

ációs  
regációs

függvények  
függvények

értékelése4.217Az

agg-  
értékeléssubsection.4.2



Pannon Egyetem

Gazdálkodás- és Szervezéstudományok Doktori Iskola

Tézisgyűjtemény

## **Beszállítói hálózatok kockázatelemzése**

Készítette:

Mihálcz István

Témavezető:

Prof. Dr. habil. Kosztyán Zsolt Tibor

2024. június 3.

## 1. Bevezetés

Összekapcsolt, globalizált világunkban az ellátási láncok döntő szerepet játszanak, és nemcsak a vállalkozásokra, hanem a mindennapi polgárokra is hatással vannak. Az olyan katasztrófák, mint a földrengések, árvizek és tüzek megszakíthatják az ellátási láncokat, és világszerte hatással lehetnek a termékekre és szolgáltatásokra. A kockázatelemzés és -kezelés alapvető fontosságú a veszélyek mérsékléséhez, beleértve a külső eseményeket, mint például a természeti katasztrófák, kibertámadások és járványok; vagy a belső eseményeket, mint például az anyagmozgatás, tárolás, beérkezési folyamat, beérkezési ellenőrzés, címkézés, kommissiózás, szállítás a gyártási területre stb. A szervezeteknek meg kell érteniük e kockázatok következményeit ahhoz, hogy megőrizzék ellátási láncuk stabilitását és rugalmasságát ([Yacob Khojasteh](#); [Geske](#); [Henke](#); [Huang et al., 2020](#)).

Jelentős kockázatot/kihívást jelentenek azok a Tier 1 vagy Tier2 beszállítók, melyek az ellátási láncukat saját tulajdonúnak tekintik, és ezzel korlátozzák az abba való betekintést. E kihívások ellenére az azonosított kockázatok szisztematikusan kezelhetők. Figyelembe kell venni a beszállítók alapos értékelését auditok révén, valamint annak kockázatát, hogy a beszállítók pontatlanul értékelik saját magukat. A disszertáció célja egy felhasználóbarát kockázatértékelési eszköz létrehozása volt az ellátási lánc döntéshozói számára. A tanulmány a hibamód- és hatáselemzés (FMEA) kihívásaira összpontosít, feltárja a kockázati tényezők megfelelő számát, és hangsúlyozza az osztályokon és irányítási rendszereken átívelő kockázatelőrejelző rendszerek megvalósítását.

## 2. Kutatási célkitűzések és kutatási kérdések

Dolgozatomban olyan módszertan kidolgozását és bemutatását tűztem ki célul, amely különösen az ellátási láncok számára lehetővé teszi egy hatékonyabb kockázatelemzési módszertan kidolgozását, amely segíthet nekik a potenciális kockázat egyszerű megállapításában. Ezzel kapcsolatban a

kutatási kérdéseimet a következőképpen fogalmaztam meg:

**K.1. Milyen módon lehetegy ellátási láncokra szabott kockázatkezelési keretrendszert kialakítani, amely a meglévő kockázatékelő rendszereknél egyszerűbb és pontosabb becslést kínál?**

A szakirodalomban ismertetett módszerek a kockázat szintjét előre meghatározott tényezők alapján határozzák meg. A szerzők különböző egyedi aggregációs függvényeket használnak, azonban hiányzik az optimális aggregációs kockázati függvény vagy keretrendszer elemzése, valamint a korábban nem vizsgált kombinációk alkalmazásának lehetősége. Céлом egy olyan átfogó kockázatértékelési rendszer létrehozása, amely képes a bizonytalan kockázati elemek kezelésére.

**K.2. Az ellátási láncban a kockázatokat több területre/tartományra vonatkozóan kell feltérképezni és megbecsülni. Milyen módszerrel lehet ezeket a riasztási szinteket összehozni?**

Az előrejelzések döntő fontosságúak a kockázatok értékelésében. Számos erőfeszítés történt a kockázatértékelési előrejelzési rendszer fejlesztésére. A szakirodalomban létező módszerek nem veszik figyelembe a több szintről - például a tényező, a hatás, a mód és a folyamat - eredő figyelmeztető eseményeket. Ezek a módszerek nem adnak konkrét figyelmeztetési kritériumokat minden egyes kockázati tényezőre külön-külön minden egyes szinten. A cél egy többszintű figyelmeztető rendszer létrehozása volt, amely integrálható a korábban jelzett átfogó kockázatértékelési keretrendszerbe.

**K.3. Melyik aggregációs módszer a legoptimálisabb az ellátási lánc számára?**

Bár a kockázatokról számos publikáció létezik, csak kevés elemzi kifejezetten az ellátási lánc kockázatait. Ennek elsődleges oka a kockázatértékelési rendszer - például a hibamód- és hatáselemzés (FMEA) - megfelelő végrehajtásának megértésében mutatkozó hiányosság, amelyet az ellátási lánc menedzsmentben (SCM) széles körben alkalmaznak az ellátási láncban. Erre a célra egyszerű módszertant kell kidolgozni, felhasználva a korábban

jelzett univerzális kockázatértékelési keretrendszert.

### 3. Szakirodalmi áttekintés és kutatási feltételezések

A következőkben azokat a tudományos eredményeket emelem ki, amelyek alapján kutatási feltevéseimet megfogalmaztam.

A kockázatelemzésben vagy a használt módszerekben a szerzők a kockázati tényezők (Liu et al., 2013a) korlátozottan meghatározott számú kockázati tényezőt használnak. Emellett a szakirodalmi vizsgálat során látható, hogy a szerzők kockázati tényezőkkel számolnak, mivel azok függetlenek (Liu et al., 2013a). Az új kockázati tényezők figyelmen kívül hagyásának egyik lehetséges oka az, hogy el kell ismerni azok kölcsönös függőségét. Ezek a problémák olyan innovatív megoldásokat igényelnek, amelyek hatékonyan képesek kezelni a kockázati változók kölcsönös függőségét és a korlátlan számú kockázati tényezőt. A szakirodalomban általában előre meghatározott, azonos faktorszámú skálákat használnak.

A kockázataggregáció fontos szerepet játszik a különböző kockázatértékelési folyamatokban (Bani-Mustafa et al., 2020; Bjørnsen and Aven, 2019). Az aggregáció olyan módszernek tekinthető, amely numerikus értékek listáját egyetlen reprezentatív értékke egyesíti (Pedraza and Rodríguez-López, 2020, 2021). Hagyományosan a kockázati értéket a kockázati összetevők meghatározott száma alapján számítják ki. A hibamód- és hatáselemzés (FMEA), amely egy széles körben használt kockázatértékelési módszer, három kockázati komponenst tartalmaz: az előfordulást (O), az észlelhetőséget (D) és a súlyosságot (S) (Fattahi and Khalilzadeh, 2018; Liu et al., 2013b; Spreafico et al., 2017). Huang et al. (2020) szerint az elmúlt 20 év kulcsszavas elemzése vagy a kockázatokkal kapcsolatos szakirodalom megerősíti, hogy az FMEA továbbra is a leggyakrabban használt eszköz a kockázatok értékelésére.

Az FMEA hiányosságait több szerző is bemutatta Liu et al. (2013a); Lolli

et al. (2015); Malekitabar et al. (2018); Wu and Wu (2021). Összefoglalójuk az alábbi táblázatban látható (Táblázat 1).

1. táblázat. A hegyományos FMEA hiányosságai (Wu and Wu (2021) alapján), és összehasonlítás az új FMEA-val (2019).

A hagyományos FMEA hiányosságai	Fejlesztések és reprezentatív cikkek	Összehasonlítás az új FMEA-val
<p>1. Az O, S és D közötti relatív jelentőséget nem vették figyelembe. Feltételezhető, hogy ez a három tényező azonos fontosságú, de ez nem biztos, hogy így van, ha az FMEA gyakorlati alkalmazását vesszük figyelembe.</p> <p>2. A különböző O, S és D értékelési szintek pontosan ugyanazokat az RPN-értékeket eredményezhetik, de ezek kockázati következményeik teljesen eltérőek lehetnek. Ez a probléma erőforrás- és időpazarláshoz vezethet, vagy bizonyos esetekben a nagy kockázatú meghibásodási módok nem voltak széles körben ismertek.</p> <p>3. Az RPN-számítás csak három kockázati tényezőt vesz figyelembe, elsősorban a biztonságot autópálya esetén, és figyelmen kívül hagy más fontos tényezőket, például a minőséget és a költségeket.</p> <p>4. Az RPN megközelítés nem veszi figyelembe a hibamódok közötti közvetlen/közvetett kapcsolatot, és hibás a sok alrendszer és elemet tartalmazó rendszerek esetében. Ha egy meghibásodás több más meghibásodási módot is okoz, az adott meghibásodást a korrekciós intézkedéseknél prioritásként kell kezelni.</p> <p>5. Az O, S és D három kockázati tényezőt diszkrét ordinális skálán értékelik. A szorzásnak azonban nincs értelme az ordinális skálán. Így a kapott eredmények nemcsak értelmetlenek, hanem valójában félrevezetőek is.</p> <p>6. A három kockázati tényezőt gyakran nehéz pontosan meghatározni. Az FMEA-csapat tagjai gyakran különböző típusú értékelési információkat szolgáltatnak ugyanarra a kockázati tényezőre vonatkozóan, és az értékelési információk egy része pontatlan, bizonytalan és hiányos lehet az időkorlátok, a tapasztalatlanság és az elégtelen adatok miatt.</p> <p>7. Az RPN kiszámításához használt matematikai forma nagyon érzékeny a kockázati tényezők értékelésének változásaira.</p> <p>8. A kockázati szint három összetevőjének minősítési átmenetei eltérőek. Az O1 és az O2 valószínűségi táblázata közötti kapcsolat nem lineáris, míg a D(S1) és a D(S2) valószínűségi táblázata közötti kapcsolat lineáris.</p> <p>9. Az RPN-ek eredményei diszkréttek, és sok a lyuk főleg a felső harmadban.</p>	<p>A három tényezőhöz különböző súlyozási módszereket, például OWA [20], IFWA [21], BWM [22] és FWE [23] alapján rendelünk súlyokat.</p> <p>A faktorok súlyozásának bevezetése csökkenti és lehet, hogy kiküszöböli a különböző meghibásodási módok azonos RPN-eredményei által okozott zavart.</p> <p>A költség [4], a minőség [7] és egyéb tényezők [24] hozzáadódnak az RPN-értékelés elméleti alapjainak javítása érdekében.</p> <p>Az FTA [25], a Bayes-hálózat [16] és más módszerek a különböző hibák kölcsönhatásainak és kapcsolatainak bemutatására szolgálnak.</p> <p>Kevés cikk tárgyalja az ordinális skála és a szorzás kérdéseit. Alternatívaként a hibamódok közvetlen prioritálására olyan MCDM-módszereket használnak, mint a TOPSIS [26] és a DEMATEL [27].</p> <p>Többféle bizonytalansági értékelési módszereket vezettek be, például a fuzzy elméletet, a durva elméletet, az evidenciaelméletet és a valószínűségelméletet az FMEA-elemzésbe (lásd a 2.2. szakaszt).</p> <p>Néhány cikk tárgyalja ezt a kérdést</p> <p>Néhány cikk tárgyalja ezt a kérdést</p> <p>Néhány cikk tárgyalja ezt a kérdést</p>	<p>Megoldás az AP (cselekvési prioritás) szint mátrix bevezetésével, a tényezők kockázati szintje alapján</p> <p>Az RPN helyette AP szintek (Alacsony, Közepes, Magas) jelennek meg.</p> <p>Nem javult, még mindig csak 3 tényezőt vesz figyelembe (O, S és D).</p> <p>Az AP szintek egy kicsit jobbakk, de a H szint korrekciós intézkedést igényel, az M szint vagy korrekciós intézkedést vagy indoklást igényel, hogy miért nincs szükség semmilyen intézkedésre, az L azt jelenti, hogy nincs szükség semmilyen intézkedésre.</p> <p>Továbbra sem javult</p> <p>Továbbra sem javult</p> <p>Továbbra sem javult</p> <p>Továbbra sem javult</p> <p>RPN helyett 3 szintet használnak, ami soknem teszi lehetővé az összehasonlítást</p>

2019-ben jelent meg az új FMEA (AIAG), az AIAG-VDA FMEA 1. kiadása.

Változások:

- Az RPN (Risk Priority Number) megszűnt, és helyébe a kapcsolódó táblázatban meghatározott Action Priority szint lépett,
- Hétlépéses megközelítés alkalmazása (tervezés, struktúraelemzés, funkcióelemzés, hibaelemzés, kockázatelemzés, optimalizálás és az eredmények dokumentálása),
- Az FMEA hatékonyságának és eredményességének mérésére szolgáló mérőeszköz használata,

- Nagyobb hangsúlyt fektet a hibabiztosságra,
- Új fejezet jelenik meg: Monitoring és rendszerre adott válaszok.

Sajnálatos módon az AP bevezetése nem használható a kockázati szintek összehasonlítására, mivel nem megfelelő a három szintre való „tömörítés”. Ezért az RPN-nek megfelelő numerikus vagy ordinális ábrázolásra van szükség ahhoz, hogy a kockázatértékelőket segítse abban, hogy megértsék, mely veszélyek jelentősek.

A kockázatok összesítésére számos módszert és elemzést javasoltak. Az FMEA egyik legfrissebb, [Liu et al. \(2013a\)](#) által végzett áttekintéséből megállapítható, hogy a fuzzy szabályalapú rendszer a legnépszerűbb módszer a hibamódok rangsorolására. A fuzzy szabályalapú FMEA megközelítés nyelvi változókat használ a rendszerben előforduló meghibásodások rangsorolására, hogy a meghibásodás súlyosságát, felismerését és előfordulását a meghibásodás kockázatosságaként írja le ([Tay and Lim, 2006](#); [Petrović et al., 2014](#); [Bowles and Peláez, 1995](#); [Cardiel-Ortega and Baeza-Serrato](#)). A szerzők különböző szinguláris aggregációs függvényeket alkalmaznak, de elemzés a legjobb aggregációs kockázati függvényről, vagy egy keretrendszerrel, hogy van-e lehetőség erre, korábban nem került bemutatásra.

