



Pannon Egyetem

Gazdálkodás- és Szervezéstudományok Doktori Iskola

Tézisgyűjtemény

Beszállítói hálózatok kockázatelemzése

Készítette:

Mihálcz István

Témavezető:

Prof. Dr. habil. Kosztyán Zsolt Tibor

2024. augusztus 30.

1. Bevezetés

Összekapcsolt, globalizált világunkban az ellátási láncok döntő szerepet játszanak, és nemcsak a vállalkozásokra, hanem a mindennapi polgárookra 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, komissiózás, 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](#)).

A beszállítói hálózatok kockázatelemzésének elvégzése sokrétű feladat, amely számos elemet érint, például a beszállítókat, azok értékesítési vagy raktározási központjait, az áruk közöttük és a vevőkhöz történő szállításának rendszerét, az áruk átvételének eljárásait (azonosítás, raktározás) és az áruk termelésbe történő átadását. Jelenleg nincs kialakult kockázatértékelési módszertan ennek a bonyolult rendszernek a hatékony kezelésére, és a témában meglévő szakirodalom más területekhez képest korlátozott.

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 a felelős döntéshozóknak a potenciális kockázatok egyszerű megállapításában. Ezzel kapcsolatban a kutatási kérdéseimet a következőképpen fogalmaztam meg:

K.1. Milyen módon lehet egy 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, ami a különböző területeken és esetleg új tényezők/faktorok figyelembevételével elemzi a kockázatokat, összegasonlítva a korábban nem vizsgált kombinációk alkalmazásának eredményeit. 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 - ami kiemelten igaz egy olyan bonyolult rendszernél, mint az ellátási láncok. 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) is 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, melyeket egymástól függetlennek tekintenek (Liu et al., 2013a). Az új kockázati tényezők figyelmen kívül hagyásának egyik lehetséges oka az, hogy el kell ismer-ni azok kölcsönös függőségét. Ezek a problémák olyan innovatív meg-oldásokat 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 leggyak-rabban 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). 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, hiba-elemzés, kockázatelemzés, optimalizálás és az eredmények dokumentálása). Az FMEA hatékonyságának és eredményességének mérésére szolgáló mérőeszköz használata,

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 továbbra is ahhoz, hogy a kockázatértékelőket segítse abban, hogy megértsék, mely veszélyek jelentősebbek.

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 kockázatok rangsorolására, hogy a kockázat súlyosságát, észlelhetőségét és előfordulását a meghibásodás/nemmegfelelőség 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 keretrendszerről, 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 ha-

gyományos kockázatértékelés hátránya, hogy szigorú (Kalantarnia et al., 2009), ismételten egyetlen indexet (Zheng et al., 2012) vagy a figyelmeztető mutatók listáját (Øien et al., 2011) fogadja el a figyelmeztető események jelzésére, és nem képes megragadni a ténylegesen fontos hibákat. Számos erőfeszítés történt a kockázatértékelés figyelmeztető/előrejelző 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 (domainek) különböző súlyozásokkal vehetők figyelembe a kockázatértékelésben. Összefoglalva, a prioritások és az igények területenként eltérőek lehetnek, ami rugalmas kockázat-összevonást kíván. Ahogy Kanés et al. (2017) megállapította, fontosabb a rugalmas kockázatértékelés területére összpontosítani, mint a jelenlegi kockázatértékelési módszerek javításának dolgozni. O’Keeffe és csapata is hangsúlyozta, hogy a kockázatértékelési folyamatnak inkább rekurzívnak, mint lineárisnak, inkább rugalmasnak, mint merevnek, és inkább pluralistának, mint binárisnak kellene 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 döntéshozóknak a potenciális kockázatokról, mivel azok nem összesósódnak a többi értékkel, ha egy halmazban csak egyszer fordulnak elő. Kiemelésükkel és határértékhez történő hozzárendelésükkel a döntéshozókban jobban tudatosul jelentőségük 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 elemzése alapján a kockázatértékelés a kiadványok rangsorábanm csupán a tizennegyedik helyen áll.

A Covid-19 világjárvány új korszakot nyitott az ellátási lánc menedzsment

területén. Az ellátási láncsal kapcsolatos cikkek számának hirtelen megnövekedésével ftalálkozhattunk. Ezek száma 2024-re 18 000-re fog növekedni. A kockázat, az FMEA és a Fuzzy FMEA aránya a cikkek számához viszonyítva nem változott a [Fang et al.](#) által bemutatott arányokhoz képest, csak a cikkek száma növekedett. Ezt a megállapítást alátámasztja a [Emrouznejad et al.](#) által végzett szakirodalmi összefoglaló is.

