevesebb beavatkozást jelent (0,3 valószínűség). A kérdés az, hogy van-e a szervezetnek kapacitása ennyi beavatkozás kezelésére, megelőző intézkedés megtételére. Ha nincs, akkor ideális esetben a hibamódok súlyosságát kell csökkenteni, amivel a súlyosságok eloszlása változik meg. Elvileg lehetséges a beavatkozási határ növelése is, ami kockázatcsökkentő intézkedések elmaradását vagy elhalasztását jelenti. Ezen két összetevő – függetlenség esetén – 0,72 valószínűséggel fog figyelmeztető jelzést adni. Ha csak az RPN-re van kritikus érték (esetünkben 5), akkor is előrejelezhető a beavatkozásra vonatkozó figyel-

meztetés valószínűsége. Ekkor azonban nincs információ arról, hogy melyik összetevőnél érdemes beavatkozni. Emlékeztetünk arra, hogy a figyelmeztetés nem valamilyen hiba bekövetkeztekor, hanem az adott összetevő kockázati értékének megítélésekor, illetve az RPN kiszámításakor történik.

A következő példában (5. táblázat) az összetevőértékek normális eloszlást mutatnak. Ez jobban követi a gyakorlatban előforduló értékek eloszlását. Az 5. táblázatban szereplő információból az előzőhöz hasonló következtetéseket lehet levonni, sőt még továbbit is. Látható, hogy a beavatkozási valószínűségek kisebbek (0,37, 0,16). Még az előfordulásnál is, ahol az összetevő várható értéke nagyobb (6), mint az egyenletes eloszlás esetén (5,5). Ez egyértelműen a normális eloszlás kisebb szórása miatt adódott. Ebből az következik, hogy a kockázatkezelésre is igaz a folyamatmenedzsment általános szórás csökkentési törekvése. Kisebbség „rátartással” (tartalékkal, veszteséggel) lehet működtetni egy rendszert, ha a szórások kicsik.

5. táblázat

A beavatkozások valószínűsége az összetevőértékek normális eloszlása esetén

Probability of interventions in case of standard normal distribution of component values

A beavatkozás alapja	Súlyosság	Előfordulás	Eredő beavatkozás	RPN
Függvény	normális $m_1 = 4; \sigma_1 = 1,5$	normális $m_1 = 6; \sigma_1 = 1,5$		Geometriai átlag
Kritikus érték	4	7	A „VAGY” kapcsolatok „igaz” értéke	5
A beavatkozás valószínűsége analitikusan	0,37	0,16	0,47	0,38
A beavatkozás valószínűsége szimulációval	0,37	0,16	0,47	0,38

Összefoglalva megállapítható, hogy a Monte-Carlo-szimuláció hasznos eszköz lehet egy kockázatkezelési rendszerben a várható beavatkozások előrejelzésére. Két összetevőre a valószínűségek még analitikusan könnyen számíthatók, ezekkel a szimulációs modellt verifikáltuk, ahogyan az a táblázatokban látható.

4.2. Beavatkozási esetek aggregálása

A szükséges beavatkozásokra történő figyelmeztetések aggregálására is sor kerülhet. Tekintettel arra, hogy a figyelmeztetés kiváltása egy logikai értéken alapul, ez az aggregálás valamilyen logikai függvénnyel történik. Már az előző pél-

dában szereplő „VAGY” logikai kapcsolat is ilyennek tekinthető. Elsősorban területi, szervezeti aggregálás során történik ilyen. Néhány példa:

- Egy folyamatot felül kell vizsgálni, ha a részfolyamatoknál a figyelmeztetések száma egy adott érték felett van.
- A terméket vagy folyamatot át kell tervezni, ha a kockázati értékek nagy arányban megközelítik a beavatkozási határokat.
- A kockázatértékelési rendszert – azon belül az aggregálófüggvényt, a beavatkozási határokat – felül kell vizsgálni, ha túl sok ellentmondás adódik az összetevőnkénti és az eredő alapján történő döntéshozatalnál.