Ezek alapján fogalmaztam meg az első feltételezésemet.

**F.1. A hagyományosan alkalmazott háromfaktoros kockázatelemző rendszerek (pl. FMEA) kevésbé pontos kockázatbecslést eredményeznek, mint a többtényezős rendszerek. A faktorok számának növelésével (3-nál nagyobb), azok gondos kiválasztásával pontosabb kockázatbecslés érhető el.**

A figyelmeztetések/előjelzések létfontosságú szerepet játszanak a kockázatértékelésben ([Khan et al., 2015](#); [Øien et al., 2011](#)). A hagyományos kockázatértékelés hátránya, hogy szigorú ([Kalantarnia et al., 2009](#)), ismételten egyetlen indexet ([Zheng et al., 2012](#)) vagy a figyelmeztető mutatók listáját ([Øien et al., 2011](#)) fogad el a figyelmeztető események jelzésére, és nem képes megragadni a ténylegesen fontos hibákat. Számos erőfeszítés történt a kockázatértékelés figyelmeztető/előjelző rendszerének

kifejlesztésére. [Ilangkumaran et al. \(2015\)](#) egy hibrid technikát javasolt ([Liu et al., 2015](#); [Panchal et al., 2019](#)) a munkabiztonság értékelésére forró környezetben, előrejelző értékelést és egy biztonsági szintet vezet be a kockázati tényező szintjén. [Øien et al. \(2011\)](#) olyan kockázati mutatókat dolgozott ki, amelyek figyelmeztetést adhatnak a lehetséges súlyos balesetekre. [Zheng et al. \(2012\)](#) a forró és nedves környezetekre vonatkozó korai figyelmeztető/előrejelző rendszert javasolt, amely biztonsági indexeket számol a tényezők és altényezők szintjén. Ezenkívül [Xu et al. \(2002\)](#) a figyelmeztetések két szintjét javasolta. A tudományos irodalomban a kockázati hierarchia esetenként keveredik a kockázati szinttel; például [Chen et al. \(2012\)](#); [Manuele \(2005\)](#) a cselekvési szinteket kockázati hierarchiaként használja, és nem használ valódi hierarchiaszinteket.

[Liu et al. \(2013a\)](#); [Shaker et al. \(2019\)](#) arra a következtetésre jutnak, hogy a kockázatértékelésben objektív és kombinált súlyozási módszereket kell alkalmazni, mivel ezek objektíven, döntéshozók nélkül értékelik a relatív fontosságot.

Az olyan területek, mint az egészség és biztonság, a minőség vagy a környezet különböző súlyokkal vehetők figyelembe a kockázatértékelésben. Összefoglalva, a prioritások és az igények területenként eltérőek lehetnek, ami rugalmas kockázat-összevonást tesz szükségessé. Ahogy [Kanes et al. \(2017\)](#) megállapította, fontos a rugalmas kockázatértékelés területére összpontosítani, mint a jelenlegi kockázatértékelési módszertanok javításának útjára. O’Keeffe és csapata is hangsúlyozta, hogy a kockázatértékelési folyamatnak inkább rekurzívnak, mint lineárisnak, inkább rugalmasnak, mint merevnek, és pluralistának, mint binárisnak kell lennie ([O’Keeffe et al., 2015](#)).

Ez az összefoglaló azt mutatja, hogy a szakirodalomban kidolgozott módszerek nem foglalkoznak a több szintről, például a faktor, a hatás, a mód és a folyamat szintjéről származó figyelmeztető eseményekkel, hogy minden egyes kockázati tényezőre külön-külön, minden szinten egyedi figyelmeztető szabályokat határozzanak meg.

## **F.2. A tartományonkénti riasztási/figyelmeztetési határértékek**



pontosabb képet adnak a vezetésnek vagy a személyzetnek a potenciális kockázatokról, mivel azok összemosódnak a többi értékkel, ha egy halmazban csak egyszer fordulnak elő. Kiemelésükkel és határértékkel történő hozzárendelésükkel a vezetőség tudatosíthatja jelentőségüket és hatásukat.

Az ellátási lánc kockázati tényezői jelentősen befolyásolhatják egy vállalat működését és általános teljesítményét (Zhao et al.). Több szerző (Sime Curkovic, 2013; Wagner, 2016; Vodenicharova, 2017) megvizsgálta az FMEA és más kockázatelemzési módszerek korlátozott alkalmazásának okait az ellátási láncban. A kutatók elemzést végeztek, és sikeresen azonosították a fő tényezőket: úgy tűnik, hogy a szélesebb körű elterjedést akadályozó fő nehézség abból adódik, hogy nem értik, hogyan kell az FMEA-t alkalmazni az ellátási lánc környezetben. Jelenleg nem létezik egy alkalmas, funkcionális és könnyen alkalmazható eszköz az ellátási hálózatok kockázatértékelésének elvégzésére. A fent említett tevékenységeket és az ellátási láncra hatást gyakorló globális fejleményeket figyelembe véve elengedhetetlen, hogy az ellátási lánc vezetői és a kockázatelemzők könnyen hozzáférjenek egy egyszerű kockázatértékelő eszközhöz.

Fang et al. irodalmi áttekintése nagyon érdekes, mert bibliometriai kulcsszóelemzést végeztek 14723, 2010 és 2020 között megjelent beszállítói hálózatok vezetéséhez kapcsolódó publikáción, hogy megvizsgálják a szerzők elsődleges szempontjait és a kutatási trendeket. Az eredmény a 2 táblázatban látható.

No.	Keywords	Number	Ratio
1	Supply chain (management)	4112	27.9%
2	Sustainable development/(environmental) sustainability	823	5.6%
3	Green supply chain (management)	423	2.9%
4	Sustainable supply chain (management)	363	2.5%
5	Systematic literature review	286	1.9%
6	Game theory	252	1.7%
7	Performance/performance management	230	1.6%
8	Inventory/inventory management	209	1.4%
9	Collaboration/coordination	194	1.3%
10	Logistics	192	1.3%
11	Case study	183	1.2%
12	Supplier selection	176	1.2%
13	Structural equation modeling	149	1.0%
14	Risk management	145	1.0%
15	Reverse logistics	133	0.9%
Total publications checked (Web of Science, 2010-2020)		14723	

2. táblázat. A Web of Science kulcsszóelemzése 2010-2020 között, a [Fang et al.](#) adatai alapján

Amint az a 2 táblázatból kiderül, a kockázatértékelés a kiadványon rangsorát tekintve csupán a tizennegyedik helyen áll.

Több szerző ([Sime Curkovic, 2013](#); [Wagner, 2016](#); [Vodenicharova, 2017](#)) vizsgálta az FMEA és más kockázatelemzési módszerek korlátozott alkalmazásának okait az ellátási láncban. A kutatók elemzést végeztek, és sikeresen azonosították a fő tényezőket: úgy tűnik, hogy a szélesebb körű elterjedést akadályozó fő nehézség abból adódik, hogy a beszállítói lánc vezetésével foglalkozó vezetők/döntéshozók nem értik, hogyan kell az FMEA-t vagy más kockázatértékelő keretrendszert alkalmazni az ellátási lánc környezetben.

A meglévő kutatási eredményekből arra lehet következtetni, hogy az ellátási láncok iparágában olyan kockázatelemzési módszereket alkalmaznak, amelyek nagyban hasonlítanak a más területeken alkalmazott módszerekhez. A szerzők leggyakrabban az FMEA ([Ewa Kulinska and Dendera-Gruszka, 2021](#); [Ebadi et al., 2020](#); [Indrasari et al., 2021](#)) értékelési technikát alkalmazzák, vagy az FMEA módosított változatait, amelyben a tényezők 10 helyett 5 szintre korlátozódnak ([Aleksic et al., 2020](#)). Alternatívaként egyes értékelési technikákat alkalmaznak, mint például a Fuzzy-FMEA ([Mustaniroh et al., 2020](#); [Trenngonowati et al., 2021](#); [Lu Lu and de Souza,](#)

2018; Wu and Wu, 2021; Petrović et al., 2014), Fuzzy-AHP Trenggonowati et al. (2020); Canbakis et al. (2018), FMEA-ANP (Zammori and Gabrielli, 2012), vagy Fuzzy Bayes-alapú FMEA (Indrasari et al., 2021). A Fuzzy FMEA (Petrović et al., 2014) az FMEA módszer után a második leggyakrabban alkalmazott kockázatelemzési technikának számít. A három, a Fuzzy FMEA-ban általánosan használt tagsági függvény a háromszög, a trapéz és a Gaussi haranggörbe (Ling, 2004; Kubler et al.; Johanyák and Kovács, 2004).

Az ellátási láncok kockázatának értékelésére szolgáló hagyományos megközelítés elsősorban az FMEA keretrendszer alkalmazását foglalja magában, amely három kulcsfontosságú faktort alkalmaz: súlyosság, gyakoriság és észlelhetőség. Néhány szerző a három tényező megfelelése ellen érvel, és ehelyett olyan modellek alkalmazását javasolja, amelyek négy (költség, idő, rugalmasság és minőség) (Zhu et al., 2020) vagy öt (valószínűség, idő/késés, többletköltség, minőségkárosodás és észlelhetőség) (Wan et al., 2019) tényezőt tartalmaznak.

**F.3. A megfelelő aggregációs függvény gondos megválasztásával és bizonyos sorrendben történő elrendezésével a kockázatok értékelése ideális eredményt hozhat. Ez az eredmény hatékonyan tudja megmutatni a felsővezetés felé vagy a döntéshozók felé, hogy mely kockázatokat kell prioritásként kezelni.**

## 4. Kutatási eredmények és tézisek

Az előző fejezetben több szerző is kiemelte, hogy három faktor nem elegendő az átfogó kockázatértékeléshez. A tényezők számának növekedésével az aggregáló függvény egyre érdekesebbé válik. Ugyanazok a korlátok, amelyek az FMEA-ban nyilvánvalóak, nyilvánvalóvá válnak a multiplikatív aggregáció alkalmazásakor, amelynek ugyanaz a logikája, mint az FMEA aggregáló függvényének. Ennek eredményeképpen a kutatás az aggregációs függvényt meghatározó kritériumokat, az alkalmazható aggregációs függvények különböző típusait, valamint e függvények előnyeit és hátrányait

vizsgálja a kockázatértékeléssel összefüggésben.

Ebből az okból definiáltam az aggregációs függvény kritériumait, mint az érvényesség, monotonitás, érzékenység, szimmetria, linearitás, skálaillesztés és skála végpont azonosság (Grabisch et al., 2009; Zahedi Khameneh and Kilicman).

A  $S$  aggregációs függvények több példánya a következő, a hozzájuk tartozó kimenet tartományokkal együtt:

- $S_1(\mathbf{f}) = \prod_{i=1}^n f_i$  a kockázati tényezők szorzata. Ha  $n = 3$ , és a tényezők lehetnek a súlyosság, az előfordulás és a felismerés, akkor az FMEA eredeti RPN (kockázati prioritási szám) eredményezi.  $S_1(\mathbf{f}) \in [1, 10^n] \in \mathbb{N}$
- $S_2(\mathbf{f}) = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n f_i}$  a geometriai átlag. A  $S_2(\mathbf{f}) \in [1, 10] \in \mathbb{R}$  tartományban van.
- $S_3(\mathbf{f}) = Median(\{\{\mathbf{f}\}\})$  a medián (középső elem) a kockázati tényezők rendezett listájában.  $S_3(\mathbf{f}) \in [1, 10] \in \mathbb{N}$
- $S_4(\mathbf{f}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i$  a kockázati tényezők átlaga.  $S_4(\mathbf{f}) \in [1, 10] \in \mathbb{R}^+$
- $S_5(\mathbf{f}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n f_i^2}$  a kockázati tényezők általánosított  $n$ -dimenziós radiális távolsága.  $S_5(\mathbf{f}) \in [\sqrt{n}, 10\sqrt{n}] \in \mathbb{R}^+$ .
- $S_6(\mathbf{f}) =$  Fuzzy tagsági függvények aggregálása a szabálybázis alapján. Ebben az esetben a kimeneti függvénytartomány a felhasználó által meghatározott defuzzifikációs függvénytől függ, és minden előre meghatározott tartományban lehet.

A szakirodalomban más aggregációs függvények, például a *Szumma*, a *Geometrikus középérték* és a *Logaritmikus* is rendelkezésre állnak, ezek viselkedése azonban hasonló a korábban ismertetett függvényekéhez.

A kockázatértékelési keretrendszer, amely Kosztyán et al. (2020) volt publikálva, egy fuzzy modul beépítésével bővült. Ezt a kiegészítést azért vezettem be, hogy kimutassam, a javasolt kockázatértékelő keretrendszer ezt is le tudja kezelni.

A Fuzzy FMEA jellemzően három-hét nyelvi változót használ (Kozarević and Puška; Cardiel-Ortega and Baeza-Serrato).

Az intervallum elején és végén a szigmoid függvényt alkalmaztam:

$$\mu(x, a, b)_{sigu} = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{1}{1+e^{a(x-b)}}, & \text{bármely más esetben} \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu(x, a, b)_{sigd} = \begin{cases} 1 - \frac{1}{1+e^{a(x-b)}}, & x \leq a \\ 0, & \text{bármely más esetben} \end{cases} \quad (2)$$

ahol  $a$  a függvény meredeksége, és  $b$  az inflexiós pont.