Több szerző ([Sime Curkovic, 2013](#); [Wagner, 2016](#); [Vodenicharova, 2017](#)) vizsgálta az FMEA és más kockázatelemzési módszerek korlátozott alkalmazásának okait az ellátási láncok kockázatelemzésénél. A kutatók 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](#); [Trenggonowati 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 Gabbriellini, 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 leggyakrabban 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 megfelelősége 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 vagy a döntéshozók felé, hogy mely kockázatokat kell prioritásként kezelni.

4. Kutatási eredmények és tézisek

A szakirodalomban 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.

Ezért lettek meghatározva az aggregációs függvények kritériumaiként, 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.
- $S_3(\mathbf{f}) = \text{Median}(\{\{\mathbf{f}\}\})$ 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. $S_5(\mathbf{f}) \in [\sqrt{n}, 10\sqrt{n}] \in \mathbb{R}^+$.
- $S_6(\mathbf{f}) = \text{Fuzzy tagsági függvények aggregálása a szabálybázis alapján.}$ 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 *Geometrikusközépérték* és a *Logaritmikus* is rendelkezésre állnak, ezek viselkedése azonban hasonló a korábban ismertetett függvényekéhez.

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

A Fuzzy FMEA jellemzően három-hét nyelvi változót használ ([Kozarević and Puška](#); [Cardiel-Ortega and Baeza-Serrato](#)). Az intervallum kezdetén és végén a szigmoid függvény lett alkalmazva, és az intervallumon belüli minden egyes tartományra a harang/szórás függvények. Mind a szigmoid, mind a harang Gauss-tagsági függvények, amelyeket simaságuk, minden pontban/intervallumban nem nulla értékük, folytonosan differenciálhatók, valamint matematikai és számítási könnyebbségük miatt lettek kiválasztva

(Johanyák and Kovács, 2004). Az eredeti értékének vagy crisp-jének megfelelően, minden egyes komponens n tagsági függvények összegévé alakul át.

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

$$W_i(\mathbf{S}_i) = S_1(\mathbf{f}_i) \otimes S_2(\mathbf{f}_j) \otimes \dots \otimes S_n(\mathbf{f}_n) \quad (1)$$

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.

4.1. Az alkalmazott aggregáló függvények elemzése

Két módszerrel próbáltam az aggregáló függvényeket összehasonlítani.

- Az egyik az, amikor a függvények kimeneti argumentumainak **targetománya 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 került alkalmazásra, és az esettanulmányban bemutatva. Ennek érdekében rangsorolási technikákat kell alkalmazni a

TOPSIS-módszeren keresztül az RSTUDIO TOPSIS algoritmusának felhasználásával.

4.2. Az aggregációs függvények értékelése

Hat kockázati aggregációs függvény lett elemezve, 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.

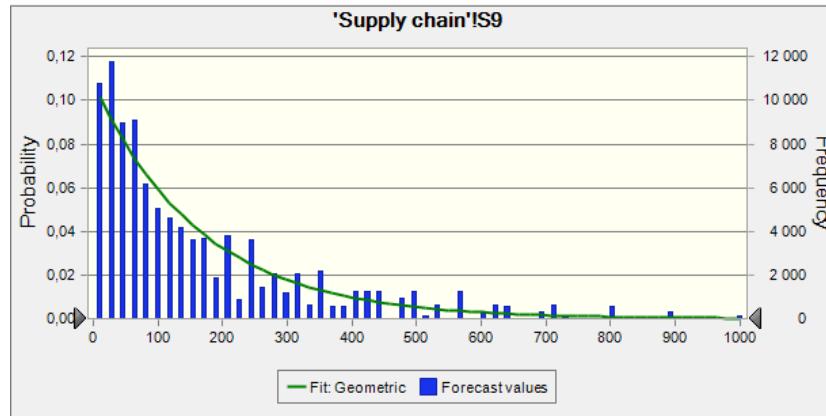
Az Oracle Crystal Ball segítségével végzett szimulációk átfogó összefoglalása a [1](#) táblázatban található.