Mindkét esetben (4.1. és 4.2. fejezet) lehet vizsgálni a figyelmeztetések valószínűségeit, valamint elemezni a beavatkozási határtól vett távolságokat is. Ezek a rendszerben lévő kockázati tartalékra utalnak. Fontos megjegyezni azonban, hogy ezek nem a tényleges tartalékot jelentik, hanem a saját megítélésen alapuló beavatkozási szintekhez kapcsolódókat. A beavatkozási határok mellett olyan (cél)értékek is definiálhatók, amelyeket a szervezetben kitűznek. Célszerűen ezek nem nagyobbak, mint a beavatkozási határok. A tényleges kockázati értékek – legyenek azok összetevők vagy eredők – távolsága a kitűzött céltől fontos lehet. Az ilyen, célérték távolságához kapcsolatos elemzésekre mutatunk példát a következő fejezetben.

5. Következtetések

A tanulmány *elméleti eredményei* négy területen foglalhatók össze. Az aggregálással kapcsolatban a TREF-módszer egy aggregálási protokollt használ (*Kosztján et al., 2020*), amelyet rekurzívan alkalmazva az aggregálás különböző kockázatértékelési szinteken (például összetevő, hatás, mód, folyamat és szervezet) elvégezhető. Ezt továbbfejlesztve, a TREF2-módszer kapcsán azt vizsgáltuk, hogy a különböző esetekben melyik aggregálási függvényt érdemes használni. Öt gyakran használt aggregálófüggvényt mutattunk be és értékeltünk a függvényekkel szemben támasztott elvárások elemzése alapján, amelyek közül a felhasználó a körülményekhez igazodva választhat. Az aggregálásra javaslatokat mutattunk be mind az összetevők szintjén, mind pedig területi, illetve szervezeti szinten. Bemutattuk, hogy háromnál több összetevőnél az FMEA által használt szorzást nem célszerű használni, mert alulértékeli a kockázatokat. Az aggregálási szempontokra vonatkozóan több javaslatot is megfogalmaztunk. Megállapítottuk például, hogy a szimmetria teljesülése leginkább a medián módszer használatával valósul meg.

A linearitás szempontjából az aritmetikai átlag, a medián és a geometriai átlag képezi le legjobban az eredő értéket; a gyakorlatban leginkább alkalmazott szorzat pedig a legrosszabb ebből a szempontból. A TREF-módszer egy hierarchikus beavatkozásra figyelmeztetőrendszerrel rendelkezik (Kosztján *et al.*, 2020), figyelmeztetéseket lehet tenni az egyedi összetevők és az aggregált értékek alapján egyidejűleg. A figyelmeztetőrendszert a TREF2-módszer teljesebbé tette, így a figyelmeztetések is aggregálhatók logikai függvények használatával. A kidolgozott Monte-Carlo-szimuláció lehetővé teszi a kockázatkezelési rendszerben a várható beavatkozások előrejelzését (főleg 2-nél több összetevőnél), illetve az összetevők kezelését az összetevők függőségi kapcsolata esetén is. Megállapítottuk, hogy a kockázatkezelésre is igaz a folyamatmenedzsment általános szórás-csökkenési törekvése (Mapes *et al.*, 2000), miszerint kisebb veszteséggel lehet működtetni egy rendszert, ha a szórások kicsik. A TREF2-módszer további fontos új eleme a metaháló-struktúra, amely lehetővé teszi az aggregálás, a figyelmeztetőrendszer és a célkitűzések komplex kezelését. A metaháló-struktúra segítségével a TREF2 képes mind az összetevők, mind pedig az aggregálás különböző szintjeiről (hatások, módok, folyamatok, szervezet) átfogó figyelmeztető jelzést adni. Mindezek mellett a módszer képes a kapcsolatok modellezésére független, egyirányú és kölcsönös esetben is. A metaháló jellegből adódóan, ha a kockázati összetevőkre vagy az eredőre beavatkozási határt írunk elő, akkor meghatározható a figyelmeztetések valószínűsége, a célértéktől való lemaradás, illetve a biztonsági tartalék mértéke is.