Az intervallumon belüli minden egyes tartományra a harang/szórás függvényt alkalmazzuk:

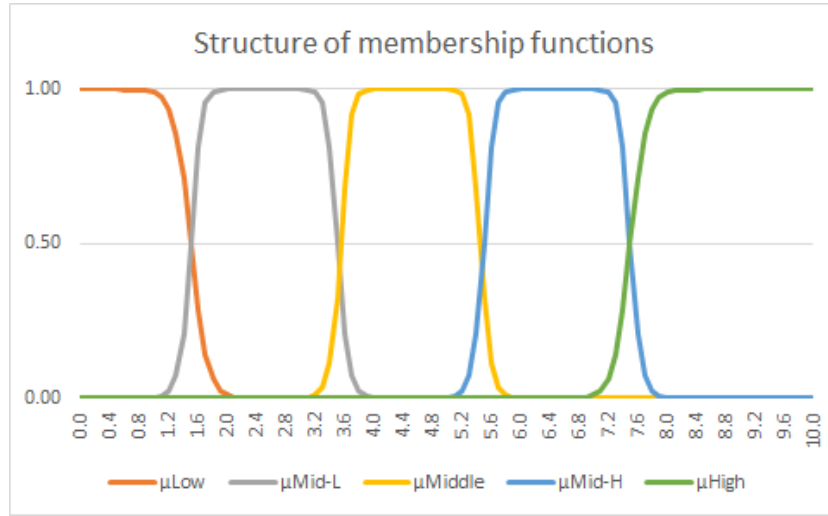
$$\mu(x, a, b, c)_{spl} = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-b}{a} \right|^{2c}} \quad (3)$$

ahol  $b$  a függvény középpontja,  $a$  a görbe szélessége és  $c$  a függvény meredeksége.

Mind a szórás, mind a harang Gauss tagsági függvények, amelyeket simaságuk, minden pontintervallumban nem nulla az értékük, folytonos differenciálhatóságuk, matematikai és számítási egyszerűségük miatt választottam (Johanyák and Kovács, 2004).

Amint azt az 1 ábra szemlélteti,  $n = 5$  (5 nyelvi szint) esetén, az eredeti értékének vagy crisp-jének megfelelően, minden egyes komponens  $n$  tagsági függvények összegévé alakul át.

$S_i(\mathbf{f}_i) = \sum_{i=1}^n \mu_i(x)$ ,  $x \leq 10$  és  $x \in \mathbb{R}^+$ , a többi változója a tagsági függvénynek konstans ( $a, b, c$ ).



1. ábra. The structure of Fuzzy membership functions for each factor.

Analógia vonható a fuzzy tagsági függvények összege és a fuzzy szabálybázist alkotó tényezők halmozódása között. Ennek egy példája a következőképpen írható le:

$$W_i(\mathbf{S}_i) = S_1(\mathbf{f}_i) \otimes S_2(\mathbf{f}_j) \otimes \dots \otimes S_n(\mathbf{f}_n) \quad (4)$$

ahol  $\otimes$  az aggregációs protokoll. Az utolsó fázis a kockázat összegének átalakítását jelenti egy fuzzy állapotból egy crisp állapotba. Ebben a fázisban a kockázati szint meghatározása a tagsági függvények valós számokká való átalakításával történik.

Az összes aggregációs függvény sajátos jellemzője, hogy nem tesznek különbséget a tényezők között, hanem egyenértékűnek tekintik őket. Ez azt jelenti, hogy egy rugalmas rendszernek képesnek kell lennie a különböző szempontok fontosságának mérlegelésére.

Legyen  $\mathbf{f} = [f_1, f_2, \dots, f_n]^T$ , ( $n \geq 2$ ,  $n \in \mathbb{N}$ ) a kockázati tényezők vektora, és legyen  $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$  a kockázati tényezők súlyvektora ( $w_i \in \mathbb{R}^+$ ). Jelöljük  $r = S(\mathbf{f}, \mathbf{w})$  mint **eredményes kockázatérték**, ahol  $S$  egy monoton aggregációs függvény. Jelöljük  $(\mathbf{f}, \mathbf{w}, S)$ -t **kockázat-aggregációs protokoll** (RAP).

- $S_1(\mathbf{f}, \mathbf{w}) = \prod_{i=1}^n f_i^{w_i}$  a súlyozott geometriai átlaga a kockázati faktoroknak,
- $S_2(\mathbf{f}, \mathbf{w}) = \max(\{f_1 w_1, \dots, f_n w_n\})$  a súlyozott maximum értéke (legnagyobbika) a kockázati faktoroknak,
- $S_3(\mathbf{f}, \mathbf{w}) = \text{Median}(\{\mathbf{f}, \mathbf{w}\})$  a súlyozott mediánja a kockázati faktoroknak,
- $S_4(\mathbf{f}, \mathbf{w}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i f_i^2}$  a súlyozott Euklidészi távolsága a kockázati faktoroknak,
- $S_5(\mathbf{f}, \mathbf{w}) =$  Fuzzy tagsági függvények aggregálása szabályalap alapján. A súlyozás az utolsó, defuzzyfikációs lépésben alkalmazható.

$w_i = 1/n$ -re  $S_1, S_3$  és  $S_4$  esetében a kockázati tényezők súlyozatlan multiplikatív, súlyozatlan medián és súlyozatlan radiális távolsága adódik.  $S_2$  esetében ez  $w_i = 1$ -re kapjuk a súlyozatlan maximumot.

#### 4.1. Az alkalmazott aggregáló függvények eredményeinek értékelése

Két módszerrel próbáltam az aggregáló függvényeket összehasonlítani.

- Az egyik az, amikor a függvények kimeneti argumentumainak **tartománya azonosnak van beállítva**; ezt jellemzően úgy lehet megoldani, hogy az értékeket megszorozzuk egy konstanssal. Ezt azonnal elvettem a lehetséges bonyolultság miatt, amelyet a függvények viselkedése okozott volna.
- Egy alternatív megközelítés a **különböző aggregáló függvények által generált kimeneti szintek sorrendjének összehasonlítása**, vagyis a kockázati eseményekhez rendelt kockázati szintek szerint sorrendbe rakjuk, és azok helyezéseit hasonlítjuk össze.

Ezt a második módszertan lesz a továbbiakban megvalósítva, és az esettanulmányban fogom alkalmazni. Ennek érdekében rangsorolási technikák alkalmazására van szükség.

#### 4.1.1. Rang korreláció

A Spearman-féle rangkorrelációs együttható egy olyan statisztikai mérőszám, amely számszerűsíti a két változó közötti kapcsolat erősségét és irányát:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N (R_{X_i} - R_{Y_i})^2}{N(N^2 - 1)} \quad (5)$$

ahol  $R_{X_i}$  és  $R_{Y_i}$  az első és a második változó rangját jelöli. A Spearman-féle rangkorrelációs együttható egy olyan statisztikai mérőszám, amely számszerűsíti a két változó közötti kapcsolat erősségét és irányát. Az érték előjele és nagysága egyaránt a  $[-1; +1]$  tartományba esik.

#### 4.1.2. TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)

A többkritériumos döntéselemzési technika alkalmazása az alternatívák értékelésére és a megvalósított kockázatelemzési modellek rangsorolásának megállapítására szolgál. A TOPSIS-módszer azt az alternatívát választja ki, amelyik a legrövidebb geometriai távolsággal rendelkezik a pozitív ideális megoldástól és a legnagyobb geometriai távolsággal a negatív ideális megoldástól ([Chakraborty](#)).

Legyen  $A$  a faktorok páros összehasonlítási mátrixa az alábbiak szerint:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (6)$$

where  $a_{ij}$  a megítélési pontszámok, figyelembe véve  $a_{ij} = 1/a_{ji}$ , and  $a_{ii} = 1$ .



Ezt a mátrixot normalizáljuk:

$$k_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}} \quad (7)$$

Az így kapott helyi súlyozás:

$$w_i = \sum_{j=1}^n \frac{k_{ij}}{n} \quad (8)$$

A  $h_i$  változókat a kockázati események ábrázolására használjuk, ahol  $i$  1 és  $n$  között van. Hasonlóképpen, a  $f_j$  változókat a TOPSIS értékelési kritériumok jelölésére használjuk, ahol  $j$  1 és  $m$  között mozog. A  $h_i$  alternatíva  $f_j$  kritériumokhoz viszonyított numerikus eredményeit a  $x_{ij}$  változó jelöli.

A normalizált döntési mátrix képlete a következőképpen fejezhető ki:

$$d_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m x_{ij}^2}} \quad (9)$$

A súlyozott normalizált döntési mátrix elemei generálhatók:

$$V_{ij} = w_i \times d_{ij} \quad (10)$$

Az ideális legjobb  $V_j^+$  és az ideális legrosszabb  $V_j^-$  megoldást az egyes kritériumok legmagasabb és legalacsonyabb értékeinek összesítésével határozzuk meg.

Hasznossági kritériumok esetén:

$$V_j^+ = \max[V_{ij}] \quad V_j^- = \min[V_{ij}] \quad (11)$$

Nem-hasznosság vagy haszontalansági kritérium esetén:

$$V_j^+ = \min[V_{ij}] \quad V_j^- = \max[V_{ij}] \quad (12)$$

Az Euklideszi távolságokat az ideális legjobbtól mérik. ( $S_i^+$ ) és az ideális

legrosszabb ( $S_i^-$ ) értékektől:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^+)^2} \quad S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^-)^2} \quad (13)$$

A teljesítmény pontszám (az ideális megoldáshoz való viszonylagos közelség) kiszámítható:

$$P_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (14)$$

A rangsorolt lehetőségeket az utolsó lépésként csökkenő sorrendbe rendezzük.

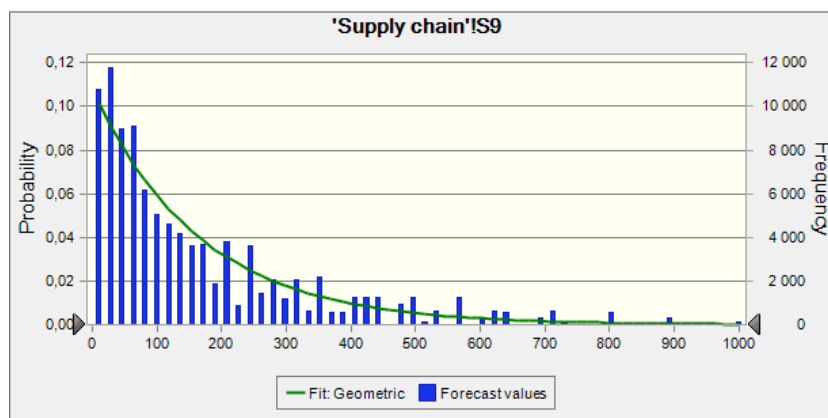
Ez a módszer alkalmas a páronkénti korrelációelemzésre, különösen akkor, ha az összehasonlítandó változók száma nem haladja meg a hetet. Ennek a stratégiának a végrehajtása problémássá válik olyan helyzetekben, amikor tíznél több veszélyforrás van, ami a valós életben gyakran előforduló jelenség. A TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) kezdeti alkalmazását bemutató cikk a [Bognár and Hegedűs](#) szerzőknél figyelhető meg.

Hétnél több jelentős egyedi veszélyt magában foglaló eset értékelésénél ajánlott olyan szakértőkből álló csoport bevonása, akik átfogó szakértelemmel rendelkeznek az egyes kockázatokkal kapcsolatos következményekkel kapcsolatban. Ezek a személyek képesek kell legyenek egy olyan mátrix elkészítésére, amely megkönnyíti a hatások, veszélyek és kereszthatások értékelését, egy másik mátrix mellett, amely lehetővé teszi az eredmények értékelését. Az RSTUDIO-t használhatjuk mindkét mátrix bevitelére és rangsorolásuk kiszámítására a TOPSIS algoritmus ([Yazdi](#)) segítségével.

## 4.2. Az aggregációs függvények értékelése

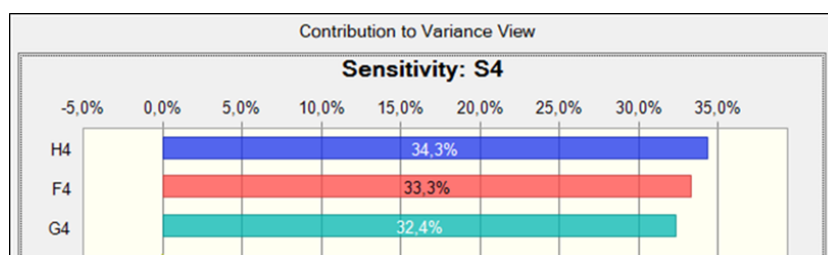
Öt kockázati aggregációs függvény elemeztem, amelyek öt faktoros bemenettel rendelkeztek. Ezek az aggregáló függvények: a multiplikatív, átlag,

medián, módosított euklideszi távolság és fuzzy függvények. A gyakorisági szempontok felhasználása az értékelési folyamatban hasznosnak bizonyulhat. Az Oracle által kifejlesztett **Crystal Ball** alkalmazást használtam, amely egy add-in a Microsoft Excel alkalmazás, erre a célra alkalmazták. A három változó vizsgálatához, kifejezetten a hagyományos FMEA esetében a próbaszámot 10 000-ben állapítottam meg. Ebben a konkrét esetben az egyes elemek érzékenysége 33,3 % volt. A következők értékelése esetén öt tényező értékelésénél a próbák számát 100 000-re állítottam be, hogy minden elem esetében azonos érzékenységet érjenek el, és minden egyes tényező az összérték 20 %-át tegye ki.