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

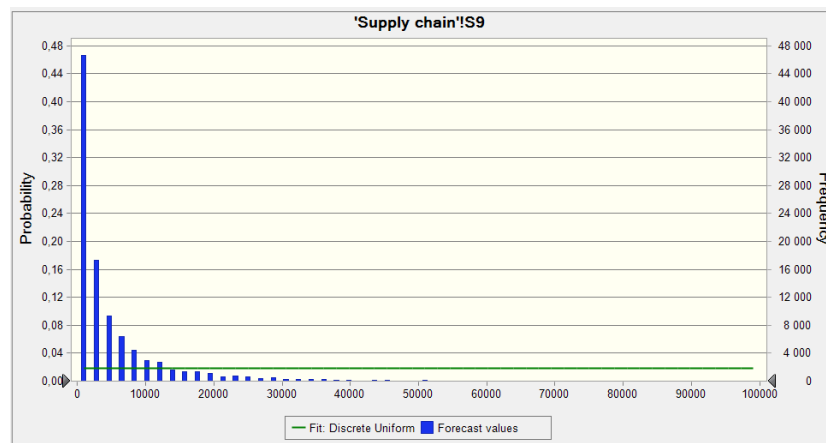
Item	FMEA	TREF Multi	TREF Aver	TREF Median	TREF EucDist	TREF Fuzzy
Factors	3	5	5	5	5	5
Skewness	1.66	3.34	-.0025	-.003	-.32	3.28
Kurtosis	5.77	18.84	2.36	2.37	3.02	17.91
Min	1	1	1	1	2	8
Max	1000	100000	10	10	22	77348

A [1](#) 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 [1](#) táblázatban szereplő ferdeség a

szimmetria hiányára vonatkozik.



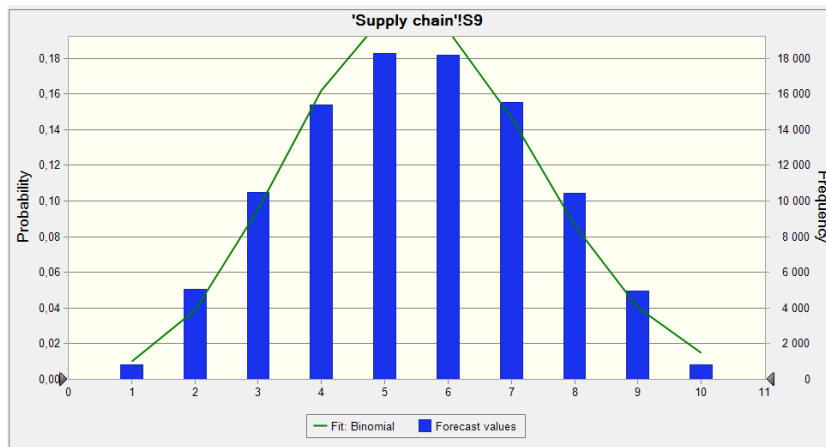
1. ábra. Standard FMEA gyakorisági és értékelozslása



2. ábra. TREF Szorzási gyakorisági és értékelozslása

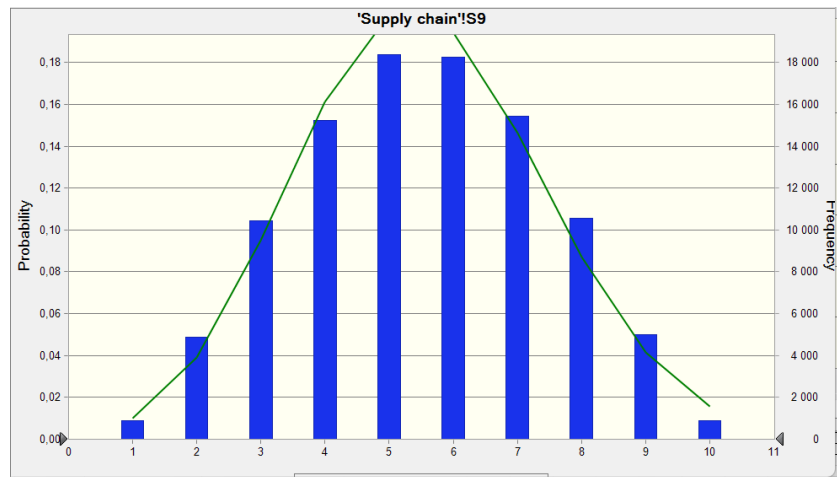
A **Multiplikatív/szorzó aggregáló** függvényekkel kapott eredmények, amint azt az 2 ábra mutatja, a hagyományos FMEA-val kapott eredményekkel összehasonlítható szintet mutatnak. Ez a jelenleg leggyakrabban alkalmazott aggregálási módszer. Fontos kiemelni, hogy ez az aggregációs függvény kizárólag a $[1, 10^n]$ tartományon belüli kisse számú 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-ból) 21, öt faktor esetén (100 000-ból) 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.



