



Monte-Carlo szimuláción és kockázatértékelésen alapuló folyamatelemző keretrendszer

Egyetemi doktori (PhD) értekezés

Kocsi Balázs

Témavezető: Dr. Budai István

Debreceni Egyetem
Természettudományi és Informatikai Doktori Tanács
Informatikai Tudományok Doktori Iskola
Debrecen, 2020.

Ezen értekezést a Debreceni Egyetem Természettudományi és Informatikai Doktori Tanács Informatikai Tudományok Doktori Iskola Az informatika ipari és tudományos alkalmazásai alprogramja keretében készítettem a Debreceni Egyetem műszaki doktori (PhD) fokozatának elnyerése céljából.

Nyilatkozom arról, hogy a tézisekben leírt eredmények nem képezik más PhD disszertáció részét.

Debrecen, 2020. 12.

*Kocsi Balázs
jelölt*

Tanúsítom, hogy Kocsi Balázs doktorjelölt 2015- 2019. között a fent megnevezett Doktori Iskola Az informatika ipari és tudományos alkalmazásai programjának keretében irányításommal végezte munkáját. Az értekezésben foglalt eredményekhez a jelölt önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult. Nyilatkozom továbbá arról, hogy a tézisekben leírt eredmények nem képezik más PhD disszertáció részét.

Az értekezés elfogadását javasolom.

Debrecen, 2020. 12.

*Dr. Budai István
témavezető*

Monte-Carlo szimuláción és kockázatértékelésen alapuló folyamatelemző keretrendszer

Értekezés a doktori (Ph.D.) fokozat megszerzése érdekében
a műszaki tudományágban

Írta: Kocsi Balázs okleveles logisztikai menedzser

Készült a Debreceni Egyetem Informatikai Tudományok doktori iskolája
(Az informatika ipari és tudományos alkalmazásai programja) keretében

Témavezető: Dr. Budai István

A doktori szigorlati bizottság:

elnök: Prof. Dr. Sztrik János
tagok: Dr. habil Kocsis Imre
Dr. Agg Géza

A doktori szigorlat időpontja: 2019. január 04.

Az értekezés bírálói:

Dr.
Dr.
Dr.

A bírálóbizottság:

elnök: Dr.
tagok: Dr.
Dr.
Dr.
Dr.

Az értekezés védésének időpontja: 200.....

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
1.1. A kutatás aktualitása és jelentősége.....	3
1.1.1. Hagyományos FMEA hátrányai röviden	5
1.1.2. Jelenlegi kutatási irányok az FMEA területén	7
2. Irodalmi áttekintés	10
2.1. Folyamat-teljesítménynövelés	10
2.1.1. Szervezési irányzatok.....	11
2.1.2. Minőségmenedzsment-irányzatok.....	14
2.1.3. Tervezési és irányítási irányzatok	16
2.2. Hibamód- és hatáselemzés (FMEA)	18
2.2.1. Hibamód- és hatáselemzés hátrányai	22
2.3. Ipar 4.0	27
2.3.1. Ipar 4.0 eszközök.....	28
2.3.2. Folyamatok mérése	30
2.4. Az üzletifolyamat szimulációja.....	33
2.4.1. Folyamatmodellezési eszközök.....	37
2.4.2. Monte-Carlo szimuláció.....	41
2.4.3. Lehetséges eloszlások	44
3. Célkitűzések.....	48
4. Anyagok és módszerek	50
5. Eredmények	58
5.1. Szimuláción és kockázat-értékelésen alapuló folyamatelemző keretrendszer létrehozása	58
5.2. Szimuláción és kockázatértékelésen alapuló folyamatelemző keretrendszer adatgyűjtését szolgáló QR-kódalapú alkalmazás fejlesztése	66
5.3. Tudományos eredmények	71
5.3.1. Keretrendszer ipari alkalmazása – esettanulmány: építőipar	71
5.3.2. Keretrendszer ipari alkalmazása – esettanulmány: gyártásütemezés	81
5.3.3. A disszertáció új eredményei, megállapításai	85

7. Összefoglalás.....	87
8. Summary	89
9. Irodalomjegyzék.....	91
10. Tárgyszavak-Keywords.....	100
11. Köszönetnyilvánítás	101
12. Függelék.....	102

ÁBRAJEGYZÉK

Ábra 1: Mérési folyamat	31
Ábra 2: Üzleti folyamat szimuláció lépései	36
Ábra 3: Folyamatmodellek; (a) Petri net, (b) Event log, (c) BPMN, (d) EPC	40
Ábra 4: Monte-Carlo szimuláció folyamat input output modellje	42
Ábra 5: AHP döntési struktúra	55
Ábra 6: Adattárházon alapuló kockázat értékelő platform.....	66
Ábra 7: Alkalmazás megjelenése	70
Ábra 8: Spearman korrelációs értéke a tevékenységeknek	79
Ábra 9: Hibrid ütemező eljárás	83
Ábra 10: QR kód olvasó alkalmazás blokk diagramja.....	118

TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

Táblázat 1: FMEA módszertanok csoportosítása.....	8
Táblázat 2: Diszkrét eloszlások.....	46
Táblázat 3: Folytonos eloszlások.....	46
Táblázat 4. Rendszerrel szemben támasztott követelmények.....	59
Táblázat 5. Kockázat értékelő paraméterek abszolút súlya.....	60
Táblázat 6. Projekt Tevékenységek.....	71
Táblázat 7. Lehetséges kockázatok és azok paraméter értékei.....	72
Táblázat 8. Tevékenységek adatai.....	74
Táblázat 9. Potenciális kockázatok és adatai.....	76
Táblázat 10. Tevékenységek RA sorrendje tcRPN alapján.....	77
Táblázat 11. Tevékenységek RA sorrendje RPN alapján.....	78
Táblázat 12. Tevékenység RA értékei az idő tekintetében.....	80
Táblázat 13: Kritériumok jelölése.....	102
Táblázat 14: Kritériumok és fontosságuk.....	102
Táblázat 15: A kritériumok relatív fontossága.....	103
Táblázat 16: Konzisztencia számítás.....	103
Táblázat 17: Alternatívák jelölése.....	104
Táblázat 18: Az alternatívák összehasonlítása a(z) "Egyszerűen mérhető adatok (C1)" kritériumra vonatkozóan.....	104
Táblázat 19: Az alternatívák összehasonlítása a(z) "Valós időben mérhető (C2)" kritériumra vonatkozóan.....	104
Táblázat 20: Az alternatívák összehasonlítása a(z) "Objektív (C3)" kritériumra vonatkozóan.....	105
Táblázat 21: Az alternatívák összehasonlítása a(z) "Emberi tényező minimalizálása (C4)" kritériumra vonatkozóan.....	105
Táblázat 22: Az alternatívák összehasonlítása a(z) "Kockázatok dominó effektjének figyelembe vétele (C5)" kritériumra vonatkozóan.....	105
Táblázat 23: Az alternatívák összehasonlítása a(z) "A kockázati paraméterekkel matematikai alapon ki lehessen számolni a kockázati számot (C6)" kritériumra vonatkozóan.....	106
Táblázat 24: Az alternatívák összehasonlítása a(z) "Előrejelzés (C7)" kritériumra vonatkozóan.....	106
Táblázat 25: Az alternatívák összehasonlítása a(z) "Gyorsan számítható kockázati szám (C8)" kritériumra vonatkozóan.....	106
Táblázat 26: Az alternatívák standardizált fontossága a(z) "Egyszerűen mérhető adatok (C1)" kritériumra vonatkozóan.....	107
Táblázat 27: Az alternatívák standardizált fontossága a(z) "Valós időben mérhető (C2)" kritériumra vonatkozóan.....	107
Táblázat 28: Az alternatívák standardizált fontossága a(z) "Objektív (C3)" kritériumra vonatkozóan.....	108

Táblázat 29: Az alternatívák standardizált fontossága a(z) "Emberi tényező minimalizálása (C4)" kritériumra vonatkozóan	108
Táblázat 30: Az alternatívák standardizált fontossága a(z) "Kockázatok dominó effektjének figyelembe vétele (C5)" kritériumra vonatkozóan.....	109
Táblázat 31: Az alternatívák standardizált fontossága a(z) "A kockázati paraméterekkel matematikai alapon ki lehessen számolni a kockázati számot (C6)" kritériumra vonatkozóan	109
Táblázat 32: Az alternatívák standardizált fontossága a(z) "Előrejelzés (C7)" kritériumra vonatkozóan	110
Táblázat 33: Az alternatívák standardizált fontossága a(z) "Gyorsan számítható kockázati szám (C8)" kritériumra vonatkozóan.....	110
Táblázat 34: Konzisztencia ellenőrzése "Egyszerűen mérhető adatok (C1)" kritériumra vonatkozóan	111
Táblázat 35: Konzisztencia ellenőrzése "Valós időben mérhető (C2)" kritériumra vonatkozóan	111
Táblázat 36: Konzisztencia ellenőrzése "Objektív (C3)" kritériumra vonatkozóan	112
Táblázat 37: Konzisztencia ellenőrzése "Emberi tényező minimalizálása (C4)" kritériumra vonatkozóan	112
Táblázat 38: Konzisztencia ellenőrzése "Kockázatok dominó effektjének figyelembe vétele (C5)" kritériumra vonatkozóan.....	113
Táblázat 39: Konzisztencia ellenőrzése "A kockázati paraméterekkel matematikai alapon ki lehessen számolni a kockázati számot (C6)" kritériumra vonatkozóan	113
Táblázat 40: Konzisztencia ellenőrzése "Előrejelzés (C7)" kritériumra vonatkozóan	114
Táblázat 41: Konzisztencia ellenőrzése "Gyorsan számítható kockázati szám (C8)" kritériumra vonatkozóan	114
Táblázat 42: Az összehasonlítás végeredménye	115
Táblázat 43: Quality Function Deployment (QFD) módszer eredménye	117

RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE

<u>Rövidítés</u>	<u>Jelentés</u>	<u>Magyar jelentés (ha van)</u>
AHP	Analytic Hierarchy Process	Analitikus hierarchikus eljárás
AIAG	Auto Industry Action Group	Észak-Amerikai Autógyártók Szakmai Testülete
ANP	Analytic Network Process	Analitikus hálózati eljárás
BPM	Business Process Management	Üzleti folyamatmenedzsment
BPM N2.0	Business Process Management Notation 2.0	
BPR	Business Process Reengineering	Üzleti folyamat újjászervezése
CI	Consistency Index	Konzisztencia index
CI	Continuous Improvement	Folyamatos fejlesztés
CPS	Cyber-physical system	Kiber-fizikai rendszer
CR	Consistency Ratio	Konzisztencia hányados
D	Detectability	Detektálhatóság
DEM ATEL	Decision making trial and evaluation laboratory	
DFM	Design Failure Mode and Effect Analysis	Konstrukciós Hibamód- és Hatáselemzés
EA	Effect Analysis	
DMAI C	Define, Measure, Analyze, Improve, Control	Definíció, Mérés, Elemzés, Fejlesztés, Kontrol fázis
DSS	Decision support system	Döntéstámogató rendszer
EMV	EMV Expected Monetary Value	Várható pénzbeli érték
EPC	Event-driven Process chain diagram	Eseményvezérelt folyamatlánc-diagram
ERP	Enterprise Resource Planning	Vállalatirányítási rendszer
FME A	Failure Mode and Effect Analysis	Hibamód- és Hatáselemzés
Fuzzy ART	Fuzzy Adaptive Resonance Theory	
Fuzzy OWA	Fuzzy Ordered Weighted Averaging	
GAS	Google Apps Script	
HML V	High Mix Low Volume	Magas termék mix alacsony gyártási tétel nagyság
HOQ	House of Quality	Minőség háza

IOT	Internet of Things	
JIT	Just in Time	Éppen időben
KPI	Key Performance Indicator	Fő teljesítménymutató
MCD	Multi-criteria decision making	Többszemponútú döntési módszer
M		
MIL-P	Military procedure	Katonai eljárás
MTBF	MTBF Mean time between failures	Meghibásodások közt átlagosan eltelt idő
NASA	National Aeronautics and Space Administration	Nemzeti Repülési és Űrhajózási Hivatal
O	Occurrence	Előfordulás
OEM	Original Equipment Manufacturer	Járműipari Szövetség
PFMEA	Process Failure Mode and Effect Analysis	Folyamat Hibamód- és Hatáselemzés
QFD	Quality Function Deployment	
QR	Quick Response	
RFID	Radio Frequency Identification	Rádiófrekvenciás azonosítás
RPA	Robot Process Automation	Szoftver robot
RPN	Risk Priority Number	Kockázati szám
S	Severity	Súlyosság
SAE	Society of Automotive Engineers	
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution	A sorrend-preferencia technikája az ideális megoldás hasonlósága alapján
TPS	Toyota Production System	Toyota termelési rendszer
TPT	Total Process Time	Teljes átfutási idő
TQM	Total Quality Management	Teljeskörű minőségmenedzsment
VDA	Verband der Automobilindustrie	Járműipari Szövetség

1. Bevezetés

A jelenlegi globális trend alapján a vevők testreszabható terméket szeretnének vásárolni rövid átfutási idővel, mely komoly kihívások elé állítja az ipart. A különböző termékvariációkat rövid időablakon belül, elfogadható áron, hiba nélkül leszállítani nem egyszerű. Logisztikai problémák léphetnek fel például: gondok az alapanyag-ellátásban vagy magas raktározási költség a rosszul választott készletezési stratégia miatt. Továbbá, ütemezési gondok is felléphetnek, amely magas gyártási költséget eredményezhet a nem megfelelő átállási program megválasztása miatt, valamint a megfeszített munkatempó miatt a hibás termékek gyártása is nagyobb valószínűséggel következik be. A gyártási folyamatoknak az optimális lefutás érdekében a tervezési- és gyártásirányítási szakaszban gyors és hatékony döntéshozatalra van szükségük.