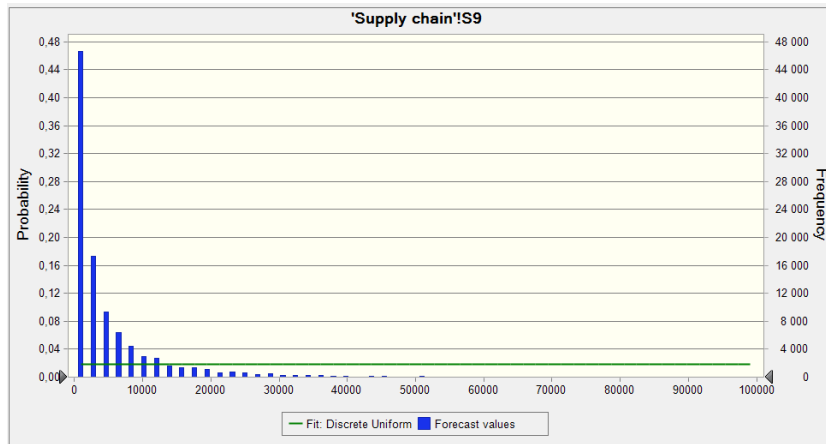


2. ábra. Standard FMEA gyakorisági és értékeloszlása

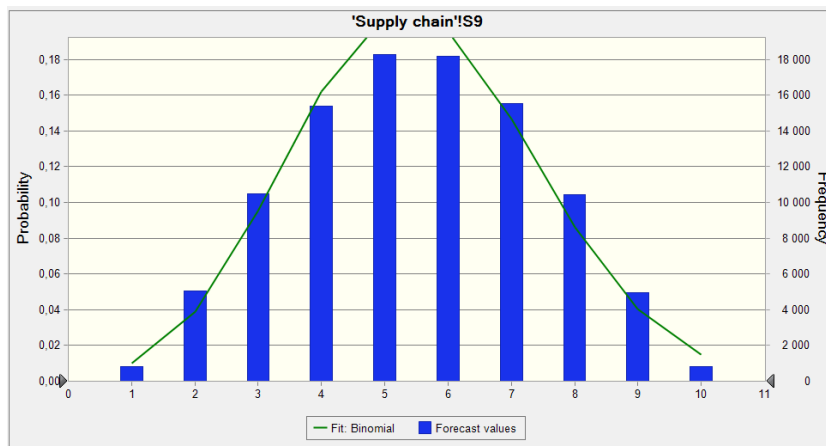
A standard FMEA (3 tényezővel, O, S D) érzékenysége a 3 ábrán látható.



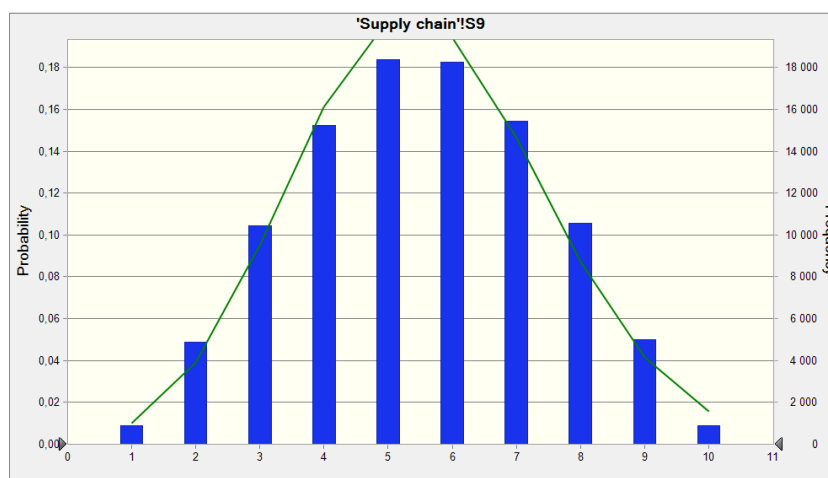
3. ábra. A standard FMEA érzékenységi eloszlása a 3 tényezőre (O,S,D).



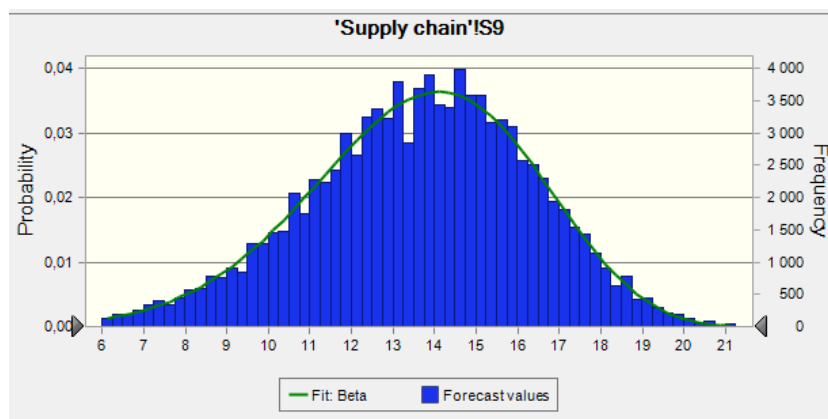
4. ábra. TREF Szorzási gyakorisági és értékeloszlása



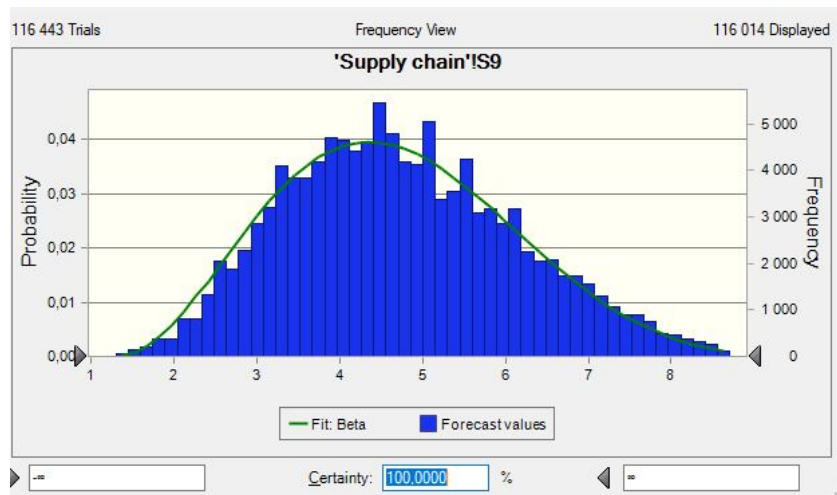
5. ábra. TREF számtani átlag gyakorisági és értékeloszlása



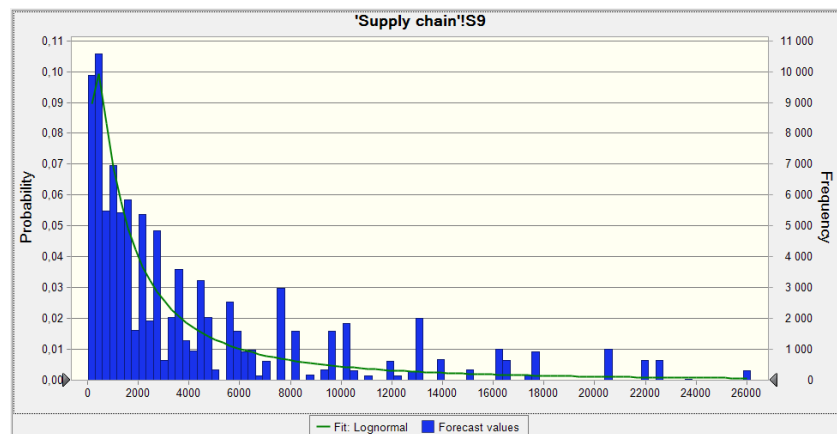
6. ábra. TREF Medián gyakorisági és értékeloszlása



7. ábra. TREF Euclidészi távolság gyakorisági és értékeloszlása

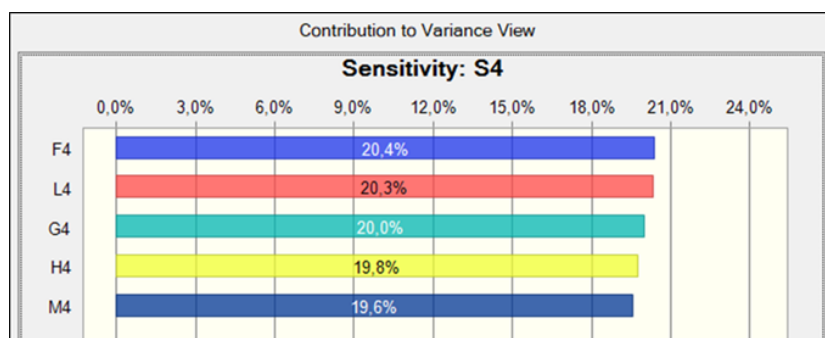


8. ábra. TREF Geometriai átlag gyakorisági és értékeloszlása



9. ábra. TREF Fuzzy gyakorisági és értékeloszlása

Az érzékenység 5 faktoros eloszlás esetén (4 - 9 ábrák) úgy néz ki, mint a 10 ábra. Az 10 ábra a TREF Szorzat esetére vonatkozó érzékenységet mutatja, de az 5 faktoros aggregációs függvények esetében az eltérés 2,4%-on belül van. A közel azonos érzékenységi értékek elérése érdekében 5 paraméter esetében 100 000 próbát választottunk. Nagyobb próbaszámra az érzékenységek 20%-hoz tartanak.



10. ábra. Az TREF Multiplikatív/Szorzat szabványos érzékenységi eloszlása az 5 tényezőre (O,S,D, Co, Cn).

Az Oracle Crystal Ball segítségével végzett szimulációk átfogó összefoglalása a 3 táblázatban található.

3. táblázat. Az 5 tényezőre vonatkozó különböző aggregációs módszerek jellemzői, beleértve a 3 tényezőt tartalmazó standard FMEA-t is.

Item	FMEA	TREF Multi	TREF Aver	TREF Median	TREF EucDist	TREF Fuzzy
Factors	3	5	5	5	5	5
Skewness	1.66	3.34	-0.025	-0.003	-0.32	3.28
Kurtosis	5.77	18.84	2.36	2.37	3.02	17.91
Min	1	1	1	1	2	8
Max	1000	100000	10	10	22	77348

A 3 táblázatban szereplő ferdeség (skewness) a szimmetria hiányára vonatkozik az adathalmazban, míg a kurtózis (Kurtosis) azt értékeli, hogy az adatok a normális eloszláshoz képest nehéz (pozitív értékek) vagy könnyű (negatív értékek) csóvát mutatnak-e. Az 3 táblázatban szereplő ferdeség a szimmetria hiányára vonatkozik.

A szimulációs 2 és 9 közötti ábrák vizsgálatakor nyilvánvaló, hogy:

- A **Multiplikatív/szorzó aggregáló** függvényekkel kapott eredmények, amint azt az 4 ábra mutatja, a hagyományos FMEA-val kapott eredményekkel összehasonlítható szintet mutatnak. Meg kell azonban jegyezni, hogy az előbbi módszer öt komponens figyelembevételével történt, míg az utóbbi módszer jellemzően három

komponenst vesz figyelembe. A faktorok szorzása és a hagyományos FMEA linearitása kimagaslóan jó. Következésképpen egy  $n$  faktort tartalmazó kockázat esetében  $[1, 10^n] \in \mathbb{N}$  tartományt eredményez, ahol az egyes tényezők tartománya  $[1, 10] \in \mathbb{N}$ . Az FMEA aggályai ebben a konkrét esetben is érvényesek. Ez a leggyakrabban alkalmazott aggregációs módszer. Fontos kiemelni, hogy ez az aggregációs függvény kizárólag a  $[1, 10^n]$  tartományon belüli kisszámú értéket használ fel. Például, ha 3 tényezőt veszünk figyelembe, csak 120 értéket használunk a  $[1, 1000] \in \mathbb{N}$  tartományból, 4 tényező esetén csak 274 értéket használunk a  $[1, 10000] \in \mathbb{N}$  tartományból, és 5 tényező esetén csak 546 értéket használunk a  $[1, 100000] \in \mathbb{N}$  tartományból. A felső harmadban mindhárom esetben összesen hét egyedi érték található. A felső felében három faktor esetén (1000-ból) 7 egyedi érték van, négy faktor esetén (10 000-ből) 21, öt faktor esetén (100 000-ből) pedig 23 egyedi érték. Ennek a kérdésnek vannak pozitív és negatív aspektusai is. Negatív: csak néhány számot használnak fel egy jelentős tartományból. Ezzel szemben a nagy kockázatú eljárások feltűnően hangsúlyosak.

- A 5 ábra **Számtani átlag aggregáló** függvényt mutatja meg. Bemeneti és kimeneti tartománya azonos, 1-től 10-ig terjed. Ez a módszer erős linearitást mutat, és nagyon könnyen kiszámítható. Az összetevők/tényezők tartományát ugyanazon az intervallumskálán kell mérni. A szélsőértékek jelenléte bizonyos forgatókönyvekben kihívást jelenthet. Ebben az esetben, ha egy tényező eléri a maximális értékét, és a többi tényező alacsony értékeket tart, az eredményül kapott kimenet máris a kimeneti tartomány középpontja alá esik. Ennél az aggregáló függvénynél az alacsony értékű komponensek jelenléte hatékonyan enyhíti a szélsőséges értékek hatását, és így akadályozza a potenciális kockázatok azonosítását és elemzését.
- A **Median aggregáció** adja a legalacsonyabb Skewness/ferdeség



pontszámot, amint azt az 6 ábra mutatja, ami arra utal, hogy az adatok nagyfokú szimmetriát mutatnak. Az adatkészletünk Kurtosis pontszáma meglehetősen alacsony, ami az adatok mérsékelt mértékű testreszabottságára utal. A kapott skála megegyezik az összetevők skálájával, és ez a függvény ordinális skálákon is használható. A számítás a gyakorlatban nem egyszerű. A skála viszonylag durva, és csak homogén kockázati komponensek esetén tekinthető helyesnek. Ez a helyzet hasonlóságot mutat az átlagos aggregációs megközelítéssel.