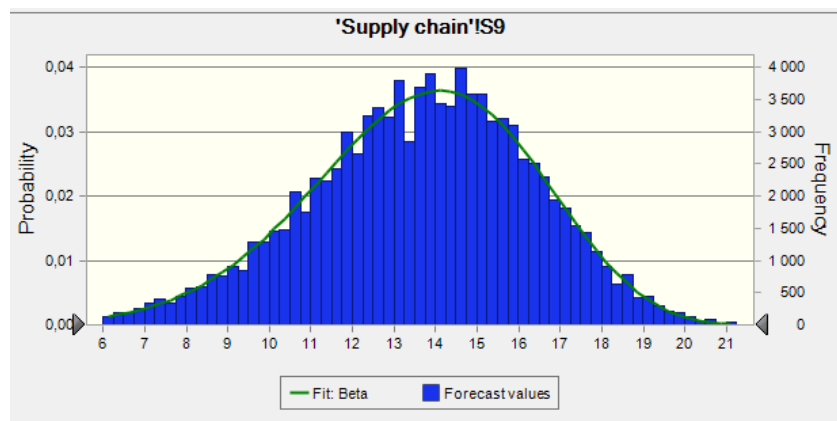
3. ábra. TREF számtani átlag gyakorisági és értékeloszlása

A 3 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. Ennél az aggregáló függvénynél az alacsony értékű komponensek jelenléte hatékonyan enyhíti a szélsőséges értékek hatását, és így akadályozza a potenciális kockázatok azonosítását és elemzését.



4. ábra. TREF Medián gyakorisági és értékeloszlása

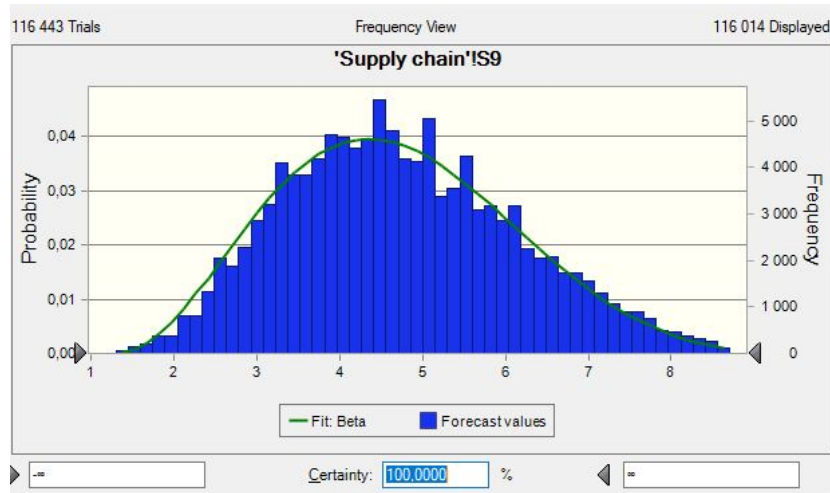
A **Median aggregáció** adja a legalacsonyabb Skewness/ferdeség pontszámot, amint azt az 4 ábra mutatja, ami arra utal, hogy az adatok nagyfokú szimmetriát mutatnak. Az adatkészletünk Kurtosis pontszáma meglehetősen alacsony, ami az adatok mérsékelt mértékű testreszabottságára utal. A számítás a gyakorlatban nem egyszerű. A skála viszonylag durva, és csak homogén kockázati komponensek esetén tekinthető helyesnek. Ez a helyzet hasonlóságot mutat az átlagos aggregációs megközelítéssel.



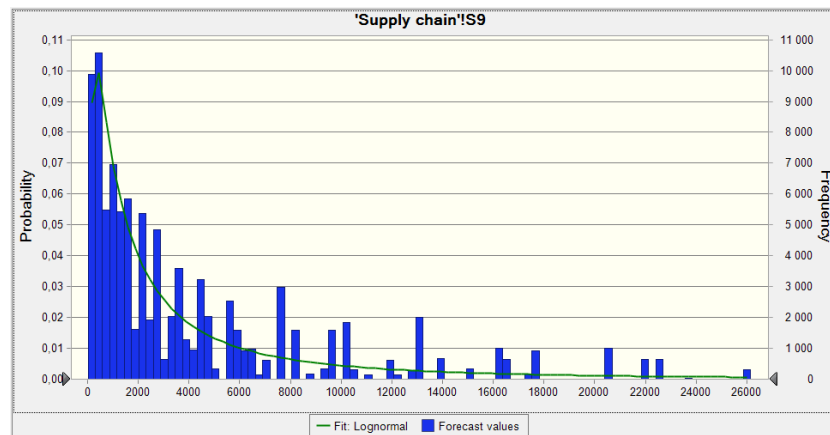
5. ábra. TREF Euclidészi távolság gyakorisági és értékeloszlása

A linearitás csak átlagos, és a számítás kihívást jelent a **Euklideszi távolság (általánosított) aggregátum** esetében (lásd 5 ábrát). Az

értelmezés kihívást jelent az n -dimenziós térben, ahol $n > 3, n \in \mathbb{N}$. Az euklideszi távolság gyakoriság/érték eloszlása nagyon hasonlít a geometriai átlaghoz. Az esettanulmány alapján nyilvánvaló, hogy ez a függvény a harmadik helyen áll a vizsgált függvények között.