Gyakorlati alkalmazhatóság szempontjából a tanulmány két fontos eredménnyel szolgál. Egyrészt a TREF2 egységes keretrendszere lehetővé teszi a kockázatok és a kockázatkezelés rendszerszintű integrációját. Egy ilyen rendszerben integráltan jelennek meg a kockázatkezeléssel kapcsolatos érdekelték céljai, ezek elérése, a szervezeti hierarchia (az operátori folyamatoktól az ügyvezető igazgató folyamatáig), az értéklánc (a beérkezéstől a kiszállításig), a törvényi követelmények és a vizsgálati területek (például minőségirányítás, környezetirányítás, egészségvédelem és biztonság) teljes vertikumból adódó egyedi és eredő kockázatok nyomon követése és szabályozása. Ezáltal a vállalatoknál jelenleg működő, szigetmegoldásokra épülő kockázatkezelést felválthatja az egységes, összefüggő, integrált működtetés. Másrészt a tanulmányban ajánlást adtunk arra vonatkozóan is, hogy a különböző esetekben milyen aggregálást érdemes követni. Ehhez kapcsolódóan kiemeljük, hogy értékelési szempontjainkat figyelembe véve a geometriai átlag a legelőnyösebb módszer a gyakorlati alkalmazhatóság szempontjából.

A *jövőbeli kutatások* során célszerű lesz megvizsgálni az aggregálófüggvényeket specifikusan a különböző döntésekhez kapcsolódóan. A területek, folyamatok kockázati rangsorolásához például a jelen tanulmány alapjául szolgáló kutatás során nem vizsgáltuk a kvantiliseket, speciálisan a maximumokat. Nem

vizsgáltuk a súlyozás hatásait sem. Alsó szinten az összetevők súlyozása már a TREF-ben megvalósult. A hierarchiaszintek közötti és a területenkénti súlyozott aggregáláshoz ki kell dolgozni a súlyozás elvi megfontolásait. Következő tanulmányunkban megvizsgáljuk a már korábban megvalósított, közvetlen és AHP-n alapuló súlyozási módszerek alkalmazhatóságát, valamint a súlyozást figyelembe vevő aggregálófüggvények jellemzőit.

Irodalom

- Azadeh-Fard, N. – Schuh, A. – Rashedi, E. – Camelio, J. A. (2015): Risk assessment of occupational injuries using Accident Severity Grade. *Safety Science*. Vol. 76. pp. 160–167.
doi:10.1016/j.ssci.2015.03.002
- Bognár F. – Hegedűs C. (2022): Analysis and Consequences on Some Aggregation Functions of PRISM (Partial Risk Map) Risk Assessment Method. *Mathematics*. 10(5), 676.
<https://doi.org/10.3390/math10050676>
- Bognár F. – Kosztyán Zs. T. – Kiss J. – Gáspár M. (2011): Karbantartási folyamatok tervezése, mint többtényezős döntési probléma. In: *XXIII. Nemzetközi Karbantartási Konferencia*. 191–204. old.
- Browning, T. R. (2016): Design Structure Matrix Extensions and Innovations: A Survey and New Opportunities. *IEEE Transactions on Engineering Management*. Vol. 63. pp. 27–52.
doi:10.1109/TEM.2015.2491283
- Browning, T. R. (2014): Managing complex project process models with a process architecture framework. *International Journal of Project Management*. Vol. 32. pp. 229–241.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.05.008>
- Calvo, T. – Kolesárová, A. – Komorníková, M. – Mesiar, R. (2002): Aggregation Operators: Properties, Classes and Construction Methods. In: *Aggregation Operators*. Physica-Verlag HD. pp. 3–104. https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1787-4_1
- Fattahi, R. – Khalilzadeh, M. (2018): Risk evaluation using a novel hybrid method based on FMEA, extended MULTIMOORA, and AHP methods under fuzzy environment. *Safety Science*. Vol. 102. pp. 290–300. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.018>
- Gauthier, F. – Chinniah, Y. – Burlet-Vienney, D. – Aucourt, B. – Larouche, S. (2018): Risk assessment in safety of machinery: Impact of construction flaws in risk estimation parameters. *Safety Science*. Vol. 109. pp. 421–433. doi:10.1016/j.ssci.2018.06.024
- Grabisch, M. – Marichal, J.-L. – Mesiar, R. – Pap, E. (2011): Aggregation functions: Means. *Information Sciences*. Vol. 181. pp. 1–22. doi:10.1016/j.ins.2010.08.043
- Grabisch, M. – Marichal, J.-L. – Mesiar, R. – Pap, E. (2009): *Aggregation Functions, Encyclopedia of Mathematics and its Applications*. Cambridge University Press.
- Ilangkumaran, M. – Karthikeyan, M. – Ramachandran, T. – Boopathiraja, M. – Kirubakaran, B. (2015): Risk analysis and warning rate of hot environment for foundry industry using hybrid MCDM technique. *Safety Science*. Vol. 72. pp. 133–143. doi:10.1016/j.ssci.2014.08.011