- A linearitás csak átlagos, és a számítás kihívást jelent a **Euklidészi távolság (általánosított) aggregátum** esetében (lásd 7 ábra). Az értelmezés kihívást jelent az  $n$ -dimenziós térben, ahol  $n > 3, n \in \mathbb{N}$ .  $N$  tényező esetén a kimenet  $[\sqrt{n}, 10\sqrt{n}] \in \mathbb{R}^+$  lesz az egyes tényezők  $[1, 10] \in \mathbb{N}$  értéktartományára. Az euklidészi távolság (általánosított) aggregátum linearitása csak átlagos, és számítása problémás, amint azt az 7 ábrán is látható.
- A **Fuzzy aggregációs** függvény (lásd 9 ábra) eredményadatai, amelyeket az alkalmazott tagsági és defuzzifikációs függvények határoznak meg, hasonlóságot mutatnak a TREF-szorzásával. A számítás nagyon összetett, és tapasztalatot igényel. Fontos azonban megjegyezni, hogy a kimenet mindössze öt elsődleges csoportból áll (lásd 1 ábra).

Összefoglalva, fontos megjegyezni, hogy a szorzási megközelítéseket, például az FMEA-t, az általánosított TREF-szorzást és a defuzzifikáció tekintetében a TREF Fuzzy-t alkalmazó aggregációk a legkedvezőtlenebb eloszlást eredményezik, mert a kimeneti értéktartománynak csak pár eleme van kihasználva. Jelentős hozzájárulásuk azonban olyan helyzetekben válik lényegessé, amikor az elemek megemelkedett kockázati szintet mutatnak. Előnyük az, hogy a kimeneti tartomány felső szintjén jelentős különbséget tesznek a kockázati szintek között, és ez a tulajdonságuk teszi őket használhatóvá a kockázatértékelésben.

Tekintettel a Fuzzy-függvény bonyolultságára, arra lehet következtetni, hogy az elemzett aggregáló függvények közül a multiplikatív értékelési megközelítés, amely növekvő számú összetevőt tartalmaz, a legegyszerűbb aggregálási módszer.

**T.1. Bizonyítottam, hogy a teljes kockázatértékelés javasolt módszere a kockázati szintek átfogóbb értékelését teszi lehetővé a meglévő módszerekhez képest. Lehetőséget biztosít háromnál több elem kiválasztására és különböző aggregációs algoritmusok alkalmazására. Ezt az állítást az egyik esettanulmányon keresztül validáltam**

### 4.3. A javasolt kockázat figyelmeztető-/jelzőrendszer

A figyelmeztető rendszer jelzi a kockázatértékelő csoportnak vagy a kapcsolódó döntéshozóknak, hogy hol vannak kritikus hibák, és ez a csoport láthatja a folyamatok általános állapotát. A korrekciós/megelőző intézkedéseket akkor ütemezik be, ha egy kockázati tényező nem alacsonyabb egy **W1** küszöbértéknél, de akkor is beütemezik a korrekciós/megelőző intézkedéseket, ha az összesített érték nem alacsonyabb egy **W2** küszöbértéknél. A figyelmeztető rendszer javasolhat egy további kimeneti tényezőt, például **kritikusság**, hogy a kockázatértékelő csoport **W3** korrekciós/megelőző intézkedéseket határozhasson meg, még akkor is, ha az összesített kockázatérték alacsonyabb, mint a megadott küszöbérték. Ha értéke 1, akkor korrekciós vagy megelőző intézkedéseket kell meghatározni.

Legyen  $(\mathbf{R}^{(N)}, \mathbf{W}^{(N)}, S)$  és  $(\mathbf{R}^{(N-1)}, \mathbf{W}^{(N-1)}, S)$  ( $N \geq 1$ ) egy kockázati aggregálási protokoll. Legyen  $Cr^{(N-1)} \in \{0, 1\}$  egy kritikussági szint az  $N-1$ -es szintű hierarchiának. Legyen  $\mathbf{T}^{(N)}, \mathbf{T}^{(N-1)}$  figyelmeztetési szint-vektorok, ahol  $\forall i, j, T_i^{(N-1)}, T_j^{(N)} \in \mathbb{R}^+$ . Jelölje az  $N$  es szintű  $i$  faktorhoz tartozó beavatkozási függvény:

$$K_i^{(N)} = \begin{cases} 1, & R_i^{(N-1)} \geq T_i^{(N-1)} \\ 0, & \text{egyéb esetben} \end{cases} \quad (15)$$

A *riasztási esemény* bekövetkezik, ha

(W1)  $\sum_i K_i^{(N-1)} \geq n^{(N-1)}$  (legalább  $n^{(N-1)}$  kockázati faktor értéke alacsonyabb, mint egy meghatározott szint);

(W2)  $\sum_j K_j^{(N)} \geq n^{(N)}$  (legalább  $n^{(N)}$  aggregált kockázati érték nem kisebb, mint egy meghatározott szint are not lower than the specified threshold);

(W3)  $Cr^{(N-1)} := 1$  (a kockázati faktor értéke kritikus szintet jelez).

A küszöbértékek és a küszöbértékek szabálya a vállalati szakértők alapján tetszőlegesen meghatározható. Általában a figyelmeztető küszöbértékeket a korábbi tapasztalatok alapján határozzák meg, de a szabványok is adhatnak küszöbértéket, vagy a saját technológiai tapasztalat. (Esettanulmányunkban, mivel a vállalatnak több szabvány követelményét is be kellett tartania, a szakértők véleményének minimális értéke volt a küszöbérték.) Ezen túlmenően a kockázati tényezők függősége is kezelhető azáltal, hogy minden egyes kockázati tényezőre külön-külön különböző küszöbértékeket határozzunk meg.

Kijelenthető, hogy egy kockázati hatás akkor **hiba hatás**, ha a (W1)–(W3) feltételek közül legalább az egyik teljesül.

Megállapítható, hogy fontos az RPN-t egy másik számmal helyettesíteni, amely általánosan jelzi a kockázati szintet. Ez lesz a TPRN (teljes kockázati prioritási szám).

Fontos megjegyezni, hogy a javasolt kockázati aggregációs protokoll nem igényel meglévő (előre meghatározott) skálákat. A skálaértékek lehetnek páros összehasonlítás eredményei (lásd pl. Merrick et al., 2005).

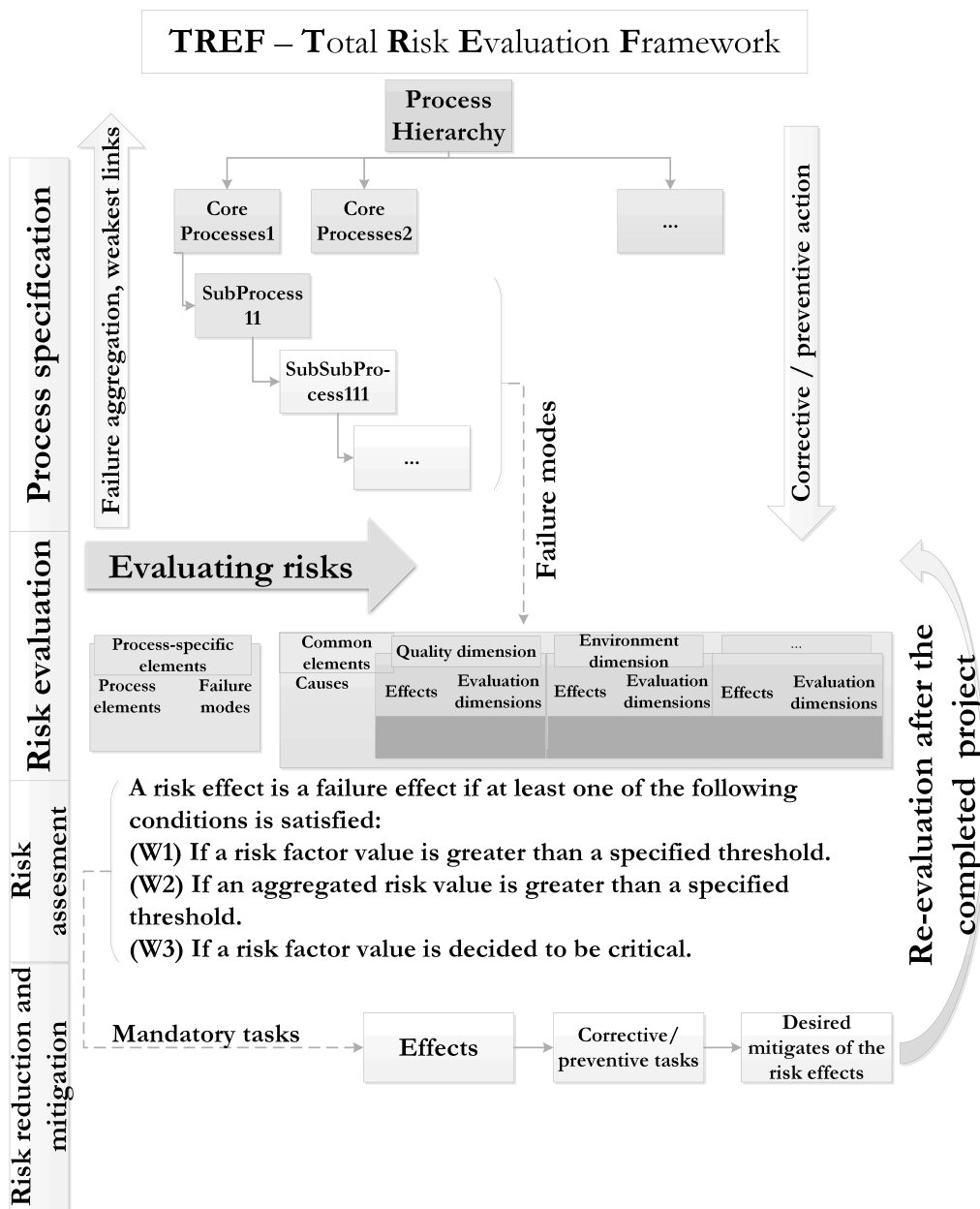
A *kockázat-aggregációs protokoll* iteratív alkalmazásával a kockázatértékek magasabb hierarchiaszinten is megadhatók.

Legyen  $(\mathbf{R}^{(N)}, \mathbf{W}^{(N)}, S)$ ,  $(\mathbf{R}^{(N-1)}, \mathbf{W}^{(N-1)}, S)$  egy kockázati aggregálási protokoll. Jelölje  $TRPN_i^{(N)} = R_i^{(N)} = S(\mathbf{R}_i^{(N-1)}, \mathbf{W}_i^{(N-1)})$  az  $N$ -es hierarchia szinthez tartozó  $i$  tag **teljes kockázati szintjét**.

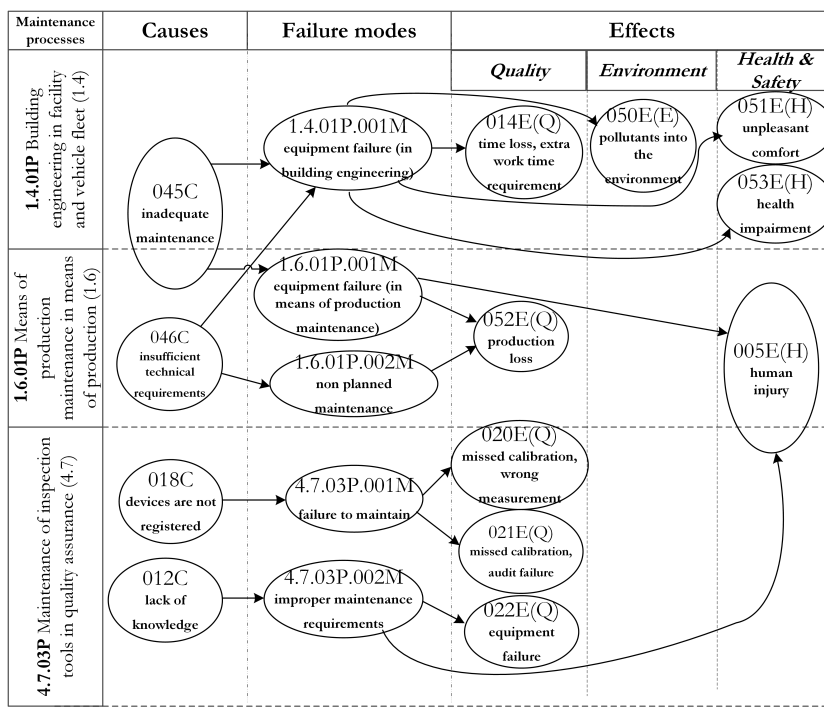
Ha a TRPN-eket a teljes folyamatfára számítják ki (lásd 11 ábra), a küszöbértékeket minden szintre meg kell adni.

A javasolt iteratív alulról felfelé történő számítási módszer (lásd 4.3 definíció) alapján a folyamathierarchián vagy egy aciklikus folyamatgráfon keresztül a kockázatértékek minden egyes hierarchiaszintre kiszámíthatók.

A hagyományos FMEA-val és a fuzzy FMEA-val ellentétben a TREF lehetővé teszi, hogy egy okhoz egynél több hatást rendeljenek (lásd 11 ábra). A különböző hibamódok és kockázati hatások azonban azonos okokkal rendelkezhetnek (közös okok) (lásd 12 ábra). Az egyetlen korlátozás a folyamat-hierarchiában a ciklusok elkerülése.