6. ábra. TREF Geometriai átlag gyakorisági és értékeloszlása



7. ábra. TREF Fuzzy gyakorisági és értékeloszlása

A **Fuzzy aggregációs** függvény (lásd 7 ábra) eredményadatai, amelyeket az alkalmazott tagsági és defuzzifikációs függvények határoznak meg, hasonlóságot mutatnak a TREF-szorzásával. A számítás nagyon össze-

tett, és tapasztalatot igényel. Fontos azonban megjegyezni, hogy a kimenet mindössze öt elsődleges csoportból áll (lásd ?? ábra).

A szorzási függvényt a geometriai középértékkel és az általános euklideszi távolsággal összehasonlítva a kimeneti értékek számai megegyeznek. A gyakorisági/értékeloslási diagramok alakja ezért döntő fontosságú. Ezt figyelembe véve, az eloszlási grafikon alakja alapján a szorzási aggregációs függvénynek kevesebb értéke van a magas tartományban, a geometriai közép aggregációs függvénynek több, az euklideszi távolság aggregációs függvénynek pedig több, mint a geometriai középnek. Az ábrák alakjától függően az adatszerkezet alapján választhatunk aggregációs függvényt. Ha a kimeneti tartományt ki kell terjesztenünk, a legjobb megoldás a multiplikatív aggregációs függvény használata. Ha a felső tartományban több értéket szeretnénk megkülönböztetni, használhatjuk a geometriai középértékeket. Alternatívaként, ha a felső tartományban nagyobb mennyiségű adatra van szükségünk, akkor az általános euklideszi távolságot használhatjuk. Az esettanulmány szerint az Euklideszi távolság függvény az összes értékelte függvény közül a harmadik helyre került.

Tekintettel a fent említett rugalmas aggregációs funkciók előnyeire, az általánosított teljes kockázatértékelési keretrendszer hatékonyan kezelheti a különböző szintű kockázatokat. Ez magában foglalja a teljes ellátási láncot, integrálva a belső logisztikai folyamatokból származó kockázatokat, a szállítmányozó és logisztikai vállalatokkal kapcsolatos kockázatokat, valamint a beszállítók értékelésével kapcsolatos kockázatokat.

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.

A *riasztási esemény* bekövetkezik, ha

- (W1) ha legalább $n^{(N-1)}$ kockázati faktor értéke alacsonyabb, mint egy meghatározott szint;
- (W2) ha legalább $n^{(N)}$ aggregált kockázati érték nem kisebb, mint egy meghatározott szint are not lower than the specified threshold;
- (W3) ha 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. \(2005\)](#)).

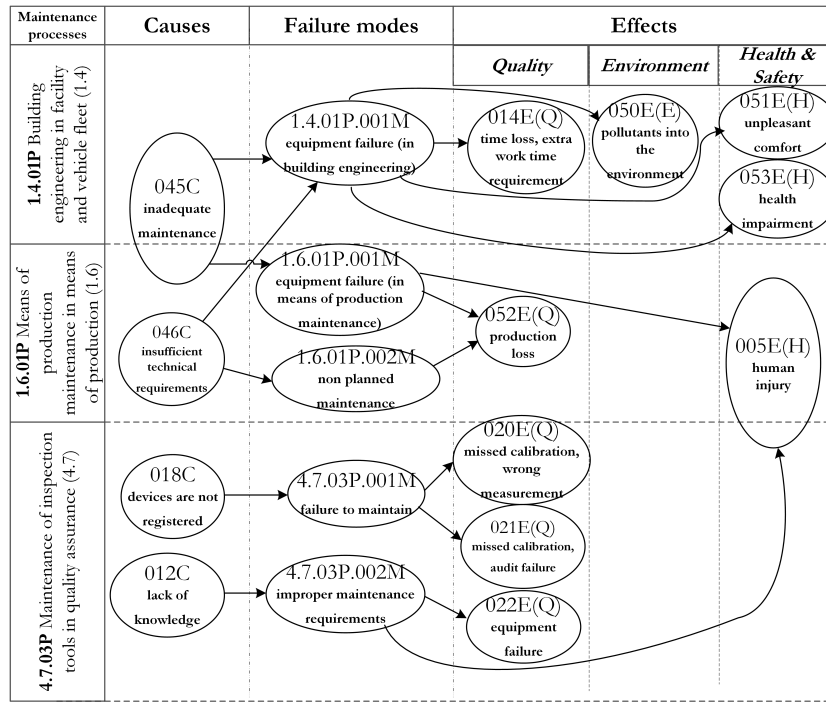
A *kockázat-aggregációs protokoll* iteratív alkalmazásával a kockázatértékek magasabb hierarchiaszinten is megadhatók.