Ezen kihívásokra egy lehetséges megoldás a negyedik ipari forradalom által létrejött ipar 4.0 megközelítés. A HMLV (High Mix Low Volume – magas termék mix alacsony gyártási tétel nagyság) termelési stratégia egy olyan globális trend, amely sok, rövid átállást igényel a gyártási eszközöktől annak érdekében, hogy képes legyen kiszolgálni a változó vevői igényeket reális időablakon belül [1].

Azonban nem elég megfelelő gyorsasággal kiszolgálni a vevői igényeket, a termékeknek vagy szolgáltatásoknak hibamentesnek kell lenniük. A hibamentesség biztosításának egyik legrégebbi eszköze az FMEA (Failure Mode and Effect Analysis – Hibamód- és Hatáselemzés), melyet széleskörű ipari felhasználás jellemez [2]. A termék minőségét fent kell tartani annak teljes életciklusa alatt. A termékminőséget a termék tervezési és gyártási fázisai is befolyásolják, ezért is közkedvelt eljárás az FMEA alkalmazása, ugyanis mindkét fázisban implementálható [3].

Az FMEA alkalmazásával a cél, hogy a potenciális hibamódokat és hibaokokat feltárjuk, még mielőtt azok bekövetkeznének. A módszert az Amerikai Egyesült Államok hadserege jegyezte 1949-ben, a Mil-P 1629-s dokumentumban [4]. A módszer különböző változatait az 1960-as években a NASA (National Aeronautics and Space Administration - Nemzeti Repülési és Űrhajózási Hivatal) alkalmazta. Továbbá az 1970-es évek közepén a Ford Motor Company, Pinto típusú autója körül botrány alakult ki, mely után úgy döntött a cég, hogy bevezetik az FMEA eljárást [5]. Az 1980-as években az AIAG (Auto Industry Action Group - Észak-Amerikai Autógyártók Szakmai Testülete) javította és szabványosította a módszert majd 1993-ban hivatalossá tette az autóiparra vonatkozó FMEA szabványt [4]. A SAE (Society of Automotive Engineers) J1739 számú szabványa tartalmazza az FMEA módszer részleteit [6]. Napjainkban, sok termelésösztönző rendszer része az FMEA, például: Six sigma, LEAN [4], valamint több minőségügyi szabvány is tartalmazza, köztük az ISO 9001:2015 [7].

A módszer nagyon sokszínű, több változattal is rendelkezik. Alkalmas például a termék konstrukciójának javítására, továbbá folyamatjavításra, valamint ahogy már említettem az ipar alkalmazza kockázatértékelésre és a megbízhatóság növelésére. A módszer előnye, hogy a hibamód súlyossága, előfordulási gyakorisága és a detektálhatósága paraméterekből egy kockázati számot számol, amellyel rangsorolja az egyes hibamódokat. Ezáltal a fejlesztő csapat csak arra koncentrál, ami tényleg fontos az adott probléma szempontjából. További előnye az FMEA-nak, hogy nem iparág- és folyamatspecifikus, tehát termelő és szolgáltató szektorban is alkalmazható, nem csupán a vállalat fő folyamatára, hanem bármelyik üzleti folyamatra [5]. Amellett, hogy a módszer nagyon sokrétű és széleskörben alkalmazott az iparban, vannak hátrányai is. Ebből az okból kifolyólag a mai tudományos életben nagyon felkapott téma az FMEA módszertani fejlesztését célzó

kutatás. Ezt bizonyítja Huang és mtsai. [8] irodalmi összefoglalója, melyben 1998 és 2018 között 263 publikált FMEA változatot elemeznek és kategorizálnak.

A hagyományos FMEA elemzés hiányosságai indukálták a kutatásomat, amelynek célja egy olyan kockázatelemző és hibafeltáró módszer létrehozása, amely a potenciális hibákat figyelembe véve képes előrejelzeni az üzleti folyamat átfutási idejét. Ezzel az előrejelzéssel ipar 4.0 környezetben értékes információt tudunk szolgáltatni a gyártásütemezésnek, mely ezen adatok figyelembevételével képes reagálni a folyamatban fellépő problémákra és újra ütemezve, a lehető legkisebb eltéréssel szállítani a vevői igényt a megkövetelt minőségben. Természetesen, mint megfelelő alap a saját módszertani fejlesztésemnek az irodalomban elérhető különböző módosított FMEA módszereket figyelembe vettem.

1.1. A kutatás aktualitása és jelentősége

Minden vállalat törekszik arra, hogy elkerülje a kockázatokat az üzleti folyamataikban s ezáltal csökkenjen a selejtes termékek száma. Korábban, a megbízhatóság tudományterülete foglalkozott a kockázatok, meghibásodások kérdéskörével [9]. Ma már a minőségmenedzsment és folyamatmenedzsment módszertanok egyik alapvető eszköze a meghibásodásokat befolyásoló tényezők vizsgálata [10].

Számos minőségfejlesztő módszer foglalkozik a kockázatokkal és a meghibásodásokkal [10]. Az FMEA előnye ezekkel szemben az, hogy értékeli és rangsorba helyezi a kockázatokat. A rangsor alapján kiválasztásra kerülhetnek a tényleg komoly problémát okozó kockázatok. Ezt az előnyt a módszernek kihasználva számos termelésösztönzési rendszer és szabvány kötelezővé tette használatát. A következő felsorolásban ezeket kívánom bemutatni:

- Az FMEA egyszerűsége miatt, alkalmazható a CI (Continuous Improvement - folyamatos fejlesztés) területén, amely a TPS-nek (Toyota Production System - Toyota Termelési Rendszer) egy igen jelentős része [11].
- Az Európai Bizottság kötelezi a gyártókat, hogy legyen egy olyan termékdokumentáció, amivel képes bizonyítani a termék megbízhatóságát. Ennek a termékdokumentációnak egy eleme lehet az FMEA elemzés eredménye [12].
- Az ISO/TS 16949 kötelező eleme az FMEA. Az AIAG & VDA (Verband der Automobilindustrie - Járműipari Szövetség) FMEA kézikönyve 2019-ben jelent meg, amely az autóiipari ellátási láncokban a Tier 1 és OEM (Original Equipment Manufacturer) beszállítóknak segít a termék megfelelőség esetében [13].
- Az QS 9000 Autóiipari szabvány is kötelező elemként tartalmazza az FMEA-t [14].
- A BS EN IEC 60812:2018 minőségügyi szabvány szoftver, hardver gyártás és azok folyamatainak alkalmazandó előírás a minőség fenntartására és fokozására is FMEA alapon nyugszik [15].
- Az EN 16602-30-02 Űriipari termékbiztosítás is tartalmazza az FMEA-t [16].
- A DIN ISO 12132:2019 csapágygyártás minőségügyi szabvány, tervezési FMEA-t alkalmaz [17].
- A különböző iparágakban alkalmazott ISO 9001:2015 esetében is az FMEA egy gyakori eszköz a kockázatok kezelésére [7].
- Az üzleti folyamatok fejlesztésére is gyakran alkalmazott módszer a Six Sigma és BPM (Business Process Management – üzleti folyamat menedzsment) területén [10].

Ezekből is egyértelműen látszik, hogy számos iparágban és területen használják a módszert a kockázatok kezelésére, a megbízhatóság növelésére és a megfelelőségi szint megtartására. Annak ellenére, hogy igen közkedvelt módszerről van szó, sajnos számos hátránnyal rendelkezik.

1.1.1. Hagyományos FMEA hátrányai röviden

Bár a hagyományos FMEA-t számos iparágban széles körben használják, és nagyon sikeresnek bizonyult, ennek ellenére számos gyenge pontja van [18].

Ebben a fejezetben csak azokat a hátrányokat mutatom be, amelyeket kutatásom során eliminálni szeretnék. Az ipari alkalmazások során kiderült, hogy ezek a hátrányok azok, amelyekkel foglalkozni szükséges azért, hogy a módszer teljesítménye nőjön, valamint, hogy hatékonyan lehessen az ipar4.0 környezetben implementálni [10,19]. Kísérletet teszek arra, hogy az FMEA összes hátrányát listázzam, melyek a jelenlegi irodalomban hozzáférhetőek. Ezek a 2.2. fejezetben olvashatóak.

A kutatás tárgyát képező eliminálandó hátrányok a következők:

- A súlyosság, gyakoriság, detektálhatóság relatív fontosságát nem veszi figyelembe [18].
- Előfordulhat, hogy a súlyosság, gyakoriság, detektálhatóság különböző kombinációja ugyan azt a kockázati számot adja, de a három hiba valószínűleg nem ugyanazzal a fontossággal rendelkezik [18].
- A három paraméter értékének meghatározása szubjektív [20].
- Mivel a három paraméter értéke három különböző skálán alapul, ezért matematikailag a három paraméter szorzata nem ad megbízható eredményt [20].

- A hagyományos FMEA nem veszi figyelembe az egyes hibaokok közötti függőséget. Nem számol a dominóeffektussal [20].
- Idő- és költségparaméterekkel nem számol. A hibák bekövetkezéséből adódó idő- és költségnövekedés, azonban egy fontos döntési tényező, amellyel foglalkozni kell [21].
- A három skála pontszám-konverziója eltérő. A gyakoriság nem lineáris összefüggést követ, míg a detektálhatóság lineáris kapcsolaton alpszik [21].
- A kockázati szám rendkívül érzékeny az értékelésre. Az egyik paraméter kicsi megváltoztatására a kockázati szám értéke nagyban változhat [21].
- Az FMEA visszaméréssel (fejlesztés után újra számított RPN érték) a kockázati számmal megpróbálhatjuk megbecsülni a javítóintézkedés hatékonyságát, de ez teljességgel lehetetlen [18].
- A kockázati szám értékelésekor nem lehet különbséget tenni 900 és 1000 értékű hiba között. Ha az S (Severity - Súlyosság), O (Occurrence - Gyakoriság), D (Detectability - Detektálhatóság) értékek 1-10-ig terjedő skálát vesznek fel, akkor az értékeléskor a 900-as RPN (Risk Priority Number- Kockázati szám) vagy 1000-es RPN az RPN skála maximum értékénél található. Mind a kettő nagyon súlyos, de egyértelműen nem látható a kettő közötti különbség [18].
- A végfelhasználói szemszöveget nem veszi figyelembe az értékelés. Sokszor a módszer rutinná válik és csak egy űrlapkitöltés mély elemzés nélkül [18].
- Két szakértői csoport képes, ugyan azt a hibát teljesen eltérő kockázati számmal értékelni [18].

- A szakértők relatív fontosságát nem veszi figyelembe [18].
- A kockázati szám kalkulációja azt sugallja, hogy ha a hiba egyik paramétere kétszeresére nő, akkor az ellensúlyozható egy másik paraméter felére csökkentésével [19].

1.1.2. Jelenlegi kutatási irányok az FMEA területén

Az FMEA hátrányainak kiküszöbölésére számos kutatás kezdődött, melyeknek célja, egy tovább fejlesztett FMEA létrehozása, mely különböző iparágban alkalmazható. A legtöbb esetben az FMEA hibridizációját láthatjuk, amikor más módszerekkel való kombinálása történik [20].