11. ábra. A javasolt teljes kockázatértékelési keretrendszer (TREF)



12. ábra. A TREF-gráf a kockázati karbantartási folyamat értékelésre: az okok, hibamódok és hatások láncolata.

Az 13 ábra az egyes hatások TRPN-jét mutatja. A tartomány értéke nem alacsonyabb a kritikus értéknél (küszöbérték); ezért korrekciós/megelőző intézkedéseket kell meghatározni mindkét (051E(H), 053E(H)) tartományhatás mérséklésére (lásd 4.3 szakasz 4.3). A 13 ábra azt is mutatja, hogy a meghatározott küszöbértéknél alacsonyabb átlagos TRPN-ek ( $TRPN_{051E,H}$  és  $TRPN_{053E,H}$ ) ellenére a 053E(H) kritikus (lásd 4.3 szakasz 4.3), és a kockázatértékelő csoport korrekciós/megelőző intézkedéseket határozott meg e kockázati hatás elkerülésére.

	Maximum:	2	2	3	4	3	5	1	2,47	2,99					
	Geom. avg:	2	2	2,5	4	3	5	1	2,43	2,9					
	Average:	2	2	2,67	4	3	5	0,8	2,43	2,91					
	Warnings:	0	0	0	0	0	2	1	0	0					
		2	2	2,66666667	4	3	5	0,8	2,433	2,907					
Health & Safety	Occurrence	Severity	Detection	Control	Information	Range	Criticality	TRPN					Failure effect		
								Geometrical	Un-weighted Geom.	Weighted Median	Radial	Max Value			
	weight:	0.2265	0.4461	0.0833	0.1325	0.0352	0.0765	1							
Effect	Critical value	3	2	5	4	4	4	0	(f,w,S1)	(f,1,S1)	(f,w,S3)	(f,w,S4)	(f,1,S2)		
051	Unpleasant comfort, colds	2	2	1	4	3	5	0	2.25	2.49	2	3.14	5	Yes	
053	Health damage	2	2	3	4	3	5	1	2.47	2.99	2	3.27	5	Yes	

W1: Risk factor value is greater than a specified threshold.

W3: Risk factor value are decided to be critical

W2: Aggregated risk value is greater than a specified threshold.

13. ábra. A TRPN értékelése a meghibásodási mód (1.4.01P.001M) hatásaira (051E(H) és 053E(H))

**T.2. A javasolt figyelmeztető rendszer integrálható a fent említett teljes kockázatértékelési modellbe (kivételet TREF FMEA), és különböző szinteken (tényezők, kockázatértékelési szintek), illetve a tényezők és a kockázatértékelések közötti különböző kapcsolatokban küszöbértékeket határozhatók meg.**

Összefoglalva, a javasolt teljes kockázatértékelési keretrendszer lehetővé teszi a kockázat pontosabb becslését. Ezenkívül ez a keretrendszer olyan figyelmeztető rendszert is tartalmazhat, amely képes azonosítani a kockázati szinteket különböző területeken vagy irányítási rendszerekben, például a minőség, a környezetvédelem, az egészség és biztonság, az energiatakarékosság és a kiberbiztonság területén. Ez különösen hasznos olyan helyzetekben, amikor ezek a területek nincsenek integrálva egy vállalatban vagy vállalatban belüli egységes kockázatértékelési rendszerbe.

Ahhoz, hogy ez a folyamat megfelelően működjön, 2 dologra van szükség:

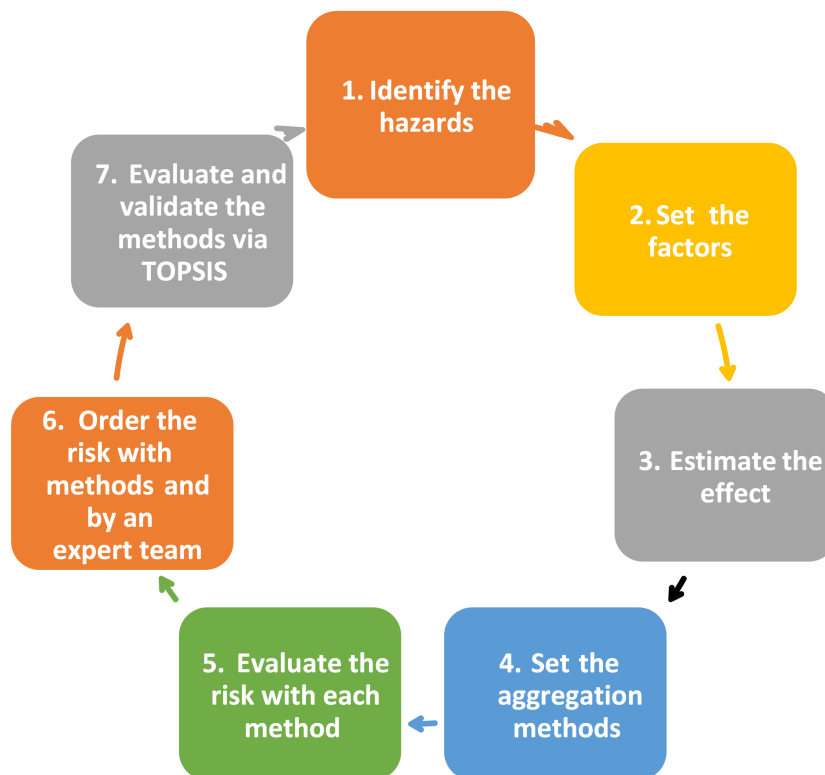
- Egy kockázatértékelési vagy FMEA-csoportra, amelynek tagja egy FMEA-moderátor is.
- A kockázatértékelési folyamat rendszeres felülvizsgálata a PDCA módszertan alapján.

Szerencsére mindkét dolog kötelező egy autóiipari beszállítónál. Más szervezetekben ezeket ki kell alakítani.

A disszertációm harmadik kutatási kérdésének megválaszolásakor céлом az volt, hogy az első és második kutatási kérdés keretében kidolgozott javasolt módszert kiterjesszem úgy, hogy az hatékonyan alkalmazható legyen az ellátási láncban.

#### 4.4. Lépések tervezése a gyakorlati megvalósításhoz

A 14. ábra az értékelés lépéseit mutatja be, amelyeket az elméleti keretrendszer és az esettanulmány későbbi elemzése során is felhasználunk.



14. ábra. A megfelelő kockázatértékelési módszer meghatározása.

**Szint 0. lépés–A csapat megalakítása:** Össze kell állítani egy olyan szakértői csoportot, amely a logisztika, a minőségirányítás, a kockázatértékelés, az értékelés és a kockázatcsökkentés területén speciális ismeretekkel rendelkezik, beleértve az összes érintett részleget, mint például a pénzügy/kontrolling vagy más részlegek.



**1. lépés—Kockázatok azonosítása:** Ez a lépés az ellátási lánc összes problémájának átfogó összegyűjtése, amely magában foglalja a követeléseket, veszteségeket és késedelmeket.

**2. lépés—Tényezők és mérlegek meghatározása:** Az 1. lépésből származó listát kell felhasználni a szervezet, részleg vagy folyamat kockázatát leíró legpontosabb tényezők azonosítására. Ez a fázis kivételesen nagy kihívást jelent. Az FMEA-ban szereplő tényezők, nevezetesen a kimutathatóság, a súlyosság és az előfordulás, szilárd alapként szolgálnak. Ha azonban ezeken belül vannak más elemek is, amelyek javíthatják a kapcsolódó kockázat pontos jellemzésének képességét, akkor azokat is be kell építeni. Az előzőekben említett három tényezőn kívül az ellátási láncok számos más elemet is használnak, mint például a minőség, az idő, a költség, az intenzitás, a következmény, a hatás, az ok és az intézkedés. A tényezők mennyisége az üzleti vagy logisztikai eljárások bonyolultságától, a forgalmi mintáktól, az üzleti kapcsolatoktól és egyéb releváns szempontoktól (pl. fenntarthatóság, energiatakarékosság, kiberbiztonság, stb.) függ. Ezeket a tényezőket mindenképpen eseti alapon kell értékelni minden egyes vállalat esetében, mivel a kockázat mértéke olyan tényezőktől függően változhat, mint a földrajzi elhelyezkedés, az ellátási lánc hálózat mintázata, a technológiai infrastruktúra, a munkaerő rendelkezésre állása és szakértelme, a környezeti feltételek, az alapvető technológiai képességek, a politikai/gazdasági/regionális stabilitás stb. Ha egy újszerű komponens a szervezet működése szempontjából javíthatja a kockázatelemzést, akkor ajánlatos azt felhasználni. Fontos megjegyezni, hogy az elemeket konkrét szintekhez kell kötni, amelyeket ideális esetben a szervezet határoz meg. Ajánlott azonban, hogy a szintek száma páros számú legyen. Általában 10 szintet alkalmaznak, bár ettől a szabványtól rugalmasan el lehet térni.

**3. lépés—Kockázatértékelés:** Ebben a szakaszban határozzuk meg az egyes kockázatok tényezőinek szintjeit.

**4. lépés—Aggregációs módszerek beállítása:** Ebben a lépésben kiválasztjuk azokat az aggregáló függvényeket, amelyeket az elemzéshez

használni kívántunk.

A szabványos FMEA-t összehasonlítási alapként használjuk. A három szint (L, M és H) beillesztése miatt az új FMEA-ban fontos megjegyezni, hogy ezek a szintek kizárólag a későbbi értékelés mutatóiként szolgálnak, és nem a kockázatok rangsorolására szolgálnak. Ezen indoklás miatt az elemzés nem fogja tartalmazni az új FMEA-t.

Minden szervezet önállóan dönthet arról, hogy elfogadja-e, vagy akciókkal csökkenti az egyes kockázatokat, vagy nem foglalkozik vele, mert nem indokolt. A fent említett információk alapján a vállalat vezetése vagy a kockázatértékelő szakértői csoport megállapíthatja azokat a konkrét szempontokat, amelyek kiemelik a kockázati szintet.

**6. lépés—Az eredmények TOPSIS módszerrel és a szakértők által történő sorrendbe állítása:** Ez a függvények aggregálásából származó kimenetek elrendezésére vonatkozik. Ez a lépés két komponensből áll: a TOPSIS algoritmus alkalmazása a sorrendezéshez és a szakértői csoport tagok által végzett sorrendezési folyamat.

**7. lépés—Értékelés és érvényesítés:** Az eredmények értékelése ebben a fázisban nagy jelentőséggel bír, és megköveteli az aprólékos és stratégiai előkészítést. A kockázatértékelő szakértői csoportot arra kéri, hogy a legtapasztaltabb személyekből álló bizottságot hozzon létre az események hozzárendelésére, figyelmen kívül hagyva a már közzétett rangsorokat vagy a kockázatértékelés eredményeit. Ez azt jelzi, hogy a jelzett személyek nem rendelkeznek a TOPSIS rangsorolás kimeneti értékeinek és az aggregációs funkciók eredményeivel, hogy ne zavarja őket a döntésükben.

Ez a bizottság a megfelelő pontszámok felhasználásával elkészíti a hatásmátrixot és a hatásmátrixot. E mátrixok pontossága rendkívül fontos, mivel jelentős befolyást gyakorol a végeredményre. Ez azt jelenti, hogy az egyes megközelítések relatív hatásainak értékelésében jelentős szakértelemmel rendelkező szakemberek egy meghatározott csoportjának szempontjait kell figyelembe venni.

A módszer validálása magában foglalja a bizottság eredményeinek össze-

hasonlítását a TOPSIS segítségével készült rangsorolással. Ha ez egybeesik, akkor ez lesz a legjobb aggregációs függvény, amelyet a szervezet használhat.

A kockázatértékelést egyének felhasználásával végzik, ezáltal minőségi adatokat kapnak. Bármilyen aggregáló függvény alkalmazása ezekre az értékekre minőségi eredményt ad, függetlenül az adatok rangsorolásához használt matematikai függvényektől, mint például az AHP, TOPSIS stb. Mindazonáltal, ha ugyanazt az összehasonlítást a kockázatelemző csoport legtapasztaltabb szakértőinek felhasználásával és a fent említett összehasonlító matematikai eszközök alkalmazásával végezzük el, az eredménynek azonosnak kell lennie. Az emberi hiba előfordulása mérsékelhető a vizsgálatnak a csoporttal való ismételt elvégzésével. Ezzel a módszerrel a szervezeten belüli kockázatelemzéshez a legmegfelelőbb aggregáló funkciót választja ki.

#### **4.5. A figyelmeztetési szintek beállítása**

Ez azért nehezebb feladat, mert bár több cég alkalmazza az úgynevezett integrált irányítási rendszert kockázatalapú megközelítéssel, valójában külön-külön működtetik a minőség-, környezet-, energiatakarékossági és adatvédelmi irányítási rendszerüket. Bizonyos esetekben az integráció azt jelenti, hogy a tanúsítást ugyanaz a tanúsító hatóság adja ki, jellemzően költségvetési okokból.

Ebben a helyzetben a döntéshozók sok jelentést kapnak a különböző irányítási rendszereket auditáló csoportoktól, de nincs egységes alapjuk a kockázatok összehasonlítására. Praktikusnak tűnik az előfordulás és az ebből eredő kár értékbeni vizsgálata, de ez nem egyértelmű alap a döntéshozatalhoz, mert nem foglalkozik a károk összes hatásával, csak a kapcsolódó irányítási rendszerhez kapcsolódó károkkal.

Az értékelési módszertan szinte azonos, mint az előbb bemutatott kockázati keretrendszer kialakításánál.

Míg a kockázati értékek és a küszöbértékek számítását az alulról felfelé iteratív képlettel kell kiszámítani, addig a monitoring rendszer működtetése követheti mind az alulról felfelé, mind a felülről lefelé történő megközelítést.