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 8 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 8 ábra). A különböző hibamódok és kockázati hatások azonban azonos okokkal rendelkezhetnek (közös okok) (lásd 9 ábra). Az egyetlen korlátozás a folyamathierarchiában a ciklusok elkerülése.



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

Az 10 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 10 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	2.6666667	4	3	5	0.8	2.433	2.907					
Health & Safety											TRPN				Failure effect
		Occurrence	Severity	Detection	Control	Information	Range	Criticality	Geome-trical	Un-weighted Geom.	Weighte Median	Radial	Max Value		
	weight:	0.2265	0.4461	0.0833	0.1325	0.0352	0.0765	1	(f,w,S1)	(f,1,S1)	(f,w,S3)	(f,w,S4)	(f,1,S2)		
Effect	Critical value	3	2	5	4	4	4	0	3	3	3	3	3		
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.															

10. 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 (kivételem 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 vállalaton belüli egységes kockázatértékelési rendszerbe, és az ellátási lánc pont ilyen eset.

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

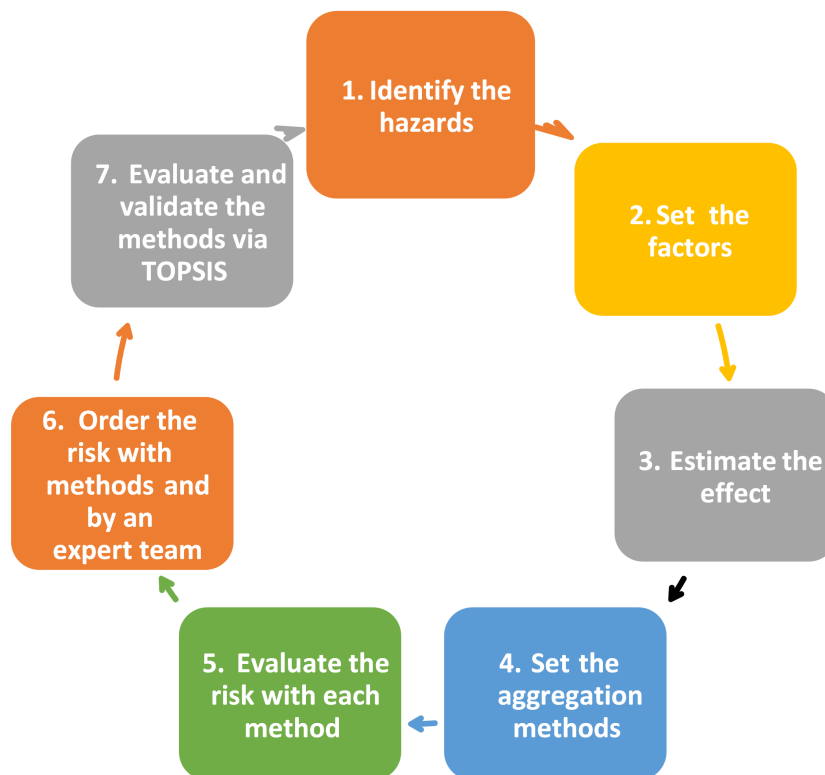
- Egy kockázatértékelési vagy FMEA-csoportra, amelynek tagja egy FMEA-moderátor is.
- A kockázatértékelési folyamat rendszeres felülvizsgálata a PDCA módszertan alapján.

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

A disszertáció harmadik kutatási kérdésének megválaszolásaként az volt a cél, 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 11. ábra az értékelés lépéseit mutatja be, amelyeket az elméleti keretrendszer és az esettanulmány későbbi elemzése során is felhasználunk.



11. ábra. A megfelelő kockázatértékelési módszer meghatározása.

Szint 0. lépés–A csapat megalakítása: A logisztika, a minőségirányítás, a kockázatfelmérés, az értékelés és a kockázatcsökkentés terén speciális ismeretekkel rendelkező szakértőkből álló csoportot kell létrehozni, beleértve az összes érintett részleget, például a pénzügyi/kontrolling vagy más részlegeket.

1. lépés—Kockázatok azonosítása: Ez a lépés az ellátási láncsal kapcsolatos összes lehetséges problémák átfogó összegyűjtése, amely magában foglalja a kárigényeket/történelmet, híreket, veszteségeket és késedelmeket, piaci visszajelzéseket, a kiberbiztonsági trendeket stb.