A mesterséges intelligencia és az FMEA kombinációjának egyik példája a Fuzzy szabályokon alapuló kockázati paraméterek és kockázati szám értékelése. A Fuzzy halmazokon alapuló kockázat-értékelésnek a lényege, hogy az éles határok elmosódnak a fuzzy halmazoknak köszönhetően, így a kockázatok rangsora jobban reprezentálja a valóságot. Azonban a fuzzy alapú FMEA módszerek sem képesek teljesen kizárni a szubjektivitást a paraméterértékek megadásánál [22].

Az MCDM (Multi Criteria Decision Making-multi kritérium elemzés) és az FMEA kombinációja is gyakran előforduló kombináció. Általában az MCDM módszereket a rangsor felállításakor alkalmazzák, annak érdekében, hogy a kockázatértékelés eredménye és megbízhatósága nőjön, egyszerre többféle MCDM módszert kombinálnak. Az új irányok azt mutatják, hogy a leggyakrabban alkalmazott módszerek, mint az FMEA kiegészítő módszerei az AHP (Analytical Hierarchy Process - analitikus hierarchikus eljárás) és a TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution - A sorrend-preferencia technikája az ideális megoldás hasonlósága alapján) [20].

A költségalapú FMEA is egy gyakran kutatott terület. A hibák költségének, valamint a hibák javításának a költségével számolva megpróbálják minimalizálni a szubjektív faktort a kockázatértékelésnél [23]. A jelenleg elérhető módosított FMEA módszerek előnyét és hátrányát figyelembe véve, a költségalapú FMEA egy jó irány lehet, a gond azonban az, hogy a költségek nem mindig egyszerűen meghatározható értékek.

Az előbb említett kategóriák a leggyakoribbak az FMEA módszertani fejlesztése esetén, azonban természetesen léteznek egyéb irányok is, mint például a szimulációval támogatott FMEA, vagy a KANO modell alapú FMEA. Az 1. táblázatban látható az FMEA módszertanok csoportosítása.

Táblázat 1: FMEA módszertanok csoportosítása

	Kategória	Módszerek
1	Mesterséges intelligencia	Fuzzy FMEA, Fuzzy OWA, Fuzzy ART
2	MCDM	AHP, ANP, TOPSIS, VIKOR, DEMATEL,
3	Költség alapú	Anette von Ashen,
4	Egyéb	Monte-Carlo szimuláció, KANO model, Minimum Cut set.

Forrás: Saját szerkesztés [20] alapján, 2020.

Az FMEA módszertani fejlesztése nagyon gyakori manapság a minőségmenedzsment és folyamatmenedzsment területén, annak érdekében, hogy a termelő vállalatok jobbnál jobb és megbízhatóbb termékeket tudjanak előállítani.

A kutatásom célja, egy olyan kockázatértékelő módszer fejlesztése, amely az FMEA-n alapul, tehát a hibákat rangsorolja azok súlyossága, gyakorisága és detektálhatósága alapján, azonban a paraméterértékek meghatározása mérési alapon történik. Fontos továbbá, hogy a módszer implementálható legyen kiber-fizikai rendszerbe (CPS), illetve képes legyen automatikusan feltárni a potenciális hibát annak bekövetkezése előtt, így védve meg a terméket a sérüléstől.

2. Irodalmi áttekintés

2.1. Folyamat-teljesítménynövelés

A vállalati gyakorlatban és a szakirodalomban is különböző irányok léteznek az üzleti folyamatok teljesítményének növelésére. Sok esetben nincsenek éles határok az egyes irányok között, mondhatni, hogy átjárás van közöttük, hiszen sokszor ugyanazokat a módszereket alkalmazzák. Azonban a filozófiában, a célokban és a módszerek használatában éles különbség tapasztalható.

Három alapvető irányt különböztetünk meg, ezek a következők:

1. Szervezési irányzatok
2. Minőségmenedzsment irányzatok
3. Tervezési és irányítási irányzatok [24]

A szervezési irányzatok a vállalati struktúra megváltoztatásával foglalkoznak, projektmenedzsment alapon. Ezeknek az irányzatoknak az alapvető céljuk a költségek minimalizálása, azonban további célokat is követhetnek, például fogyasztói elvárásoknak való megfelelés, vagy a folyamatok átalakításával értéknövelés [24].

A minőségmenedzsment irányzatok célja, a folyamatos standard minőség biztosítása és a folyamat teljesítményének tartósan történő növelése. Ezen irányzatok nem implementálhatók a szervezet tervezési és irányítási rendszerébe. Minőségmenedzsment irányzatok figyelembevételével történik a folyamatirányítás és döntéshozás, de nem azokon alapszik.

A tervezési és szervezési irányzatok a korábbi, funkcionálisan tagolt vállalati felépítést egészítik ki, folyamatorientált tervezési és szervezési elemekkel [24].

2.1.1. Szervezési irányzatok

Üzleti folyamatok átszervezése (BPR – Business Process Reengineering)

Az üzleti folyamatok átszervezése a folyamatok teljes, radikális, megváltoztatását jelenti. Ez a szervezési megközelítés a kilencvenes évekből származik Michael Hammertől, célja a folyamatok újratervezése, újraszervezése annak érdekében, hogy a vállalat elérje a stratégiai célokat. Alkalmazása esetén jelentősen javulhat a folyamat teljes átfutási ideje, költsége, valamint a minőségre is pozitív hatása van. A BPR középpontja az újratervezés és újraszervezés a vevői igények alapján [25].

Az átszervezés felülről lefelé (top-bottom) haladva történik, amely során nem szükséges a jelenlegi folyamatok elemzése, ugyanis teljes átalakuláson mennek át a fogyasztói igények alapján. A folyamatok átalakítása, nagyon erőforrásigényes és jelentős kiesést eredményezhet, hiszen a szervezetben változás történik, és amíg ezt a változást nem szokják meg a szereplők addig nem teljesít a folyamat a maximális szinten [25]. Ha a vevői igények változnak a BPR újbóli elvégzése szükséges.

A mai rohamosan változó világban, ahol a vállalatoknak folyamatosan a vevői igények problémájával kell szembenéznük, a BPR nem egy költséghatékony irányzat. Ha változik az igény egy újabb BPR-rel, egy újabb változás következik be a szervezetnél, amely leállást idéz elő és a standardok újbóli megszokását igényli, ami szintén több idő. Az irányzat nem flexibilis, nehezen tud válaszolni a változó környezetre. Továbbá nem veszi figyelembe azt, hogy a dolgozók folyamatosan tanulnak, ezért folyamatosan változik a folyamat.

X-engineering

Míg a BPR a vállalat belső folyamataira fókuszál, ezzel szemben az X-engineering esetében az egész ellátási lánc van az újratervezés

középpontjában. Az irányzatot 2002-ben mutatta be James Champy, célja a vállalatokon átívelő folyamatok hatékony megvalósítása, integrált informatikai platform segítségével [26]. Az ilyen fajta átszervezés jelentős tranzakciós költségcsökkentést eredményezhet.

A hatékonyság növelése az alábbi tevékenységekkel valósulhat meg:

1. Teljes ellátási lánc szétbontása és újra konfigurálása.
2. Belső funkciók kiszervezése, hogy a vállalat az alapvető képességeire tudjon koncentrálni.
3. Ellátásilánc-hálózatába IT-eszközök integrálása.

Az X-engineering az értéklánc folyamatait a vállalati stratégiának legmegfelelőbbben próbálja kialakítani [26].

A módszer előnye, hogy erősen IT-alapú megoldásokkal operál, amellyel ténylegesen az üzleti folyamatok teljesítményét lehet növelni. Azonban ehhez egy nagyon jó kapcsolat szükséges az ellátásilánc szereplői között. Ezen erős együttműködés nélkül az X-engineering nem éri el célját. Továbbá itt is átalakításról van szó, csak nem a vevői igények alapján, hanem a vállalati stratégia alapján is. Azonban, ha a vállalati stratégia nem megfelelően definiált és tervezett, a sikeres X-engineering nem garantálja a sikeres vállalati működést.

Üzleti folyamatok optimalizálása (BPM – Business Process Management)

Az üzleti folyamatoptimalizálás egy alulról-felfelé (bottom-up) irányuló folyamat, amelynek célja, hogy a dolgozók bevonásával csökkenjen a folyamatok ideje, költsége és javuljon a minőség [27]. A dolgozók részvétele, a jelenlegi folyamatok ismerete és elemzése a sikeresség kulcsa. A vállalat jellegzetességének figyelembevételével kell a folyamatokhoz hozzányúlni. A vállalati folyamatok nagyon ritkán rosszak, vagy hibásak teljes egészében,

továbbá a folyamat résztvevői ismerik a folyamat és a vállalat jellemzőit, így ezzel az ismeretanyaggal lehet a legeredményesebben teljesítményt növelni. A legtöbb esetben a BPM csapatok által végzett tevékenység, ahol először felmérik a folyamat hibáit, majd megoldásokat javasolnak azok kiküszöbölésére [24].

A BPM előnye, hogy alkalmazásával képes reagálni a változó vevői igényekre, viszont a folyamatoptimalizáláshoz nem használ iránymutatásokat, csak módszereket. Ezért sokszor a BPM nem más, mint egy kötelező feladat, amit el kell végezni a dolgozók számára. Ez a hozzáállás vezethet ahhoz, hogy csak űrlapkitöltés történik, részletes mély elemzés a hibák esetében azonban nem. A dolgozók bevonása fontos, hiszen ők ismerik a folyamatot, de a fejlesztés a folyamatfejlesztési elvek nélkül nem mindig eredményes.

Szervezet átszervezés

A vállalati modell átszervezésére akkor van szükség, ha különböző divíziók vagy vállalatok egyesülnek, szétválnak, vagy modernizáció kényszere áll fenn. Ezekben az esetekben a vállalatoknak vagy egyes részlegeiknek a keretfeltételeik megváltozásával kell szembenézniük. Az új keretfeltételek kialakítása során egy reorganizációs projektben az üzleti folyamatok elemzése és átalakítása is megtörténik [24].

A reorganizációs folyamat célja, a szervezet teljesítménynövelése. Ez szervezeti struktúraátalakítást jelent, de érzékelhető továbbá folyamat struktúraátalakítás is [24].

Egy radikálisabb átalakítás esetén jó lehet, ha később a vállalat alkalmaz valamilyen teljesítménynövelési irányzatot. Az átalakítás során így figyelembe kell venni az alkalmazandó folyamat-teljesítménynövelési irányzatot, és annak a sajátosságainak megfelelően kell az átalakítást elvégezni. Azonban csak a szervezetátszervezés nem alkalmas a hosszantartó teljesítménynövelésre.

2.1.2. Minőségmenedzsment-irányzatok

Teljes körű minőségmenedzsment (TQM)

A TQM különböző minőségmenedzsment irányzatok továbbfejlesztett változata, amelynek középpontjában a PDCA (plan – terve, do – végrehajt, check – ellenőriz, act – végrehajt) ciklus áll [28]. A megközelítés a termékközpontú folyamatok helyett a minőség kiterjesztésének eszméjével foglalkozik.

Másik fontos eleme a TQM-nek a belső vevői-szállítói kapcsolatok. A teljes vállalati értékteremtési folyamatban minden alkalmazott teljesítménye függ, az azt megelőző tevékenység teljesítményétől, hiszen az egyik kimenete a másik bemenete lesz [28].

Ezen fontos elemek alapján a 70-es években kialakul a TQM, amelynek célja, a vevői igények kielégítése, a szervezet folyamatainak minőségének a figyelembevételével. A minőség ebben az esetben tehát nem csak termékminőséget jelent, hanem a szervezetmenedzsment és a folyamatok minőségét is. A folyamatok és az alkalmazottak folyamatos fejlesztésével jobbnál jobb minőség elérése a cél. A vállalat a versenyelőny megszerzése érdekében úgy fejleszti a minőséget, hogy egy időben költségcsökkentés és gyártási-időcsökkentés történik [24].

TQM alkalmazása esetében a vállalatoknak minőségirányítási rendszerek, szabványok megléte szükséges. Világszerte rendszerint az ISO 9000 szabványcsaládot alkalmazzák. A TQM segítségével elérhető a hosszan tartó jó folyamatteljesítmény, és már nem csak eszközök használatáról van szó, hanem egyfajta szervezeti átalakulásról is, amelynek központi elve az irányzat célja.