- Kalantarnia, M. – Khan, F. – Hawboldt, K. (2009): Dynamic risk assessment using failure assessment and Bayesian theory. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 22. pp. 600–606. doi:10.1016/j.jlp.2009.04.006
- Karasan, A. – Ilbahar, E. – Cebi, S. – Kahraman, C. (2018): A new risk assessment approach: Safety and Critical Effect Analysis (SCEA) and its extension with Pythagorean fuzzy sets. *Safety Science* Vol. 108. pp. 173–187. doi:10.1016/j.ssci.2018.04.031
- Khan, F. – Rathnayaka, S. – Ahmed, S. (2015): Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future. *Process Safety and Environmental Protection*. Vol. 98. pp. 116–147. doi:10.1016/j.psep.2015.07.005
- Kinney, G. F. – Wiruth, A. D. (1976): Practical risk analysis for safety management. *Technical Report*. Naval Weapons Center China Lake CA pp. 1–21.
- Knight, F. H. (1921): *Risk, uncertainty and profit*. Houghton Mifflin.
- Kokangül, A. – Polat, U. – Dağsuyu, C. (2017): A new approximation for risk assessment using the AHP and Fine Kinney methodologies. *Safety Science*. Vol. 91. pp. 24–32. doi:10.1016/j.ssci.2016.07.015
- Kolesárová, A. – Mesiar, R. (2015): On linear and quadratic constructions of aggregation functions. *Fuzzy Sets and Systems*. Vol. 268. pp. 1–14. doi:10.1016/j.fss.2014.04.015
- Kosztján Z. T. (2018): Serviceability of large-Scale systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*. Vol. 84. pp. 222–231.
- Kosztján Z. T. – Csizmadia T. – Kovács Z. – Mihálcz I. (2020): Total risk evaluation framework. *International Journal of Quality & Reliability Management*. Vol. 37. pp. 575–608. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-05-2019-0167>
- Kosztján Z. T. – Pribojszki-Németh A. – Szalkai I. (2019): Hybrid multimode resource-constrained maintenance project scheduling problem. *Operations Research Perspectives*. Vol. 6. pp. 100–129.
- Kosztján Z. T. – Pribojszki-Németh A. – Szalkai I. – Kovács Z. (2016): Karbantartási projektek mátrix alapú tervezése. *Alkalmazott matematikai lapok*. 33. évf. 27–56. old.
- Kovács Z. – Kosztján Zs. T. – Csizmadia, T. (2014): TREF – Total Risk Evaluation Framework: integrált kockázatmenedzsment-szemléletű keretrendszer kifejlesztése és bevezetése egy magyarországi termelő vállalatnál. *Vezetéstudomány / Budapest Management Review*. 45. évf. 71–82. old.
- Kutlu, A. C. – Ekmekçioğlu, M. (2012): Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy TOPSIS-based fuzzy AHP. *Expert Systems with Applications*. Vol. 39. pp. 61–67. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2011.06.044
- Liu, H.-C. – Liu, L. – Liu, N. (2013): Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert Systems with Applications*. Vol. 40. pp. 828–838. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.010>
- Mackenzie, C. A. (2014): Summarizing Risk Using Risk Measures and Risk Indices. *Risk Analysis*. Vol. 34. pp. 2143–2162. doi:10.1111/risa.12220
- Maheswaran, K. – Loganathan, T. (2013): A Novel Approach for Prioritization of Failure modes in FMEA using MCDM. *International Journal of Engineering Research and Applications*. Vol. 3. pp. 733–739.