2. lépés—Tényezők és mérlegek meghatározása: Az 1. lépésből származó listát kell felhasználni a kockázatot leíró legpontosabb tényezők és azok szervezeti, részleg vagy folyamat hatásainak azonosítására. Ez a fázis kivételesen nagy kihívást jelent. Az FMEA-ban szereplő tényezők, 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. Ezen felül 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 mérték. A tényezők mennyisége az üzleti vagy logisztikai eljárások bonyolultságától, a forgalmi mintáktól, az üzleti kapcsolatoktól és egyéb releváns szempontoktól (pl. fenntarthatóság, energiatakarékosság, kiberbiztonság, ...) függ. Elengedhetetlen, hogy ezeket a tényezőket minden egyes vállalat esetében eseti alapon értékeljük, 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 figyelembe venni, hogy az új tényezőknek nem szabad jelentős kapcsolatot mutatniuk a már kiválasztott vagy felhasznált tényezőkkel. Minimális lesz a korreláció, mert minden új komponens valamilyen módon kapcsolódhat az FMEA által alkalmazott alaptényezőkhöz. A vizsgálatot a MiniTab Correlation vagy Correlogram funkcióival vagy más statisztikai programokkal lehet elvégezni, amelyek rendelkeznek ezekkel a funkciókkal a 3. lépésben.

3. lépés—Kockázatértékelés: Ebben a szakaszban meghatározzuk az

egyes kockázatok tényezőinek szintjét. Ez a lépés lehetővé teszi az újonnan kiválasztott tényezők és a meglévő tényezők közötti korreláció tesztelését. Ha jelentős összefüggés mutatkozik, az azt jelzi, hogy az új komponens nem nyújt többletértéket, és egyszerűen egy meglévő tényező viselkedését ismétli. Ebben az esetben célszerű kizárni ennek az új tényezőnek a felhasználását.

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

5. lépés—A kockázati szintek meghatározása az aggregáló függvényekkel:

Minden szervezet önállóan dönthet arról, hogy elfogadja-e, enyhíti-e, vagy tudomásul veszi-e a konkrét veszélyeket. A fent említett információk alapján a vállalat vezetés vagy a kockázatértékelő szakértői csoport megállapíthatja azokat a konkrét szempontokat, amelyek a kock

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 validálás: Az eredmények értékelése ebben a fázisban jelentős jelentőséggel bír, és gondos és stratégiai előkészítést igényel. A kockázatértékelési szakértői csoportot arra lett kérve, hogy a legtapasztaltabb személyekből álló bizottságot hozzon létre az önálló értékeléshez, nem ismertetve velük a számításokkal létrehozott rangsorolások kockázatértékelés eredményeit. Ez azt jelzi, hogy a megjelölt személyek nem férnek hozzá a TOPSIS rangsorolás kimeneti értékeihez és az aggregációs funkciók eredményeihez.

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 összehasonlítását 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 számos cég alkalmazza az úgynevezett integrált irányítási rendszert kockázatalapú megközelítéssel, valójában külön-külön működtetik minőség-, környezet-, energiatakarékossági és információbiztonsági irányítási rendszereiket. 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 rendszerek belső auditáló csoportjaitól, 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 figyelmen 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.

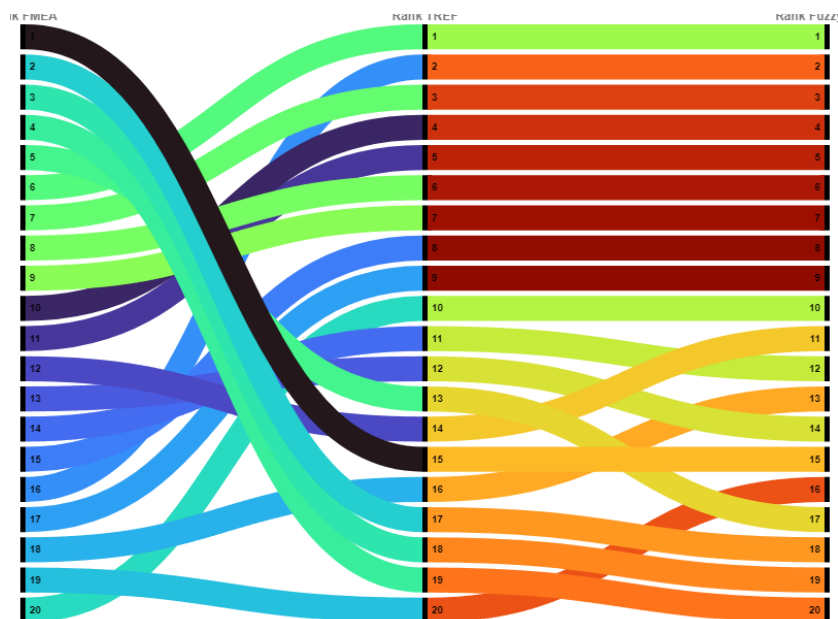
T.3.b. [Egyszerűség] A multiplikatív aggregációs módszer majdnem olyan egyszerű, mint az FMEA (hibamód- és hatáselemzés), rendkívül kielégítő eredményeket ad, és könnyen megvalósítható.