Hat szigma (Six Sigma)

Az amerikai Motorola vállalat fejlesztette ki a módszert a 80-as évek elején, a gyártási folyamatok minőségének javítása céljából. Ebben az időszakban a Japán Ipari Menedzsment rendszernek köszönhetően a japán termékek nagyon jó minőségűek voltak, és a cég jó minőségű termékekkel kívánta felvenni a versenyt. A Six Sigma a folyamateredmények célértéktől való eltéréseinek és azok okainak feltárásával foglalkozik. Alapvetően ökonometriai alapokon nyugszik és a normális eloszlás statisztikájából indul ki. A módszer folyamatoptimalizálást alkalmaz, amelynek célja az eltérés értékeinek a feltárása, az eltérés okainak megszüntetése, és ezzel növelni a termék minőséget, a folyamatteljesítményt. A Six Sigma továbbá folyamatmenedzsment alapokon nyugszik, ugyanis a minőségi filozófiát integrálni kell a mindennapi üzleti működésbe, amely a folyamatok állandó nyomon követésével, irányításával érhető el [24].

A Six Sigma alkalmazza a DMAIC integrált eljárási módot a minőségi színvonal és a folyamat-teljesítmény fenntartására.

- Tervezés (D, Define): Vevők, kulcsfolyamatok és folyamatelemek meghatározása, tervezése.
- Mérés (M, Measurement): A vevői igények meghatározása és számszerűsítése. A vevői elégedettséget befolyásoló tényezők, mérő mutatók definiálása.
- Elemzés (A, Analyse): Folyamatteljesítmény mérése a mutatók alapján.
- Fejlesztés (I, Improve): A folyamat-teljesítményt javító intézkedések meghatározása, bevezetése.
- Ellenőrzés (C, Control): A végrehajtott intézkedések hatásainak a mérése, nyomon követése [24].

Tehát a Six Sigma lényege a folyamatos minőségnövelés és a folyamatteljesítmény fenntartása. A DMAIC ciklus minden fázisában, előre meghatározott módszerek állnak rendelkezésre, amelyek segítségével a fázisok kivitelezhetők.

A minőségmenedzsment irányzat a vállalat fő folyamataival foglalkozik. A termék-előállítási folyamattal, a szervezet egyéb folyamataira nem helyez akkora hangsúlyt. A minőségi színvonal emelését és az ezzel járó piaci növekedést a gyártási folyamatra vezeti vissza, így háttérbe szorulhatnak a vezetői és támogató üzleti folyamatok.

2.1.3. Tervezési és irányítási irányzatok

Kvalitatív folyamatmenedzsment

A folyamatmenedzsment célja, hogy irányítsa az üzleti folyamatokat a minőség, idő, költség és vevői igények figyelembevételével [29]. Fontos hangsúlyozni, hogy itt a vevő nem csak a végfelhasználó, hanem a vállalat belső folyamatainak a szereplője. Belső vevő lehet egy folyamat-tevékenység vagy osztály vagy vállalati részleg is. A folyamatmenedzsment elemei a tervezés, a szervezéskontrolling és a fejlesztés [24].

A folyamatmenedzsment kiinduló pontja, a folyamatok tervezése és az elérni kívánt KPI (Key Performance Indicator - Fő teljesítménymutató) értékek meghatározása. A későbbiekben a folyamat paramétereit mérik, ha az érték nem megfelelő, azaz nem találkozik az előre definiált értékkel akkor beavatkoznak. A folyamatfejlesztés a szervezet szereplőinek bevonásával történik kvalitatív eszközökkel. A leggyakrabban alkalmazott stratégia, hogy alapesetben BPM irányú fejlesztést követnek, ezzel képesek reagálni a változó környezetre, de ha a BPM nem elég, vagyis nem lehet kis lépésű fejlesztéssel

elérni a stratégiai célt, akkor a következő lépésnél teljes átalakítást használnak, azaz a BPR-t. A folyamatok mérésén keresztül kapnak a vezetők képet a folyamat teljesítményéről, ha az nem megfelelő, akkor a folyamatkontrolling fog beavatkozni [24].

A kvalitatív folyamatmenedzsment alapul szolgál a rugalmas és piacorientált vállalatvezetésnek. A folyamatmenedzsment-rendszert össze kell kapcsolni a vállalat szervezeti struktúrájával és a pénzügyi irányítási rendszerével is.

Az irány hatékonysága csökken, ha csak a termeléssel kapcsolatos folyamatcélokat határozzák meg, pl. kapacitás- és erőforrástervezést. A vezetési és támogató folyamatokat is bele kell vonni a KPI-képzésbe.

Toyota termelési rendszer (TPS – Toyota Production System)

A Toyota termelési rendszer az alapja a Japán Ipari Menedzsment rendszernek. Ez egy komplex tervezési és irányítási filozófia, amely három fő pilléren nyugszik. JIT (Just in Time – Éppen időben gyártás), amely a húzó logisztika, a JIDOKA (automatizáció emberi érintéssel), amely a beépített minőség, és a HEIJUNKA (Termelés kiegyenlítés), amely a kiegyenlített termelés. Ehhez kapcsolódik még a folyamatos fejlődés és fejlesztés filozófiája, valamint a japán minőségfejlesztő eszközök [30].

A folyamatos fejlődés mozgatórugója a problémához való hozzáállás. A TPS esetében a probléma nem a standardtól való eltérést jelenti, hanem lehetőség arra, hogy a szervezet javuljon, és ha a szervezet javul, akkor ezt a vevő meghálálja. A folyamatos fejlődés az összes alkalmazott bevonásával történik és egy öntanuló szervezetként, egy, a tökéletesítést támogató vállalati kultúra alakul ki [30].

A koncepció lényege, hogy a vállalatban mindig van lehetőség a működés tökéletesítésére, javítására, az alkalmazottak bevonásával és a vevő

meghallgatásával [28]. Itt is érvényes a külső és belső vevő teóriája, azaz a külső vevőnek szállított minőség és teljesítmény függ a belső vevők minőségétől és teljesítményétől.

Ennek a megközelítésnek van egy Japánon kívül implementált változata, amely a lean vagy lean menedzsment. A szocio-kulturális különbsége miatt nem eredményes a TPS egy az egyben történő implementálása, ezért az adott kulturális különbségeket figyelembe kell venni a rendszer bevezetésénél.

Folyamatköltség-menedzsment

A folyamatköltség-menedzsment egy olyan tervezési és irányítási rendszer, amely a folyamatköltség-számítás módszerére épül. Célja a költséghelyeken átívelő folyamatok menedzselése, tervezése, irányítása és elszámolása. A módszer minden olyan területen alkalmazható, ahol a felmerülő költségek nagy része általános költség [24].

A folyamatköltség-menedzsment támogathatja a folyamatoptimalizálást vagy a folyamat-újratervezést. Hatékonysága továbbá sokat javul, ha különböző irányzatokkal kombinálják.

2.2. Hibamód- és hatáselemzés (FMEA)

Az FMEA (vagy a szakirodalomban néha FMECA névvel jelölt) módszer elemzi a különböző körülmények között előforduló hibákat, továbbá alkalmas a hibahatások feltárására és értékelésére is. Az FMEA egy induktív módszer alulról felfelé irányuló megközelítéssel. Fő célja a lehetséges hibák azonosítása, a hibamódok okainak és hatásainak értékelése. Végezetül az összes ilyen potenciálisan előforduló hibára megfelelő megoldásokat javasol, annak érdekében, hogy csökkenjen a hibák bekövetkezése és a termék megbízhatósága növekedjen. Ezért az FMEA nem csak egy módszer, hanem

fejlesztési eszköz is. Végső célja a hibamentes, megbízhatóbb és biztonságosabb termék gyártása, a vevő/fogyasztó elégedettsége. Ez az elemzés egy „élő” dokumentum, ez azt jelenti, hogy folyamatosan frissíteni kell új adatokkal, különösképpen miután néhány változást építettünk be a terméktervezési vagy gyártási folyamatba. Figyelembe kell venni, hogy az FMEA használható mind megelőző, mind korrekciós módon is, azonban az előbbi sokkal fontosabb [23].

Az FMEA módszer első verzióját 1949-ben az Amerikai Egyesült Államok hadserege alkalmazta, melyet MIL-P-1629 (military procedure – katonai eljárás) névvel dokumentáltak [31]. Az említett katonai eljárás később (1974-ben) további két katonai szabványt alapozott meg: MIL-STD-1629 és MIL-STD-1629A. Ezeket az elemzéseket használták ebben az időben a rendszerek hibamódjainak meghatározására. Az FMEA elemzés első hivatalos ma ismert felhasználása, 1965-ben volt és a repülőgépipar igényeinek kielégítésére szolgált. Konkrétan a NASA az „Apollo” nevű űrprojektjében használta [31]. Később, 1965-től az elemzést aktívan kezdték használni a repülés és az űripar igényeire, valamint a nukleáris ágazatban is [32]. Egy évtizeddel később, az FMEA-t az autóiparban is elkezdték alkalmazni, először 1973-ban informálisan, a Ford Motors-nál, majd pedig öt évvel később formálisan. A Ford Motors ezt a módszert megelőző módszerként valósította meg a minőségirányításban, mind a tervezési, mind a gyártási folyamat területén [5].

1984-ben az amerikai autóipari vállalatok a Ford Motors, a Chrysler és a General Motors közzétették az FMEA használatához a „Potenciális hibamód- és hatáselemzés kézikönyvet”. A kézikönyv használata nagyon bonyolult volt a különböző előírások közötti eltérések miatt. Továbbá a beszállítóknak is sok problémája volt az FMEA használatával. Ezen problémák miatt az AIAG standardizálta a módszer autóiparra vonatkozó végrehajtását, minden

beszállítóhoz igazítva egyetlen kézikönyvbe, amelynek eredményeként megjelenik a „Potenciális hibamód- és hatáselemzés” 1993-ban. A második változatot 1995. februárjában, a harmadik kiadást 2001. júliusában a negyedik és még mindig aktív pedig 2008. júniusában tették közzé [33].

Napjainkban, az FMEA széles körben elterjedt, elmondható, hogy használata általános gyakorlattá vált sok vállalatban a világ minden táján [31]. Onodera (1997) [34] az FMEA több mint 100 különböző alkalmazását azonosította Japánban. Sok más kutató is hangsúlyozza az FMEA széleskörű alkalmazását különféle iparágakban.

Néhány ezek közül:

- a leggyakoribb az autóipar és a repülőgépipar [12,20],
- a katona ipar [12,20,30],
- az elektromos alkatrészgyártó ipar [35,36],
- a nukleáris ipar [37,38],
- az orvostudomány és orvosi berendezések gyártása [12,20,38].

Továbbá a fentebb említetteken kívül az FMEA használata a következőkben is jelen van: kiskereskedelem, mechanika, építőipar, vegyipar és szolgáltatóipar, hardver és szoftver cégek, információsrendszerek fejlesztése, élelmiszer-előállító vállalatok, műanyaggyárak, erőművek, mélyépítés telekommunikáció stb. [12,20,31]

Az FMEA-t általában egy multidiszciplináris csapat végzi, az előre meghatározott FMEA-úrlap kitöltésével (FMEA jelentés). Az FMEA a kockázatok jellemzésére 3 különböző paramétert, illetve az ezekből számított mutatót használ. Súlyosság (S – Severity), Előfordulási gyakoriság (O=Occurrence), Detektálhatóság (D=Decettability) A hagyományos RPN-t (Risk Priority Number – Kockázati szám) az S- az O- és a D-index összeszorzásával kapjuk [12].

$$RPN = S \times O \times D \quad (1)$$

Általában mindhárom paraméternek 1-10 közötti értéke van az előre meghatározott skálán. Ez alapján az RPN 1-1000 között mozoghat. Vannak példák 1-5 közötti értéket használó skálára is [12]. Az autógyártásból eredő elfogadott szabály szerint a korrekciós intézkedések kötelezőek, ha az RPN meghaladja a 100-as értéket vagy a fentebb említett bármely három index értéke meghaladja a 8-at.

A korai elemzések idejében az FMEA volt az egyedül használható elemzés. Az autógyártásban az FMEA használatát két típusra lehetett osztani. A két fő típust az a szakasz határozza meg ahol, a termék jelenleg található. Ez lehet a tervezés vagy a gyártási folyamat szakasza. Ez alapján azt az FMEA-t melyben a termék a tervezési szakaszhoz kapcsolódik DFMEA-nak (Design Failure Mode and Effect Analysis – Konstruktív Hibamód és Hatás elemzés) nevezzük, míg a gyártási folyamattal kapcsolatos PFMEA-nak (Process Failure Mode and Effect Analysis – Folyamat Hibamód és Hatás Elemzés). Az egyik különbség a két típus között, hogy a DFMEA számára a végfelhasználó a vásárló, míg a PFMEA-nál a következő lépés a gyártási folyamat. Továbbá a PFMEA bonyolultabb és időigényesebb, mint a DFMEA [12].