**Lentről felfelé történő megközelítés** A 0-adik hierarchiaszinten a kockázati tényezőket értékelik. Figyelmeztető esemény akkor következett be, ha egy kockázati tényező nem alacsonyabb, mint a küszöbérték (W1) vagy egy kritikussági érték 1 (W3). Karbantartás esetén ez a felügyeleti rendszer megmutatja, hogy a folyamatmód melyik kockázati hatása (melyik tartományban) okozta a meghibásodási módot, és melyik tényező(k) nem alacsonyabbak egy küszöbértéknél; ezért *specifikus javító/megelőző intézkedést* kell előírni a kockázati tényező értékének mérséklésére. Ha nem írnak elő konkrét korrekciós/megelőző intézkedést, de az összesített kockázat értéke nem alacsonyabb a küszöbértéknél, akkor *általános korrekciós/megelőző intézkedéseket* kell előírni (W2) az összesített kockázatértékek mérséklésére. Az általános korrekciós/megelőző intézkedéseknek tartalmazniuk kell a kockázati tényezők értékeit mérséklő konkrét feladatok összességét. Ez az alulról felfelé irányuló megközelítés kiterjeszthető a magasabb hierarchiaszintekre is, ahol az  $N$  hierarchiaszintű általános tevékenységeknek konkrét feladatokat kell tartalmazniuk az alacsonyabb hierarchiaszintű kockázati tényezők vagy kockázati értékek mérséklésére.

**Fentről lefelé történő megközelítés** A felülről lefelé vagy *menedzseri megközelítés* akkor adható meg, ha az aggregált kockázati értékek mellett a hibahatások számát is kiszámítják az összes hierarchiaszintre. Ha a  $N$  hierarchiaszinten figyelmeztető esemény következik be, akkor egy általános korrekciós/megelőző intézkedést kell megadni, amely az alulról felfelé irányulóhoz hasonlóan tartalmazhat (de ebben az esetben nem feltétlenül) egy (részletes) korrekciós/megelőző intézkedést a kockázati tényezők mérséklésére. A hibahatások száma minden szinten segít a vezetésnek lefelé haladni és meghatározni a korrekciós/megelőző intézkedések halmazát.

**T.3. A javasolt modell használhatóságát hatékonyan értékeltem az ellátási láncok hálózataira. Fontos megjegyezni, hogy a beszállítói láncok (SCM) kockázatának vizsgálata gyakran figyel-**

men kívül marad más kockázatértékelési módszerekhez képest.

A becsült eredményt összehasonlítottam a szakértői csoport által kapott eredménnyel, és megállapítottam, hogy azok megegyeznek.

**T.3.a. [Rugalmasság] Új tényezők és alternatív aggregációs függvények választhatók, amelyek hatékonyan hangsúlyozzák a kapcsolódó ellátási lánc kockázatát.**

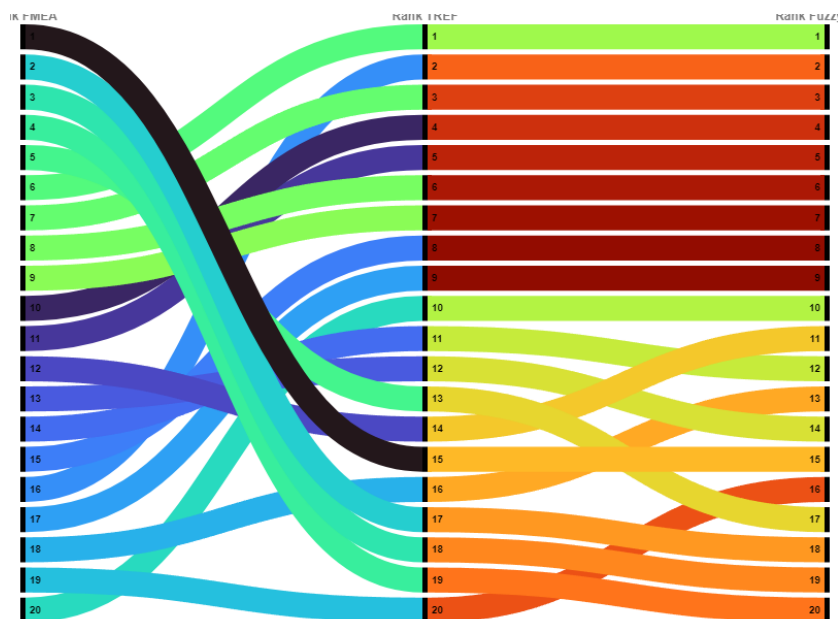
**T.3.b. [Egyszerűség] A multiplikatív aggregációs módszer majdnem olyan egyszerű, mint az FMEA (hibamód- és hatáselemzés), rendkívül kielégítő eredményeket ad, és könnyen megvalósítható.**

**T.3.c. [Folyamatlépések] A bemutatott folyamatlépések alkalmazásával könnyen megvalósítható a teljes módszertan a kockázatértékelés és a figyelmeztető rendszerek esetében is.**

Ezek az eredmények új perspektívát kínálnak az ellátási láncok kockázatelemzésének végrehajtásához, egyszerű módszert javasolnak a kockázatok értékelésére, beleértve a figyelmeztető rendszer bevezetésének lehetőségét abban az esetben, ha a kockázatot különböző területekről kell összehasonlítani.

Dolgozatom végén bemutattam egy intuitív módszert az új kockázatértékelés hatékonyságának összehasonlítására az Alluvian-gráfokon keresztül.

Az utolsó a kockázatértékelés utolsó 2 faktorának (összesen 5 faktoros lett) bevezetése utáni sorrendváltozást mutatja be (lásd [15](#) ábra):



15. ábra. FMEA - TREF Multiplikatív - TREF Fuzzy sorrendiségi változásai a 2 új faktor bevezetésére

## 5. Összegzés

Dolgozatomban az ellátási láncok kockázatelemzésében használt tényezők, skálák és aggregációs függvények vizsgálatát végeztem el. Az aggregáló függvények viselkedését elemeztem, hogy kiértékeljem őket. Az összes aggregáló függvényt értékeltem, beleértve a Fuzzy FMEA-t is, amely a standard FMEA után az egyik leggyakrabban használt aggregálási függvény. A javasolt megközelítéseket két esettanulmányon keresztül teszteltem, amelyeket különböző környezetben végeztek: ellátási lánc és karbantartás. Ez utóbbit érdekessége, hogy több irányítási rendszert érint, ezzel is kiemelve a figyelemre méltó rendszerek jelentőségét. Szintén az esettanulmányon keresztül mutattam be a modellek végrehajtási módszerét és validálását, a szakértői csoportok és a PDCA-módszertan felhasználásával.

## 5.1. A szakirodalomhoz való hozzájárulás

Jelenleg nincs általánosan elfogadott módszer a kockázatok aggregálására, amint azt a szakirodalmi elemzés is jelzi. A szerzők különböző egyedi aggregációs függvényeket használnak, mindazonáltal az optimális aggregációs kockázati függvény vagy keretrendszer vizsgálata szükséges a korábban nem használt kombinációk alkalmazásának megvalósíthatóságának megállapításához. Továbbá a szakirodalomban található olyan tanulmányok, amelyek 3-nál több kockázati tényezőt (nevezetesen 4 és 5) tartalmazó kockázatról szólnak. Jelenleg azonban nincs általánosan alkalmazható megközelítés a korlátlan számú elem aggregálására.

Ez a dolgozat egy újszerű kockázatértékelési keretrendszert mutat be, amely iránymutatást nyújt a további összetevők kiválasztásához. Olyan példákat is tartalmaz, amelyek a háromnál több kockázati tényező alkalmazása esetén szükséges aggregációs függvényeket mutatják be.

A figyelmeztető rendszerekről szóló meglévő szakirodalom nem foglalkozik a több szintről - például a tényező, a hatás, a mód és a folyamat - eredő figyelmeztető eseményekkel. Ez azt jelenti, hogy nincs lehetőség arra, hogy minden egyes kockázati tényezőre különálló figyelmeztető szabályokat hozzanak létre az egyes szinteken egymástól függetlenül.

A javasolt kockázati figyelmeztető rendszer egy olyan átfogó rendszer, amely hatékonyan kezelheti a korábban említett hiányosságokat. Egy esettanulmányban a bemutatott módszertant a gyakorlatban tesztelték, és pozitív eredményeket hozott.

## 5.2. Gyakorlati alkalmazás

A javasolt technika gyakorlati alkalmazása és hasznosítása volt a dolgozat egyik fő hangsúlya, és két vállalatnál a gyakorlatban is megvalósult.

Az elsődleges cél az volt, hogy az beszállítói lánc menedzsment (SCM) döntéshozói számára egy egyszerű megközelítést biztosítsak, mivel a szakirodalmi áttekintésből kiderült, hogy az SCM a kockázatelemzés leginkább

figyelmen kívül hagyott területe.

A megvalósítás mindkét esetben sikeres volt.

Megállapítható, hogy a két új tényező bevezetése jelentősen pontosította a tényleges kockázatok azonosítását, azaz jelentős károkat okozó kockázatok merültek fel. A bemutatott, valamint az esettanulmányban kifejtett módszertan könnyen megvalósítható az SCM döntéshozók számára. Ez segíti őket a felkészülést igénylő alapvető kockázatok azonosításában, és ennek következtében megkönnyíti az ilyen kockázatok azonosítását. A módszer végrehajtási lépéseinek az esettanulmányban történő átfogó kifejtése általánossá teszi a módszert, és az ellátási lánc menedzsmenten túli ágazatokban és iparágakban is alkalmazhatóvá teszi.

Példákat mutattam egy figyelmeztető rendszer esetében, bemutatva, hogy több irányítási rendszer (például a minőségügyi, valamint az egészségvédelmi és biztonsági) hogyan léphet kölcsönhatásba egymással. Ezek a kölcsönhatások hatékonyan azonosíthatják és felhívhatják a figyelmet a karbantartási tevékenységek során felmerülő magas kockázatú problémákra, értékes információkat szolgáltatva a döntéshozók számára.

Az eredményekkel kapcsolatban fontos kiemelni, hogy valamennyi R kód vagy Excel file elérhető, így szimulálhatók, szabadon variálhatók, ezáltal tesztelhetők a kockázati szintek, esetek különböző esetekre.

## 6. Publikációk

### **Hazai és nemzetközi referált folyóiratokban megjelent publikációk:**

- Zsolt Tibor Kosztyán, Tibor Csizmadia, Zoltán Kovács, Mihálcz István: Total risk evaluation framework, International Journal of Quality and Reliability Management, Emerald, Vol. 37, No.4, 2020, pp.575-608, ISSN: 0265-671X, doi:10.1108/IJQRM-05-2019-0167
- Zoltán Kovács, Tibor Csizmadia, István Mihálcz, Zsolt Tibor Kosztyán: Multipurpose Aggregation in Risk Assesment, Special Issue



Mathematical Methods and Operation Research in Logistics, Project Planning, and Scheduling, Mathematics 2021, 10, 3166, MDPI, pp.1-20, ISSN: 2227-7390, doi: 10.3390/math10173166

- Kovács Zoltán, Csizmadia Tibor, Mihálcz István, Kosztyán Zsolt Tibor: A vállalati kockázatkezelésben használt aggregálófüggvények jellemzése (The characterization of aggregation functions in enterprise risk management), STATISZTIKAI SZEMLE 100 (9), 821-853 ISSN: 0039-0690, doi: 10.20311/stat2022.9.hu0821
- István Mihálcz, Zsolt Tibor Kosztyán: REF - A Risk Evaluation Framework on Supply Chain, Special Issue Mathematical Methods and Operation Research in Logistics, Project Planning, and Scheduling, 2nd Edition, Mathematics 2024, 12, 841, MDPI, pp.1-23, ISSN: 2227-7390, doi: 10.3390/math12060841

#### **Konferenciák:**

- Istvan Mihalcz, Dr. Zsolt Tibor Kosztyán: Total Risk Evaluation networks, as a flexible risk analysis tool, 19th ANNUAL ENBIS CONFERENCE, Budapest, Hungary, 02-04.09.2019. pp. 100, ISBN/ISSN: 978-963-489-146-8
- Istvan Mihalcz, Dr. Zsolt Tibor Kosztyán: Risk assessment of corporate processes, Industry Days Conference "Challenges and Lessons in Management. Focus on Process Management - Industry 4.0 Challenges Conference, Debrecen, Hungary, 07-08.11.2019. pp. 62,
- Istvan Mihalcz: Risk Analysis in Supply Chain Using Fuzzy Functions, New Trends and Challenges in Management - Special Focus on Industry 4.0, Conference, Debrecen, Hungary, 31.03-01.04.2022.

## Hivatkozások

- (AIAG), A.I.A.G., 2019. Failure Mode and Effects Analysis - FMEA Handbook. volume 1. 1. ausgabe, korrigierter nachdruck ed., AIAG-VDA. URL: <https://www.aiag.org/store/publications/details?ProductCode=FMEAAV-1>.
- Aleksic, B., Djekic, I., Miocinovic, J., Memisi, N., Smigic, N., 2020. Application of FMEA analysis in the short cheese supply chain. *Meat Technology* 61, 161–173. doi:[10.18485/meattech.2020.61.2.6](https://doi.org/10.18485/meattech.2020.61.2.6).
- Bani-Mustafa, T., Zeng, Z., Zio, E., Vasseur, D., 2020. A new framework for multi-hazards risk aggregation. *Safety science* 121, 283–302.
- Bjørnsen, K., Aven, T., 2019. Risk aggregation: What does it really mean? *Reliability Engineering & System Safety* 191, 106524.
- Bognár, F., Hegedűs, C., . Analysis and consequences on some aggregation functions of PRISM (partial risk map) risk assessment method 10, 676. doi:[10.3390/math10050676](https://doi.org/10.3390/math10050676).
- Bowles, J.B., Peláez, C., 1995. Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis. *Reliability Engineering & System Safety* 50, 203 – 213. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/095183209500068D>, doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0951-8320\(95\)00068-D](http://dx.doi.org/10.1016/0951-8320(95)00068-D).
- Canbakis, S.K., Karabas, M., Kilic, H.S., Koseoglu, S., Unal, E., 2018. A risk assessment model for supply chains. *Pressacademia* 7, 122–125. doi:[10.17261/Pressacademia.2018.866](https://doi.org/10.17261/Pressacademia.2018.866).
- Cardiel-Ortega, J.J., Baeza-Serrato, R., . Failure mode and effect analysis with a fuzzy logic approach 11, 348. doi:[10.3390/systems11070348](https://doi.org/10.3390/systems11070348).
- Chakraborty, S., . TOPSIS and modified TOPSIS: A comparative analysis 2, 100021. doi:[10.1016/j.dajour.2021.100021](https://doi.org/10.1016/j.dajour.2021.100021).