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 [12](#) ábra):



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

Az 12 ábra szerint a Tref Multiplikatív és a TREF Fuzzy közötti elsődleges különbség a tényezők szintjeiben van. A TREF Multiplikatív modellben minden egyes tényezőnek 10 szintje van, a Fuzzy modell azonban lehetővé teszi, hogy minden egyes tényezőnek 5 tagsági függvénye legyen, ami a szintek csökkentését eredményezi. A defuzzifikációnál a súlypont megközelítést alkalmaztuk.

5. Összegzés

A disszertációban az ellátási láncok kockázatelemzésében használt tényezők, skálák és aggregációs függvények tanulmányozására került sor. Az aggregáló függvények viselkedését elemeztem azok értékelése érdekében. Az összes aggregáló függvényt értékeltem, beleértve a Fuzzy FMEA-t is, amely a standard FMEA után az egyik legszélesebb körben alkalmazott. A javasolt megközelítéseket két esettanulmányon keresztül teszteltem, amelyeket különböző környezetekben végeztek: ellátási lánc és karbantartás. Ez utóbbit

több területen is felhasználták, hogy hangsúlyozzák a figyelmeztető rendszer jelentőségét. Szintén az esettanulmányon keresztül bemutattam, hogy a szakértői csoportok a PDCA-módszertan alkalmazásával hogyan fejlesztik és egyben validálják a bemutatott kockázatelemzési és riasztási szinteket meghatározó módszert.

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 találhatók 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 olyan kockázátértékelési keretrendszert mutat be, amely iránymutatást nyújt a további összetevők kiválasztásához. Olyan példákat is tartalmaz, amelyek a háromnál több kockázati tényező alkalmazása esetén szükséges aggregációs funkciót mutatják be.

A figyelmeztető rendszerekkel kapcsolatos meglévő szakirodalom nem foglalkozik a több szinten, például tényező, hatás, mód és folyamat szintjén felmerülő figyelmeztető eseményekkel. Ez azt jelenti, hogy nincs rendelkezés arra, hogy minden egyes kockázati tényezőre különálló figyelmeztető szabályokat hozzanak létre minden egyes szinten függetlenül.

A javasolt kockázati figyelmeztető rendszer egy olyan átfogó rendszer, amely hatékonyan kezelheti a korábban említett hiányosságokat. Az esettanulmányokban a bemutatott módszert 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 egy egyszerű megközelítést nyújtsunk az SCM döntéshozók számára, mivel a szakirodalmi áttekintésből kiderült, hogy az SCM a kockázatelemzés legelhanyagoltabb területe, és egyben az egyik legösszetettebb rendszer a kockázatértékelés szempontjából.

A megvalósítás mindkét esetben sikeres volt.

Megállapítható, hogy a két új tényező bevezetése jelentősen meghosszabbította a tényleges kockázatok, azaz a jelentős károkat (pénzügyi, imázs, késések) okozó kockázatok azonosítását. A bemutatott, valamint az esettanulmányban kifejtett módszertan az SCM döntéshozók számára könnyen megvalósítható. Ez segíti őket a felkészülést igénylő alapvető kockázatok azonosításában. A módszer megvalósítási lépéseinek az esettanulmányban szereplő átfogó kifejtése általánossá és alkalmazhatóvá teszi azokat az ellátási lánc menedzsmenten kívüli ágazatokban és iparágakban is.

Példával mutattam be egy figyelmeztető rendszer esetében, hogy több irányítási rendszer (például a minőségügyi és a munkavédelmi) 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.

6. Publikációk

MTMT profilom: [Mihálcz István](#)

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 Assessment, 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.
- 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).
- 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).
- Emrouznejad, A., Abbasi, S., Sıcakyüz, , . Supply chain risk management: A content analysis-based review of existing and emerging topics 3, 100031. doi:[10.1016/j.sca.2023.100031](https://doi.org/10.1016/j.sca.2023.100031).
- Ewa Kulinska, D.M., Dendera-Gruszka, M., 2021. New pplication of FMEA nalysis 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 finea, 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 Management 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., Vitasmo, 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.
- 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., Véhot, 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).
- Kosztayán, Z.T., Csizmadia, T., Kovács, Z., Mihálc, I., 2020. Total risk eva-

- luation 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., Stouffs, 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* , 33–39URL: <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.
- 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_scanell_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).

- 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,handedbyeachofthem.>, 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.