Napjainkban számos különböző FMEA elemzés létezik. Néhány ezek közül [12]:

Rendszer vagy koncepció FMEA: Ezt az FMEA-t a rendszer funkcióinak ellenőrzésére használják. Általában a legkorábbi szakaszban hajtják végre mielőtt a többi szakaszt meghatároznák.

A már említett *DFMEA* és *PFMEA*, amelyeket a tervezés és a gyártás folyamatában használnak

Szerviz FMEA: Ezt az FMEA-t standard technikaként használják az alkatrészek és a rendszer értékelésére a termék tervezésének koncepcionális szakaszában. Az elemzés fő célja a termékhez kapcsolódó szolgáltatás javítása.

Környezet FMEA: Ezt az FMEA-t az időjárási körülmények értékelésére használják. Általában az elemzett design, termelés, gépek stb. körülményeinek ellenőrzése céljából végzik.

Gép FMEA: A gépek, szerszámok és berendezések állapotának ellenőrzése céljából végzik. Általában a DFMEA kiterjesztése.

Szoftver FMEA: Ez megegyezik a gép FMEA-val, de szoftverekre szakosodott.

Tulajdonság FMEA: Az ilyen típusú FMEA inkább módszertani, a termék tulajdonságaira fókuszál, melyet a vásárló javasol. Összehangolt tervezési és ellenőrzési módszer [12].

2.2.1. Hibamód- és hatáselemzés hátrányai

Annak ellenére, hogy az FMEA-t különböző szabványok határozzák meg és körülbelül 60 éve használatban van, még mindig vannak az elemzéshez kapcsolódó hiányosságok. Az FMEA hiányosságai három csoportba sorolhatók az FMEA területén felmerülő problémák jellegére vonatkozóan.

Ezek a hiányosságok a következők:

- az FMEA emberi tényező befolyásolásával kapcsolatos hiányosságok,
- a kockázatbecslés és értékelési hiányosságok,
- és az eljárási hiányosságok.

Ezeket a hiányosságokat a legfontosabbtól a kevésbé fontos irányába rangsoroljuk. Az FMEA hiányosságai maguk után vonzzák a PFMEA hiányosságokat is.

2.1.1.1. Az FMEA emberi tényező befolyásolásával kapcsolatos hiányosságai

Az FMEA-ban az emberi tényező a fő probléma. Az FMEA jelentések kitöltése általában az FMEA-csapat szubjektív véleménye szerint történik, mely az FMEA-t kevésbé ellenőrizhetővé teszi. A meghibásodások, hibahatások, okok, kockázati prioritási mutatók meghatározásának hitelessége (S, O valamint D) és az RPN szinte teljes mértékben a szakértői véleménytől függ. Ez a gyártási folyamat megbízhatóságának viszonylagosságához vezet. Néhány probléma az FMEA ilyen hiányosságával kapcsolatban:

- **Döntési problémák.** Az ilyen típusú probléma az FMEA teljes megvalósítása során felmerülhet. Az FMEA csapat megalakulásától kezdve, a döntéshozatalon és értékelési folyamaton keresztül a megoldás bevezetéséig [32,39].
- **Az emberi tényező öntudatlanságával kapcsolatos problémák az FMEA megvalósítása során [32,39].** Ezek a problémák sok iparágban előfordulnak, de különösen az autóiparban. A probléma előfordulásának fő oka a közös kultúra és filozófia hiánya a vállalatban belül. Az FMEA egy „élő” dokumentum, amelyet állandóan frissíteni kell. Ezért erősen ajánlott, hogy az FMEA elemzést lelkiismeretes alkalmazottak végezzék el. Néhány további probléma, amelyek befolyásolhatják ezt a motiváció és az idő hiánya.
- **Az FMEA megvalósítása időigényes [40].** Ezért az elemzés megvalósítása egy idő után unalmassá válik.
- **A megfelelő képzés hiánya [32].** Az FMEA hatékonyabb és eredményesebb megvalósítása érdekében tapasztalat szükséges. Azonban egy rossz tapasztalat hosszú távon az FMEA-csapatot rossz irányba

vezetheti. Egy 150 autóipari beszállítón elvégzett tanulmány kimutatta, hogy a PFMEA-t a PFMEA-csapatok nem érték meg megfelelően, ezért a FMEA-t csak egy további adminisztratív munkának tekintették.

2.1.1.2. Kockázatbecslési és értékelési hiányosságok

Az FMEA kockázatbecslési és értékelési kerete sok azonosított problémát tartalmaz, melyet számos különböző kutató azonosított már. Ezekről a problémákról egy teljes áttekintő tanulmányt készített Liu és mtsai. [20] körülbelül 75 tudományos cikk áttekintése alapján.

A kockázat értékelési problémához kapcsolódó FMEA hiányosságok a következők:

- RPN-korlátozások [20,33]. Ezeket a korlátozásokat az AIAG referencia kézikönyve tartalmazza az autóipar számára, valamint Liu és mtsai. által készült tanulmány is összefoglalja ezeket [20]. Liu és mtsai. kiemelik, a különböző szerzők által azonosított 7 legfontosabb RPN-korlátozást [20]:
 1. Az S-, O- és D-indexek különböző kombinációi ugyanazt az RPN-értéket eredményezhetik, de teljesen más kockázatokkal járhatnak.
 2. Az RPN számításának matematikai képlete megkérdőjelezhető.
 3. Az RPN nem használható a korrekciós műveletek hatékonyságának mérésére.
 4. Az RPN-értékek nem állandóak.
 5. Az RPN matematikai képlete nagyon érzékeny a kockázatértékelés során bekövetkező változásokra.
 6. Az RPN-elemeknek sok megduplázott tényezője van
 7. Az RPN csak három kockázati tényezőt vesz figyelembe.

- Az S-, O- és D-indexekkel kapcsolatos problémák [32, 41]. S-, O- és D-indexszel kapcsolatos szubjektív problémákat 3 kategóriába lehet sorolni. Az S-index a meghibásodás súlyosságát jelenti, általában minőségi szempontból megfigyelhető esetekben vagy bizonyos esetekben biztonsági szempontból. Egyéb tényezők, amelyek befolyásolhatják a súlyosságot (például költség vagy az idő) nem számítanak. Az O-index jelenti a legnagyobb problémát ugyanis teljesen függ a valószínűségtől és az előrejelzéstől. A D-index a legkevésbé problémás mindhárom index közül, még akkor is, ha egyes szerzők problémának tekintik ezt az indexet az értékének meghatározása szempontjából [42]. Továbbá mindhárom index külön megfigyelésén kívül Liu és mtsai. további három, az indexekkel kapcsolatos korlátozást említ az áttekintő cikkében [20]:

1. Az S-, O- és D-indexek relatív jelentősége nincs figyelembe véve. Ez azt jelenti, hogy ezek az indexek nem lehetnek azonos súlyúak. Például RPN érték (RPN = 128) az S-, O- és D-index értékeivel (8, 8 és 2) alacsonyabb lehet az RPN értékből (144) az S-, O- és D-index értékével (illetve 4, 6 és 6). Ezen egyensúlyhiány következtében, az első hiba fontosabb, mint a második, még akkor is, ha a másodiknak van magasabb RPN értéke.
2. Ez a három index nagyon bonyolult az értékelés szempontjából. Általában szélsőséges értékek határozzák meg. Ezért nincs egyértelmű meghatározása a kockázatoknak.
3. Mindegyik indexet különféle jelentéssel értékelik. Ezért az összeszorításuk kérdéses.

- A költségeket nem tartalmazza az FMEA [32]. A hibák által okozott költségek magasak lehetnek. Minden hiba, amely átmegy a valódi gyártási folyamaton és láthatatlanul érkezik az ügyfélhez pénzügyi fenyegetés jelenthet egy vállalat számára. A hibák súlyossági döntéshozatalában nincsenek költségek. Továbbá az ügyféllel / fogyasztóval kapcsolatos költségek mellett vannak olyan költségek is melyet a hibák okoznak, amelyek befolyásolják magát a vállalatot.

2.1.1.3. Eljárási hiányosságok

Az FMEA eljárási hiányosságai részben emberi tényezőtől függenek, de befolyásolja az FMEA szerkezete is. Mondhatni, hogy az ilyen típusú hiányosságok az interakció során jelentkeznek az emberi tényező és az FMEA szerkezete között (az FMEA-jelentés készítése). Ezt a fajta hiányosságot Johnson és Khan [32] vette észre, és „FMEA elemzési menedzsmentként” nevezte el.

Néhány ilyen típusú FMEA-hiányosságokkal kapcsolatos probléma a következő:

- Korlátozott hely az FMEA-jelentések teljesítésére. Az FMEA-jelentés teljesítésének helye korlátozott és bármilyen szélesebb körű magyarázat az átlátszatlansághoz vezethet.
- Nem lehet újra felhasználni az FMEA-jelentést [43].
- A különböző hibamódok- és hatások közötti kölcsönös függőséget nem veszik figyelembe [20].
- Helytelen megközelítés a hiba okainak azonosításához [29].
- Nincs meghibásodás-szabványosítási elv, és ez az oka annak, hogy a hiba megismétlődik az FMEA-jelentésben [29].

- Az FMEA-jelentés teljesítése időigényes folyamat [39,44]. Az idő nagyon fontos befolyásoló tényező az FMEA számára, mivel befolyásolja az emberi tényezőt. Az FMEA megvalósítása az nem az alkalmazottak elsődleges munkája, hanem további időigényes tevékenység.
- Ez a megközelítés nem említi a folyamatos javulást. Ezért a kudarcok általában csak akkor javulnak vagy oldódnak meg, ha az RPN vagy néhány S-, O- vagy D-index átlépi a határvonalat [44].

2.3. Ipar 4.0

A digitális gyártás a gyártás integrált típusa, amelyet számítógépes rendszer irányít - ez egy ígéretes gyártási formának bizonyult az ipar 4.0 számára. A digitális gyártás akkor a legrealisabb, ha a hagyományos gyártási technológiákat digitális technikákkal kombinálják [45]. Számos kulcsfontosságú tényezőt kell figyelembe venni a digitális gyártás megvalósításakor, és számos területet, ahol a digitális gyártás jól működik [46]. Az ipar 4.0 vagy a negyedik ipari forradalom, zárt és összekapcsolt rendszerekre utal, amelyek elhomályosítják a határokat a valós és a virtuális gyárak között, azáltal, hogy kiber-fizikai rendszereket (CPS) hoznak létre.

A big data-t melyeket nagy adatbázisok tartalmaznak, folyamatosan frissítés alatt állnak, ezeket nem lehet hagyományos módszerekkel elemezni [47,48]. A CPS egy számítási elemekkel együttműködő rendszer mely, fizikai entitásokat irányít. A CPS továbbá egy fizikai, tervezett rendszer, amelynek működését ellenőrzi, koordinálja, kontrollálja és integrálja egy számítástechnikai és kommunikációs mag.

Az ipar 4.0 leírható a termelés és a kiber-fizikai rendszerrel rendelkező rendszerek összekapcsolódásaként is. Az ipar 4.0 alapvető eleme a kiber-

fizikai beágyazott rendszer, amely érzékelőkre támaszkodik az adatok rögzítésénél és manipulálja a fizikai folyamatokat a digitális hálózatokban működtetett végrehajtók segítségével [49]. Számos szakirodalmi áttekintése alapján a leglényegesebb alapvető elemei a kapcsolódás, az okos gépek és termékek, decentralizáció, big data és kiberbiztonság [50].

A CPS három fő jellemzője: az intelligencia, az összekapcsoltság és a változásokra való reagálás [49]. A valós és big data kombinációi új lehetőségeket kínálnak a folyamattervezésre is.