- Malekitabar, H. – Ardeshir, A. – Sebt, M. H. – Stouffs, R. – Teo, E. A. L. (2018): On the calculus of risk in construction projects: Contradictory theories and a rationalized approach. *Safety Science*. Vol. 101. pp. 72–85. doi:10.1016/j.ssci.2017.08.014
- Mapes, J. – Szwejcowski, M. – New, C. (2000): Process variability and its effect on plant performance. *International Journal of Operations & Production Management*. pp. 792–808.
- Marichal, J.-L. – Mesiar, R. (2009): Meaningful aggregation functions mapping ordinal scales into an ordinal scale: a state of the art. *Aequationes mathematicae*. Vol. 77. pp. 207–236. doi:10.1007/s00010-009-2961-2
- Merrick, J. R. W. – Dorp, J. R. – Van Singh, A. (2005): Analysis of Correlated Expert Judgments from Extended Pairwise Comparisons. *Decision Analysis*. Vol. 2. pp. 17–29. doi:10.1287/deca.1050.0031
- Ni, H. – Chen, A. – Chen, N. (2010): Some extensions on risk matrix approach. *Safety Science*. Vol. 48. pp. 1269–1278. doi:10.1016/j.ssci.2010.04.005
- Øien, K. – Utne, I. B. – Herrera, I. A. (2011): Building Safety indicators: Part 1 – Theoretical foundation. *Safety Science*. Vol. 49. pp. 148–161. doi:10.1016/j.ssci.2010.05.012
- Petrović, D. V. – Tanasijević, M. – Milić, V. – Lilić, N. – Stojadinović, S. – Svrkota, I. (2014): Risk assessment model of mining equipment failure based on fuzzy logic. *Expert Systems with Applications*. Vol. 41. pp. 8157–8164. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2014.06.042>
- Pitard, F. F. (2019): *Theory of Sampling and Sampling Practice*. Taylor & Francis Group, LLC. doi:10.1201/9781351105934
- Renn, O. (1998): The role of risk perception for risk management. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 59. pp. 49–62. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(97\)00119-1](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(97)00119-1)
- Tay, K. M. – Lim, C. P. (2006): Fuzzy FMEA with a guided rules reduction system for prioritization of failures. *International Journal of Quality & Reliability Management*. Vol. 23. pp. 1047–1066. doi:10.1108/02656710610688202
- Temesi J. (2017): Páros összehasonlítási mátrixok elemeinek interaktív meghatározása verbális skála esetén. *Sigma*. 48. évf. 111–131. old.
- Vasvári T. (2015): Kockázat, kockázateszlelés, kockázatkezelés – szakirodalmi áttekintés. *Pénzügyi Szemle*. 60. évf. 29–48. old.
- VDA & AIAG (2019): AIAG & VDA FMEA Handbook. Automotive Industry Action Group, rank3.
- Wang, T. – Gao, S. – Li, X. – Ning, X. (2018): A Meta-network-based Risk Evaluation and Control Method for Industrialized Building Construction Projects. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 205. pp. 552–564. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.127>
- Wang, Y.-M. – Chin, K.-S. – Poon, G. K. K. – Yang, J.-B. (2009): Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean. *Expert Systems with Applications*. Vol. 36. pp. 1195–1207. doi:10.1016/j.eswa.2007.11.028
- Zheng, G. – Zhu, N. – Tian, Z. – Chen, Y. – Sun, B. (2012): Application of a trapezoidal fuzzy AHP method for work safety evaluation and early warning rating of hot and humid environments. *Safety Science*. Vol. 50. pp. 228–239. doi:10.1016/j.ssci.2011.08.042
- Zotteri, G. – Kalchschmidt, M. – Caniato, F. (2005): The impact of aggregation level on forecasting performance. *International Journal of Production Economics*. Vol. 93–94. pp. 479–491. doi:10.1016/j.ijpe.2004.06.044