- Chen, Y., Song, G., Yang, F., Zhang, S., Zhang, Y., Liu, Z., 2012. Risk assessment and hierarchical risk management of enterprises in chemical industrial parks based on catastrophe theory. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 9, 4386–4402. doi:[10.3390/ijerph9124386](https://doi.org/10.3390/ijerph9124386).
- Ebadi, A., Keyghobadi, A.R., Motadel, M.R., Yeganegi, M.R., 2020. The analysis of sustainable supply chain risks based on the finea method in the oil and gas industry and factors affecting risk management. *Petroleum Business Review* 4. doi:[10.22050/pbr.2020.115177](https://doi.org/10.22050/pbr.2020.115177).
- Ewa Kulinska, D.M., Dendera-Gruszka, M., 2021. New pplication of FMEA analysis in the eavy ndustry Supply Chain. *techreport vol. XXIV, issue 2B*, 600-616. *European Research Studies Journal*. URL: <https://www.ersj.eu/journal/2312/download>.
- Fang, H., Fang, F., Hu, Q., Wan, Y., . Supply chain management: A review and bibliometric analysis 10, 1681. doi:[10.3390/pr10091681](https://doi.org/10.3390/pr10091681).
- Fattahi, R., Khalilzadeh, M., 2018. Risk evaluation using a novel hybrid method based on fmea, extended multimoorra, and ahp methods under fuzzy environment. *Safety Science* 102, 290–300. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.018>.
- Geske, S.K..W...M., . Supply Chain Resilience: Insights from Theory and Practice. Springer International Publishing. doi:[10.1007/978-3-030-95401-7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-95401-7).
- Grabisch, M., Marichal, J.L., Mesiar, R., Pap, E., 2009. Aggregation functions. volume 127 of *Encyclopedia of mathematics and its applications*. Cambridge University Press. URL: <http://www.cambridge.org/9780521519267>. includes bibliographical references (p. 428-453) and index.
- Henke, O.K..H..Z., . Supply Chain Resilience: Reconceptualizing Risk Ma-

- agement in a Post-Pandemic World. Springer International Publishing. doi:[10.1007/978-3-031-16489-7](https://doi.org/10.1007/978-3-031-16489-7).
- Huang, J., You, J.X., Liu, H.C., Song, M.S., 2020. Failure mode and effect analysis improvement: A systematic literature review and future research agenda. *Reliability Engineering & System Safety* 199, 106885. doi:[10.1016/j.ress.2020.106885](https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106885).
- 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* 72, 133–143. doi:[10.1016/j.ssci.2014.08.011](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.08.011).
- Indrasari, L.D., Vitasromo, P., Pariyanto, A.Y.T., 2021. FMEA approach to risk factors as a factor in implementing green supply chain management (study in PT. gresik cipta sejahtera). *Journal of Physics: Conference Series* 1858, 012069. doi:[10.1088/1742-6596/1858/1/012069](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1858/1/012069).
- Johanyák, Z., Kovács, S., 2004. On the right selection of the fuzzy membership function. *GAMF Journal XIX*, 73–84. URL: [http://johanyak.hu/files/u1/publi/J\\_K\\_A\\_Fuzzy\\_Tagsagi\\_Fuggveny\\_GAMFK\\_2004.pdf](http://johanyak.hu/files/u1/publi/J_K_A_Fuzzy_Tagsagi_Fuggveny_GAMFK_2004.pdf).
- Kalantarnia, M., Khan, F., Hawboldt, K., 2009. Dynamic risk assessment using failure assessment and bayesian theory. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 22, 600–606. doi:[10.1016/j.jlp.2009.04.006](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.04.006).
- Kanes, R., Marengo, M.C.R., Abdel-Moati, H., Cranefield, J., Véchet, L., 2017. Developing a framework for dynamic risk assessment using bayesian networks and reliability data. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 50, 142–153. doi:[10.1016/j.jlp.2017.09.011](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.09.011).
- 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* 98, 116–147. doi:[10.1016/j.psep.2015.07.005](https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.07.005).

- Koszttyán, Z.T., Csizmadia, T., Kovács, Z., Mihálcz, I., 2020. Total risk evaluation framework. *International Journal of Quality & Reliability Management* , 575–608doi:<https://doi.org/10.1108/IJQRM-05-2019-0167>.
- Kozarević, S., Puška, A., . Use of fuzzy logic for measuring practices and performances of supply chain 5, 150–160. doi:[10.1016/j.orp.2018.07.001](https://doi.org/10.1016/j.orp.2018.07.001).
- Kubler, S., Robert, J., Derigent, W., Voisin, A., Traon, Y.L., . A state-of-the-art survey & testbed of fuzzy AHP (FAHP) applications 65, 398–422. doi:[10.1016/j.eswa.2016.08.064](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.08.064).
- Ling, W.K., 2004. *Nonlinear Digital Filters*. Elsevier Ltd, Amsterdam Boston London.
- Liu, H.C., Liu, L., Liu, N., 2013a. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert Systems with Applications* 40, 828 – 838. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417412009712>, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.010>.
- Liu, H.C., Liu, L., Liu, N., 2013b. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert systems with applications* 40, 828–838.
- Liu, H.C., You, J.X., Ding, X.F., Su, Q., 2015. Improving risk evaluation in fmea with a hybrid multiple criteria decision making method. *International Journal of Quality & Reliability Management* 32, 763–782.
- Lolli, F., Ishizaka, A., Gamberini, R., Rimini, B., Messori, M., 2015. FlowSort-GDSS – a novel group multi-criteria decision support system for sorting problems with application to FMEA. *Expert Systems with Applications* 42, 6342 – 6349. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417415002584>, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2015.04.028>.

- Lu Lu, R.Z., de Souza, R., 2018. Enhanced fmea for supply chain risk identification, in: Hamburg University of Technology (TUHH), I.o.B.L., Management, G. (Eds.), *The Road to a Digitalized Supply Chain Management: Smart and Digital Solutions for Supply Chain Management*, epubli. pp. 311–330. URL: <https://econpapers.repec.org/bookchap/zbwhic1ch/209355.htm>, doi:10.15480/882.1783.
- Malekitabar, H., Ardeshir, A., Sebt, M.H., Stous, R., Teo, E.A.L., 2018. On the calculus of risk in construction projects: Contradictory theories and a rationalized approach. *Safety Science* 101, 72–85. doi:10.1016/j.ssci.2017.08.014.
- Manuele, F.A., 2005. Risk assesment & hierarchies of control. *Safety Management*, 33–39 URL: <https://aeasseincludes.assp.org/professionalsafety/pastissues/050/05/030505as.pdf>.
- Merrick, J.R.W., van Dorp, J.R., Singh, A., 2005. Analysis of correlated expert judgments from extended pairwise comparisons. *Decision Analysis* 2, 17–29. doi:10.1287/deca.1050.0031.
- Mustaniroh, S.A., Murod, F.A.I.K., Silalahi, R.L.R., 2020. The risk assessment analysis of corn chips supply chain using fuzzy FMEA. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 475, 012052. doi:10.1088/1755-1315/475/1/012052.
- Øien, K., Utne, I., Herrera, I., 2011. Building safety indicators: Part 1 – theoretical foundation. *Safety Science* 49, 148–161. doi:10.1016/j.ssci.2010.05.012.
- O’Keeffe, V.J., Tuckey, M.R., Naweed, A., 2015. Whose safety? flexible risk assessment boundaries balance nurse safety with patient care. *Safety Science* 76, 111–120. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2015.02.024.

- Panchal, D., Chatterjee, P., Yazdani, M., Chakraborty, S., 2019. A hybrid mcdm approach-based framework for operational sustainability of process industry, in: *Advanced Multi-Criteria Decision Making for Addressing Complex Sustainability Issues*. IGI Global, pp. 1–13.
- Pedraza, T., Rodríguez-López, J., 2020. Aggregation of l-probabilistic quasi-uniformities. *Mathematics* 8, 1980.
- Pedraza, T., Rodríguez-López, J., 2021. New results on the aggregation of norms. *Mathematics* 9, 2291.
- 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* 41, 8157 – 8164. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417414003832>, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2014.06.042>.
- Shaker, F., Shahin, A., Jahanyan, S., 2019. Developing a two-phase qfd for improving fmea: an integrative approach. *International Journal of Quality & Reliability Management* .
- Sime Curkovic, Thomas Scannell, B.W., 2013. Using fmea for supply chain risk management. *Modern Management Science Engineering* 1, 251–256. URL: [https://www.researchgate.net/publication/263733916\\_Using\\_FMEA\\_for\\_Supply\\_Chain\\_Risk\\_Management](https://www.researchgate.net/publication/263733916_Using_FMEA_for_Supply_Chain_Risk_Management).
- Spreafico, C., Russo, D., Rizzi, C., 2017. A state-of-the-art review of fmea/fmeca including patents. *computer science review* 25, 19–28.
- 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* 23, 1047–1066. doi:[10.1108/02656710610688202](https://doi.org/10.1108/02656710610688202).
- Trenggonowati, D.L., Bahauddin, A., Ridwan, A., Wulandari, Y., 2021. Proposed action of supply chain risk mitigation air compressor type l unloading

- $\frac{1}{4}$  HP using the fuzzy – FMEA and fuzzy – AHP method in PT. XYZ. *Journal of Innovation and Technology* 2, 10–17. doi:[10.31629/jit.v2i1.3204](https://doi.org/10.31629/jit.v2i1.3204).
- Trenggonowati, D.L., Ulfah, M., Arina, F., Lutfiah, C., 2020. Analysis and strategy of supply chain risk mitigation using fuzzy failure mode and effect analysis (fuzzy fmea) and fuzzy analytical hierarchy process (fuzzy ahp). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 909, 012085. doi:[10.1088/1757-899x/909/1/012085](https://doi.org/10.1088/1757-899x/909/1/012085).
- Vodenicharova, M., 2017. Opportunities for the applications of FMEA model in logistics processes in bulgarian enterprises. *Logistics & Sustainable Transport* 8, 31–41. doi:[10.1515/jlst-2017-0003](https://doi.org/10.1515/jlst-2017-0003).
- Wagner, S.C.T.S.B., 2016. *Managing Supply Chain Risk, Integrating with Risk Management*. CRC Press, Taylor Francis Group, LLC. URL: [https://www.ebook.de/de/product/24417566/sime\\_curkovic\\_thomas\\_scannell\\_bret\\_wagner\\_managing\\_supply\\_chain\\_risk.html](https://www.ebook.de/de/product/24417566/sime_curkovic_thomas_scannell_bret_wagner_managing_supply_chain_risk.html).
- Wan, C., Yan, X., Zhang, D., Qu, Z., Yang, Z., 2019. An advanced fuzzy bayesian-based FMEA approach for assessing maritime supply chain risks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 125, 222–240. doi:[10.1016/j.tre.2019.03.011](https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.03.011).
- Wu, X., Wu, J., 2021. The risk priority number evaluation of FMEA analysis based on random uncertainty and fuzzy uncertainty. *Complexity* 2021, 1–15. doi:[10.1155/2021/8817667](https://doi.org/10.1155/2021/8817667).
- Xu, K., Tang, L., Xie, M., Ho, S., Zhu, M., 2002. Fuzzy assessment of fmea for engine systems. *Reliability Engineering & System Safety* 75, 17 – 29. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832001001016>, doi:[10.1016/S0951-8320\(01\)00101-6](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(01)00101-6).
- Yacob Khojasteh, Henry Xu, S.Z., . *Supply Chain Risk Mitigation: Strategies, Methods and Applications*. Springer International Publishing. doi:[10.1007/978-3-031-09183-4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-09183-4).



- Yazdi, M.M., . TOPSIS method for multiple-criteria decision making (MCDM). URL: <https://CRAN.R-project.org/package=topsis>.
- Zahedi Khameneh, A., Kilicman, A., . Some construction methods of aggregation operators in decision-making problems: An overview 12, 694. URL: <https://www.mdpi.com/2073-8994/12/5/694#:~:text=Therearethree mainconstruction,handledbyeachofthem.>, doi:10.3390/sym12050694.
- Zammori, F., Gabbrielli, R., 2012. Anp/rpn: a multi criteria evaluation of the risk priority number. *Quality and Reliability Engineering International* 28, 85–104. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qre.1217/abstract>, doi:10.1002/qre.1217.
- Zhao, L., Huo, B., Sun, L., Zhao, X., . The impact of supply chain risk on supply chain integration and company performance: a global investigation 18, 115–131. doi:10.1108/13598541311318773.
- 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* 50, 228–239. doi:10.1016/j.ssci.2011.08.042.
- Zhu, Q., Golrizgashti, S., Sarkis, J., 2020. Product deletion and supply chain repercussions: risk management using FMEA. *Benchmarking: An International Journal* 28, 409–437. doi:10.1108/bij-01-2020-0007.