2.3.1. Ipar 4.0 eszközök

Kiterjedt szakirodalom áll rendelkezésre a valós idejű döntéstámogató rendszerekről a tervezéshez és ütemezési műveletekhez az ipar 4.0-ban. Az IoT, big data, felhőszámítás, szimuláció, kibővített valóság, robotika, adalékanyagok gyártása, kiberbiztonság, valamint a horizontális és vertikális rendszerek integrálása az ipar 4.0 kulcsszavai. Az ipar 4.0 koncepció összekapcsolódik a CPS integrációjának technikai perspektíváival a gyártási műveletekbe, valamint az IoT technológiáinak integrálása az intelligens gyárak, intelligens termékek és kiterjesztett értékű hálózatok által képviselt ipari folyamatokba. Ezek vertikális, horizontális és végpontok közötti integrációk [51-53]. Az új gyártási folyamatban az újabb gyárakban a digitális gyártás egyesül Ipar 4.0 technológiákkal, ideértve a 3D-nyomtatást, az IoT-t, a big data-át, a szimulációs eszközöket, és a háromdimenziós vizualizációt [54]. A szerzők a [55,56]-ban kiemelték a valós idejű ütemezés jelentőségét a HMLV gyártásában, hangsúlyozva a csoportos szekvenciák használatát a döntéstámogató rendszerben, továbbá elmagyarázzák, hogy a valós idejű döntések három típusba sorolhatók: döntések a műveletek megkezdéséről, döntések a műveletek megszakításáról és a feldolgozóegységek leállításáról, valamint a megszakított műveletek folytatására vonatkozó döntések. A

permutálható műveletek csoportos sorrendjét javasolták használni a rendelkezésre álló ütemezési módszerek részhalmazaként.

A [57] cikkben a szerzők a túlórák ütemezését javasolták, amely egy véges kapacitású valós idejű alkalmazás ütemezése, amely meghatározza, hogy mely munkaközpontokra van szükség, mikor és mennyi túlórászás szükséges a túlóra költségein belül a kért határidő betartásához. Véges kapacitású valós idejű ütemezést és tervezési rendszert használtak. Az [58]-ban a szerzők az intelligens gyártás integrációját vizsgálták és ipar 4.0 gyártási környezetben. Intelligens ütemezést vezettek be, hogy rugalmas és hatékony gyártási ütemezést érjenek el, felhővel felszerelt 4.0 környezetben. Az IoT, a big data és a rádiófrekvenciás azonosító (RFID) technológiák, amelyek összefonódnak oly módon, ahogyan a munkát végzik, az üzleti logisztikai folyamatokat végrehajtják, valós időben jelennek meg az ERP (Enterprise Resource Planning-Vállalatirányítási rendszer) rendszerben.

Az [59] szerzője szerint különböző típusú döntéstámogató rendszerek léteznek. Adat-, modell-, tudás-, dokumentum- és kommunikáció-vezérelt rendszerek a leggyakoribb döntéstámogató rendszerek (DSS); emellett az intelligencia- és adatközpontú DSS-ek nagyon előnyösek. A multiágens alapú rendszer, egy komplex autonóm és intelligens rendszer, amelyet népszerűen alkalmaznak a gyártás ütemezésében, és alkalmazhatóságát. Minden ügynök meghatározza a saját cselekvési menetét, valamint más ügynökök befolyásolhatnak egy ügynököt döntése, koordinációja vagy együttműködése útján. Az alrendszereket képviselő ügynökök képesek megoldani a saját területen belüli problémákat saját ellenőrzésük és végrehajtásuk révén. Továbbá minden ügynök végrehajtja a saját munkáját anélkül, hogy más ügynöktől függene.

A [60] szerzője döntések támogatásaként tanulmányozta a valós idejű monitoring rendszer kialakítását az árvízveszély enyhítésére. Ebben a

tanulmányban a fényképezést, a kommunikációt, és a geometria-információt, valamint a hálózati technológiát alkalmazták a valós idejű képfigyeléshez kritikus körülmények között. A felhasználóknak mobiltelefonokat javasoltak használni, hogy valós idejű információkat kapjanak az árvízzel kapcsolatos információkról bárhol és bármikor.

2.3.2. *Folyamatok mérése*

A kutatás során a kockázatszámításhoz alkalmazott adatokat valós időben mérjük. Ezért fontos, hogy a mérés az előírásoknak megfeleljen és egy előre meghatározott standard keretrendszerben menjen végbe mindig. Ennek a keretrendszernek a létrehozásával a mérés és minősítés tudományága által nyújtott anyagot használom.

A mérés jelenségek, tárgyak, folyamatok előre meghatározott tulajdonságainak nagyság meghatározása, amely során megfelelő mérőrendszerrel és módszerrel megállapítjuk, hányszorosa a vizsgált tulajdonság az egységül választott mennyiségnek, a mértékegységnek [61]. A valós világ leírásának, megértésének eszköze a mérés, amely lehetővé teszi az objektív megismerést, beavatkozást és előrejelzést. Az üzleti életben és a társadalmi tevékenységek során született döntések alapja is a mérés. [62].

A mérés alapja a kvantifikáció. Egy tulajdonság akkor válik kvantifikálttá, ha mibenlétére, okára, vagy az általa kiváltott hatásra magyarázatot találunk, és azt képesek vagyunk értelmezni [62].

A mérés folyamata során valamilyen mérési eszköz előállítja az x ismeretlen, mérendő mennyiség N mérőszámát. Ez a tevékenység repetitív és mentes a szubjektivitástól. Az alap egyenlet:

$$x(1 + h) = m = N * \Delta x \rightarrow \frac{x}{\Delta x} (1 + h) = N \quad (2)$$

Ahol,

x = mérendő

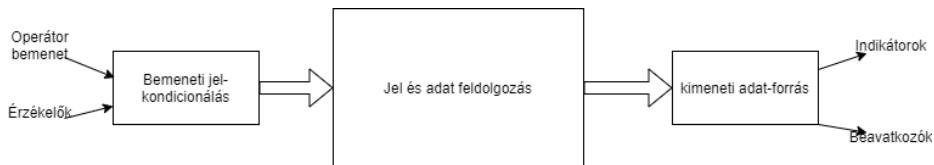
Δx = egység

m = mért érték

N = mérőszám

h = relatív hiba

A mérési folyamat az 1. ábrán látható



Ábra 1: Mérési folyamat

Forrás: Saját szerkesztés [62] alapján, 2020.

A mérési folyamat elemei a következők: cél, mérendő mennyiség, befolyásoló mennyiség, elv, módszer, eljárás és végrehajtás. Minden mérésnek megvan a miértje, a célja amiért a mérési folyamat létrejött. Minden esetben definiálni szükséges a mérendőt és meg kell állapítani egy (mérték)egységet hozzá. A mérés során jelen lehet olyan, a mérendő mennyiségtől független mennyiség, amely befolyásolja a mérés eredményét, ez a befolyásoló mennyiség. Az elv a mérés tudományos alapja, a módszer a műveletek összessége [62].

A folyamateljesítmény-mérés információt szolgáltat a folyamatirányítás számára különböző mutatószámok, KPI (Key Process Indicator – kulcsfolyamat-indikátor) segítségével. Ezek lehetnek költségekkel kapcsolatos mutatószámok, de a mutatóknak mindenképp olyan nem pénzügyi jellemzőkre is kell fókuszálniuk, mint a minőség vagy az idő. A folyamat teljesítményének grafikus ábrázolása a folyamatirport, ahol a mutatószámok tervezett és tényleges értékét is fel kell tüntetni [24].

A folyamatteljesítmény négy különböző kategóriába sorolható. Idővel kapcsolatos folyamatteljesítmény, költséghez kapcsolódó folyamatteljesítmény, minőséghez kapcsolódó folyamatteljesítmény, és a flexibilitáshoz kapcsolódó folyamatteljesítmény. A folyamatteljesítmény méréséhez elengedhetetlen az informatikai rendszer megléte [24].

A folyamatteljesítmény-mérés során alkalmazott informatikai rendszer feldolgozza az adatokat, meghatározza a mutatószámok értékeit és rendelkezésre bocsátja a felelős személy számára. Szokás ezt folyamatbeszámolót (cockpitnek) is nevezni. Az informatikai rendszerrel szemben támasztott követelmények a következők:

- Mutatószámok a döntési szempontból relevánsak.
- Magas aggregáltsági szinten ábrázolja a mutatószámokat.
- Ábrázolja a mutatószámok időbeli alakulását.
- Gyors oksági elemzés lehetősége.
- Grafikus megjelenítés, dashboarding.
- Ütemezett beszámolás [24].

A mutatószám-értékek megadásához szükséges adatállományok különböző operatív rendszerekben vannak, ezért a folyamat-beszámoló IT-alkalmazás tervezésénél és kivitelezésénél különös figyelmet kell fordítani az interfészek kezelésére és a rendszerintegrációra.

Erre vonatkozó követelmények a következők:

A folyamatteljesítmény-értékelés és a folyamatirányítás nem egyetlen üzleti szempont alapján történik, hanem a költség, idő, minőség szempontok együttes vizsgálatán keresztül. Az ilyen összetett mérőszámok nem állíthatók elő egyetlen forrásrendszerből. A folyamatok költségelemzéséhez szükséges alapadatok a legtöbb esetben a vállalat integrált irányítási rendszerének pénzügyi moduljában található, míg a folyamat időbeli és minőségi szempontú

mutatói rendszerint a termelésirányítási rendszerekből vagy különböző műszaki irányítási rendszerekből származnak. Tehát a többdimenziós, komplex mutatószám-értékek meghatározása csak magas rendszerintegrációval lehetséges több adatforrás összekapcsolásával [24].

A folyamatteljesítmény értékelő mutatók képzése megköveteli a hozzájuk kapcsolódó információk és adattartalmak összehangolását. Tartalmilag egységesített adatállományokra van szükség az összekapcsolt forrásrendszerekben. Biztosítani kell a definíciók és jellemzők azonosságát. A folyamatteljesítmény mérése időben és a folyamat szintjén akkor lehetséges, ha forrásrendszerek, illetve forrásadatok harmonizációja megfelelően történik és beilleszthető a vállalati célrendszerbe [24].

Biztosítani kell a lehetőségét annak, hogy a későbbiekben, új összetett mutatószámot képez a vállalat. Az összes lehetséges adatot és információt össze kell gyűjteni. Szükséges a magasfokú adattranszformáció lehetőségének biztosítása [24].

A folyamatok irányítása átível a vállalati funkciókon. Tehát meg kell határozni azokat a folyamat-felelősöket, akik a folyamatbeszámoló-felelősök lesznek. A felhasználói kör összetett képet mutat, amelyet a tervezésnél figyelembe kell venni a jogosultságok kiosztásánál [24].

2.4. Az üzletifolyamat szimulációja

Az üzletifolyamat-menedzsmenten belül a folyamatszimuláció az egyik legközkedveltebb folyamatelemző módszer. A folyamatszimuláció segítségével különböző folyamatváltozatok kimenetét állíthatjuk elő, különböző paraméterek mentén anélkül, hogy a valóságban lefutna a folyamat. Ezzel megkönnyítve a menedzsment számára a döntések meghozatalát, és így a kockázatok is csökkennek.

Összetett problémák megoldása esetén sok különböző elemző analitikusmodell áll rendelkezésre. Sorbanállási modellek, Markov-lánc, vagy a sztochasztikus Petri-hálózat [63]. Ha egy egyszerű elemző modell képes megoldani a problémát, akkor nem igényelt a folyamat szimuláció, habár a fentebb említett analitikus modellek kevesebb paraméterrel és beállítással dolgoznak, ezzel sok lehetséges kimenetet kizárnak a megoldások közül.

Komplex problémák és kockázat kezelése esetében a szimulációnak a következő előnyei vannak [64]:

- A szimuláció flexibilis: Egyszerű és komplex rendszerek is vizsgálhatók szimuláción keresztül.
- Különböző KPI-ok lehetnek a szimuláció középpontjába. Átfutási idő, átfutási költség, minőség.
- A szimuláció használhatja az emberi kreativitást. Különböző folyamatvariánsok kimenetét kaphatjuk meg vele.
- Egyszerű megérteni. Az üzleti folyamatszimuláció nem más, mint a folyamatmodellek újrajátszása és a lehetséges kimenetek generálása [64].

Természetesen, mint minden más komplex rendszert megoldó módszernek, a szimulációnak is vannak hátrányai.

Ezek a következők:

- Bizonyos esetekben nagyok sok időbe telhet az üzleti folyamat szimulációja. Összetett modellek elkészítése időigényes, magas számítási kapacitást igényelnek és ennek hiányában futtatásuk is sokáig tarthat.

- Az üzletifolyamat-szimuláció eredményének megbízhatósága sokszor nehezen számítható, és nem mindig sikerül megbízható eredményt elérni.
- Csak azt veszi figyelembe a szimuláció, amit a szimulációs modellbe beleépítettek. Ha valamilyen paraméter kimarad, és annak lenne hatása az eredményre, akkor a szimuláció nem elfogadható [64].

A korrekt, hatékony és jó tervezett üzleti folyamatok elengedhetetlenek a túlélés érdekében a mai versenyszférában. A rosszul tervezett és futtatott üzleti folyamatok, hosszú átfutási időkhöz, hosszú reakcióidőkhöz, alacsony szervizteljesítményhez, elégedetlen vevőkhöz és imázsromláshoz vezethet. Ezért nagyon fontos, hogy egy új folyamatot kellő alaposággal elemezzünk annak implementálása előtt, valamint fontos, hogy kellő alaposággal elemezzük a lehetséges változtatásokat a meglévő folyamatainkon [65].

A szimulációs modell építéséhez és a kísérletek futtatásához szükségünk van egy szimulációs eszközre.

Üzletifolyamat szimulációja esetében kettő kategóriába sorolhatók ezek az eszközök [64]:

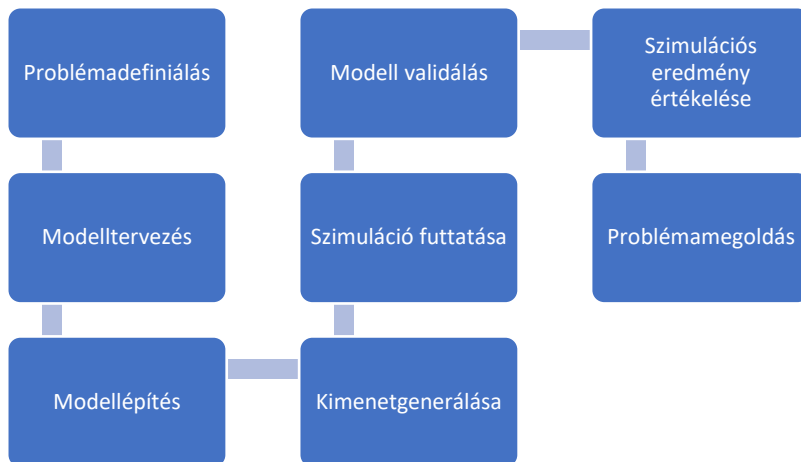
- Szimulációs programozási nyelv. Ezek kimondottan folyamatszimulációs modellek programozását futtatását és értékelését biztosítják. Programozási nyelvek: Simula, Simscript, Simpas, GASP.
- Szimulációs csomagok. Ezek olyan előre szoftverbe épített blokkok, amelyek segítségével különböző területeken, különböző céllal tudjuk a folyamatokat szimulálni. A legtöbb esetben egy folyamatmodellen történik a szimuláció. Gyártási folyamatok szimulációjára kedvelt szoftvercsomagok. Sim-Factory, Witness,

Taylor. Workflow elemzésre alkalmas szoftvercsomagok: COSA, Auraportal. A legtöbb BPM-rendszer tartalmaz folyamatszimulációs csomagot [64].

A szimulációs programozási nyelv előnye, hogy bármilyen folyamatot képes kezelni és modellezni. A szimulációs modell megépítése és programozása komplex folyamat esetében sokáig tarthat. Ezzel szemben a szimulációs programcsomag előre meghatározott elemekkel rendelkezik, amelyek a megfelelő sorrendbe pakolásával elkészül a folyamatmodell, amely alapján a szoftver megépíti a szimulációs modellt.

Szerencsére van olyan alkalmazás a piacon, amely mind a két kategória előnyét kihasználva kombinálta a szimulációs csomagokat a programozási nyelvvel. Ilyen megoldás az ARENA Simulation.

Bármelyik megközelítés és alkalmazás esetén a szimuláció a 2. ábrán látható lépéseken keresztül megy végbe:



Ábra 2: Üzleti folyamat szimuláció lépései

Forrás: Saját szerkesztés, 2020.

Az üzletifolyamat-szimuláció során a következő bemenetekre van szükségünk. A folyamatmodell, amely a grafikai leképezése a folyamat

elemeinek és a folyamat logikai struktúrájának. A tevékenységek adataira, amely lehet költség és idő, valamint a tevékenységek bekövetkezési valószínűségének és a tevékenységidők eloszlásfüggvényére.

Mivel a folyamatmodell egy kulcs eleme a folyamatszimulációnak ezért a 2.4.1-es fejezetben bemutatom a lehetséges folyamatmodellezési eszközöket

2.4.1. Folyamatmodellezési eszközök

A folyamatmodell definiálja a folyamat elemeit, azok közötti kapcsolatot, sorrendjét valamint az erőforrásokat, amelyet a folyamat a lefutása közben használ. A folyamatmodellezés alkalmas a jelenlegi helyzet bemutatására, és a lehetséges hibák és gyenge pontok feltárására, továbbá alkalmas a jövőbeli folyamatmodell elkészítésére. A jövőbeli modell segítségével láthatjuk, hogy milyen lehet a lefutás, az egyes változtatásoknak milyen hatása lehet a folyamatra. A folyamatok grafikus leképezésére számos módszer áll rendelkezésre. Az üzleti folyamatok modellezésére és szimulációjára használt módszerek a következők: EPC (Event-driven Process Chain diagram-Eseményvezérelt folyamatlánc diagram), BPMN 2.0 (Business Process Modeling Notation 2.0) és a Petri Net.

EPC

Az eseményvezérelt folyamatlánc-diagram a tevékenységek, események és logikai operátorok sorrendjében építi fel a folyamatot. A tevékenységek és események a folyamat struktúrájának megfelelően váltakoznak és hozzák létre a folyamatot. Az EPC a folyamat időbeli és strukturális lefutása. Minden folyamatot eseménnyel kezdünk és eseménnyel zárunk. Esemény után esemény nem következhet. Ha több ág csatlakozik be a folyamatba akkor logikai operátorok használata kötelező [66].

Tevékenység: művelet, cselekvés, folyamat, amelynek van erőforrása és időben és térben állapotváltozás bekövetkezéshez vezet. Tevékenységeknek csak egy bemenete és egy kimenete lehet. Tevékenység után tevékenység következhet.

Esemény: Az esemény valamilyen tevékenység eredménye, amely az adott időpontban a folyamatban szereplő információval rendelkező objektum állapotát írja le. Ez az állapot vezérli a folyamatot, azaz tevékenységet indukál. Az események és tevékenységek váltakozásával jön létre, az eseményvezérelt folyamatlánc.

Logikai operátorok: A folyamat lefutásában a tevékenységek és események logikai kapcsolatát határozzák meg. Olyan esetben kötelező a használatuk, ha több bemenet fut egy tevékenységhez vagy egy tevékenységet több kimenet hagy el. „AND” operátor használatával a párhuzamos folyamat lefutásokat tudjuk prezentálni, „XOR” operátorral azt a szituációt prezentáljuk, amikor egy tevékenység után több lehetséges kimenet következhet, de csak 1-re van esély. „OR” operátort akkor alkalmazzuk, amikor az „XOR”-t csak nem zárjuk ki a párhuzamos lefutás lehetőségét. AZ EPC nagyon alkalmas gyártási folyamatok modellezésére, ugyanis a gyártási folyamatban található tevékenységsorozat konzisztens megjelenítésére és leírására képes, figyelembe véve az időbeli és tartalmi függőségeket [66].

BPMN 2.0

Egységesen elfogadott, egyszerűen alkalmazható folyamatmodellezési jelölő rendszer. A módszer alkalmazásával az üzleti élet bármelyik folyamata modellezhető. Ezt biztosítja a több mint 70 különböző modellelem. Üzleti elemzők és technológiai fejlesztők alkalmazzák főleg ezt a grafikus jelölő nyelvet. Felépítésében nagyban hasonlít az EPC-re ugyan is, a tevékenység, esemény és logikai operátorok kategóriái itt is megtalálhatóak. Azonban

minden kategória ki van egészítve plusz elemekkel, amely segítségével különböző szituációk is modellezhetők [67].

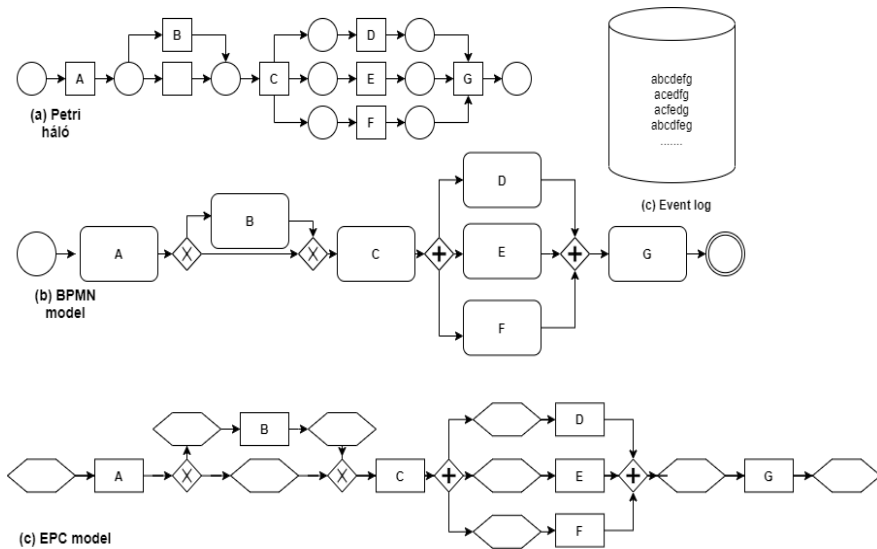
Petri Net (Petri-hálózat)

A Petri-hálózat egy matematikai modellezési nyelv, amely segítségével elosztott és párhuzamos folyamatok, rendszerek modellezhetők. Egyidőben szolgáltat grafikus reprezentálást és matematikai leírást, amely segíti az összetett rendszerek gyors áttekintését [68].

A Petri-hálózat egy irányított és súlyozott gráf, amelynek a következő elemei vannak:

- Pozíció: A rendszer egy adott pillanatban leírt állapotát jelenti.
- Tranzíció: A tevékenység, folyamat, amely bemenettel rendelkezik vagy előállít egy kimenetet.
- Élek/nyilak: Kapcsolatot teremtenek a pozíciók és tranzíciók között.
- Token: Adott eset a folyamatban, amely megteremti az áramlást az elemek között [68].

A Petri-hálóok hátránya, hogy komplex problémák esetében, hosszú folyamatok esetében az elkészített grafikus leképezés átláthatatlan és sok időt felemészt annak a megtervezése, megalkotása.



Ábra 3: Folyamatmodellek; (a) Petri net, (b) Event log, (c) BPMN, (d) EPC

Forrás [64], Saját szerkesztés 2020.

A 3. ábrán látható a három különböző folyamatleíró nyelv. A bemeneti forrás a (b) eventlog, amely tartalmazza a lehetséges folyamat-lefutásokat. A 3. ábrán látható az (a) modell, amely esetében a feliratozott tranzíciók a folyamat tevékenységei, és a tevékenységek a pozíciók által kontrolláltak. A tevékenységek akkor végezhetőek el, ha minden pozícióban található token. Az 3 ábrán a (c) modell, egy BPMN 2.0 nyelvvel készített folyamat grafikus megjelenítés. Ez a folyamatmodell ebben az esetben a legegyszerűbb és ez tartalmazza a legkevesebb elemet. A (d) folyamatmodell EPC leíró nyelven készült. Mind a BPMN 2.0 mind az EPC nagyon hasonló logikai operátorok meglétével alakítja a folyamatstruktúrát, míg a Petri-hálózat esetében az elemek kapcsolódási sorrendje határozza meg a logikai kapcsolatot.

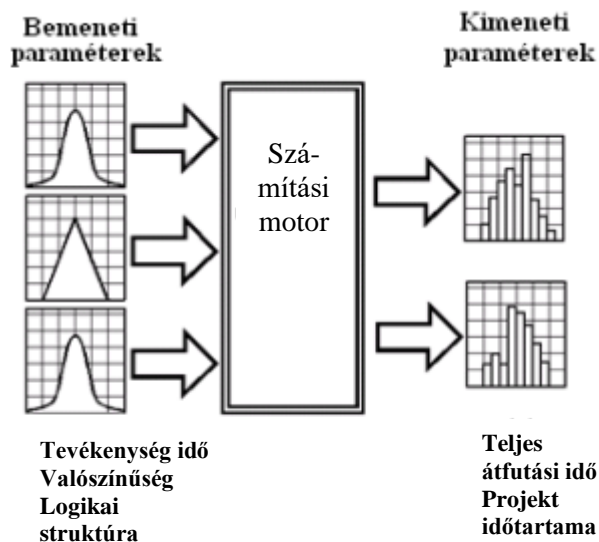
2.4.2. Monte-Carlo szimuláció

A Monte-Carlo szimuláció 1945-ben Neumann János és Stanislaw Ulam munkássága révén jött létre, mely a mai napig széleskörűen használt módszer. Valószínűségeken alapuló sztochasztikus szimuláció, amely különböző kísérletek által generált eredményekkel próbálja a valóságot közelíteni, úgy, hogy a vizsgálandó entitás (ami lehet rendszer, tevékenység, funkció, személy) várható értékét hozza létre. Döntéstámogatás területén közkedvelt megközelítésről van szó, amely a gazdasági problémák megoldására, kockázatok kezelésére alkalmas. Emellett használják a hadvezetés, időjárás, orvoslás, mezőgazdaság területén is. Lényege a véletlen számok generálása az előre definiált valószínűségi eloszlások alapján. Az eredmények megbízhatóságát a nagyszámú véletlen mintavételezés biztosítja, amely az üzleti folyamat szimulációja esetében legalább 1000 kísérleti futtatást feltételez [64].

A szimulációhoz szükséges egy matematikai modell létrehozása, amely elkészülhet a folyamatmodell alapján. A szimuláció tárgyát képező folyamat lefutását különböző tényezők befolyásolják. Ezeknek a tényezőknek a folyamatra gyakorolt hatáseloszlását definiálhatjuk elméleti és gyakorlati úton. A Monte-Carlo szimuláció figyelembevéve a tényezőket generál egy véletlenszerű folyamatrealizációt a tetszőleges eloszlású valószínűségi tényezők előállításával. A szimuláció az előre definiált kísérletek számával megegyezően különböző folyamatlefutásokat generál. Ezt egy számláló segítségével teszi meg, amely kezdetben 0 értékre van állítva, és egészen addig hozzá ad egy értéket az előző értékhez amíg el nem éri az előre definiált kísérletek számát [64].

A számítógépes véletlenszám-generálás az egyenletes eloszlást használva valósul meg. Valamennyi számítási célokot szolgáló programcsomag tartalmaz véletlenszám -generátort. Ez a Microsoft Excel és a Gsheet esetében a *vél()*, R-ben a *runif()*, matlabban *rand()* függvények. A szoftverek általában Mersenne Twister-eljárást alkalmaznak a pszeudó-véletlenszám generálására. Továbbiakban a véletlenszámokon pszeudo, számítógép által generált véletlen számokat értek.

A Monte-Carlo szimuláció input- output- modelljét a következő 4. ábra reprezentálja.



Ábra 4: Monte-Carlo szimuláció folyamat input- output- modellje

Forrás: [69], 2020.

Ha egy adott algoritmus alapján számoljuk ki x_1, x_2, \dots, x_n számokat, mint véletlen számok, akkor ezeket pszeudovéletlen számoknak nevezzük. A

véletlen szám generáló algoritmusok többnyire lineáris kongruencia reláció alapján működnek [70]

$$x_i = \alpha x_{i-1} + c \pmod{m} \quad (3)$$

Ahol x_0 a kezdő érték, α konstans szorzó, c növekmény, m modulus, megoldva a fenti egyenletet a következőt kapjuk:

$$x_n = \left[\alpha^n x_0 + c \frac{\alpha^n - 1}{\alpha - 1} \right] \pmod{m} \quad (4)$$

A következő paraméterek határozzák meg a generátor „jóását”.

- Legyenek függetlenek és azonos eloszlásúak
- Ismétlődési periódus legyen hosszú, hogy változatos problémáknál lehessen alkalmazni
- Ugyanazt a sorozatot adja ugyanazokra a paraméterekre
- Legyen gyors és egyszerű
- Lehessen könnyen szeparált sorozatokat készíteni [70].

A számítógépes algoritmusok rendszerint diszkrét egyenletes eloszlást próbálják közelíteni, mert ebből más eloszlású véletlen számokat is előlehet állítani.

A Gsheet és az Microsoft Excel esetében az egyik elérhető módszer az Inverzfüggvény módszer. Ha F szigorúan monoton növekvő eloszlásfüggvény és X F eloszlású, akkor $Y = F(X)$ egyenletes eloszlású a $[0,1]$ intervallumon. Fordítva, ha $X \sim U(0,1)$, akkor $Y = F^{-1}(X)$ éppen F eloszlású. Következmények:

1. Ha $X \sim U(0,1)$, akkor $Y = (b-a)X + a \sim U(a,b)$
2. Ha $X \sim U(0,1)$, akkor $Y = -\frac{1}{\lambda} \ln(X) \sim EXP(\lambda)$
3. Ha $X \sim U(0,1)$, akkor $Y = \text{tg}(\pi(X - 0,5))$ standard Cauchy eloszlású
4. Ha $X \sim U(0,1)$, akkor $Y = \varphi^{-1}(X)$ standard normális eloszlású [70]

Ha X diszkrét valószínűségi változó lehetséges értékeinek a száma véges, a lehetséges értékek

$$x_1, x_2, \dots, x_n, \text{ és } p_i = P(X = x_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

akkor a

$$\sum_{i=1}^n x_i p_i \quad (5)$$

Mennyiséget *várható érték*nek nevezzük. X várható érték jelölése $E[X]$. A variancia $\text{Var}[X]$ a várható érték eltérésének a mértéke. Ha X -nek nagy a varianciája akkor sok minta található messze az átlagtól. X várható értéke definiálható μ -vel míg a variancia definiálható a σ^2 -el [64]. A kapcsolat a várható érték és a variancia között, és a következő képlettel definiálható:

$$\text{Var}[X] = E[(X - \mu)^2] = E[X^2] - \mu^2 \quad (6)$$

Mivel a variancia az átlagtól való eltérés négyzetének várható értéke, a $\text{Var}[X]$ négyzetgyök jobb mérőszám az átlagtól való eltéréshez. Tehát $\sigma = \sqrt{\text{Var}[X]}$, a szórása az X -nek.

2.4.3. Lehetséges eloszlások

A matematikában rengeteg különböző valószínűségi eloszlás létezik, természeti jelenségek, kísérletek megfigyeléséből, vagy matematikai modellek következtében kialakuló eloszlások [64].

DEFINÍCIÓ: A $X: \Omega \rightarrow \mathbf{R}$ leképezését *valószínűségi változónak* nevezzük, ha

$$\{X < x\} = \{\omega \mid \omega \in \Omega, \quad X(\omega) < x\} \in \mathcal{F} \quad \forall x \in \mathbf{R} \quad (7)$$

DEFINÍCIÓ: Az

$$F(x) = P(X < x) \quad (8)$$

Képlettel meghatározott valós függvényt, az X valószínűségi változó *eloszlásfüggvényének* nevezzük [70].

Legyen F az X valószínűségi változó eloszlásfüggvénye és $a, b \in \mathbf{R}$, ekkor

1. $P(a \leq X < b) = F(b) - F(a)$,

2. $P(X = a) = F(a + 0) - F(a)$

DEFINÍCIÓ: Az X valószínűségi változó *diszkrétnek* nevezzük, ha lehetséges értékek $X(\Omega)$ halmazának számossága megszámlálhatóan végtelen [70].

Ebben az esetben a diszkrét valószínűségi változók felírhatóak egy sorozatként.

DEFINÍCIÓ: Ha létezik f nem negatív valós függvény, melyre

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t)dt, \quad \forall x \in \mathbf{R} \quad (9)$$

akkor f az F eloszlásfüggvényhez tartozó *sűrűségfüggvény*. A *sűrűségfüggvény* létezése azt jelenti, hogy az F eloszlásfüggvény abszolút folytonos. A sűrűség függvény nem negatív és

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t)dt = 1 \quad (10)$$

A valószínűségi változót folytonosnak nevezzük, ha létezik sűrűségfüggvénye [70]

A 2. táblázat tartalmaz néhány jól ismert diszkrét valószínűségi eloszlást azok paramétereivel, várható értékével és a varianciával.

Táblázat 2: Diszkrét eloszlások

Eloszlás	Tartomány	$P[X = k]$	$E[X]$	$Var[X]$
Bernoulli $0 \leq p \leq 1$	$k \in \{0, 1\}$	$\begin{cases} 1 - p & k = 0 \\ p & k = 1 \end{cases}$	p	$p(1 - p)$
Egyenletes $a < b$	$k \in \{a, \dots, b\}$	$\frac{1}{(b - a) + 1}$	$\frac{a + b}{2}$	$\frac{(b - a)((b - a) + 2)}{12}$
Binomiális $0 \leq p \leq 1$ $n \in \{1, 2, \dots\}$	$k \in \{0, 1, \dots, n\}$	$\binom{n}{k} p^k (1 - p)^{n - k}$	np	$np(1 - p)$
Geometrikus $0 \leq p \leq 1$	$k \in \{1, 2, \dots\}$	$(1 - p)^{k - 1} p$	$\frac{1}{p}$	$\frac{1 - p}{p^2}$
Poisson $\lambda > 0$	$k \in \{0, 1, \dots\}$	$\frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$	λ	λ

Forrás: Saját szerkesztés, 2020.

A következő 3. táblázat tartalmazza a folytonos valószínűségi eloszlásokat.

Táblázat 3: Folytonos eloszlások

Eloszlás	Tartomány	$f(x)$	$E[X]$	$Var[X]$
Egyenletes $a < b$	$a \leq x \leq b$	$\frac{1}{b - a}$	$\frac{a + b}{2}$	$\frac{(b - a)^2}{12}$
Exponenciális $\lambda > 0$	$x \geq 0$	$\lambda e^{-\lambda x}$	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{1}{\lambda^2}$
Normális $\mu \in \mathbf{R}$ $\sigma > 0$	$x \in \mathbf{R}$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}}$	μ	σ^2
Gamma $r, \lambda > 0$	$x \geq 0$	$\frac{\lambda(\lambda x)^{r - 1} e^{-\lambda x}}{\Gamma(r)}$	$\frac{r}{\lambda}$	$\frac{r}{\lambda^2}$
Erlang $\lambda > 0$ $r \in \{1, 2, \dots\}$	$x \geq 0$	$\frac{\lambda(\lambda x)^{r - 1} e^{-\lambda x}}{(r - 1)!}$	$\frac{r}{\lambda}$	$\frac{r}{\lambda^2}$
X^2 $v \in \{1, 2, \dots\}$	$x \geq 0$	$\frac{\frac{1}{2}(\frac{1}{2}x)^{r - 1} e^{-\frac{1}{2}x}}{\Gamma(\frac{v}{2})}$	v	$2v$
Béta $a < b$ $r, s > 0$	$a \leq x \leq b$	$\frac{1}{b - a} \frac{\Gamma(r + s)}{\Gamma(r)\Gamma(s)} \left(\frac{x - a}{b - a}\right)^{r - 1} \left(\frac{b - x}{b - a}\right)^{s - 1}$	$\frac{a}{r + s} + (b - a) \frac{r}{r + s}$	$\frac{rs(b - a)^2}{(r + s)^2(r + s + 1)}$

Forrás: Saját szerkesztés, 2020.

A folyamatok bemeneteinek érkezését sokszor negatív-exponenciális eloszlás segítségével modellezzük. Az I a folyamat-bemenetek intenzitását jelenti, vagyis újonnan érkezők várható időegységét, ha személyekről beszélünk. X negatív-exponenciálisan elosztott véletlen változó, amely az egymást követő két bementi érkezés közötti időt modellezi. $E[x]=\frac{1}{\lambda}$ a várható átlagos idő a két bemenet érkezése között. Ha nagyszámú bemenetünk van, például ügyfelek egy bankban, amelyek függetlenek egymástól, akkor az érkezési idő eloszlása negatív-exponenciális eloszlást követ [64].

Tevékenységek időtartamának modellezésére gyakran a normális vagy béta eloszlást alkalmazzák. A normális eloszlásnak kettő paramétere van az μ (átlag) és σ (szórás). Ha normális eloszlású véletlen változót használunk a tevékenységidők modellezéséhez (ciklusidő, feldolgozási idő, várakozás, szállítási idő) akkor tisztában kell lennünk azzal, hogy a véletlen változó felvehet negatív értéket is. A negatív változó értékét befolyásolja az átlag és a szórás. Ha $\mu - 2\sigma < 0$ akkor a normális eloszlás nem javasolt a tevékenységidők modellezésére. Ha a $\mu=0$ és $\sigma = 1$ akkor standard normális eloszlásról beszélünk [64].

A béta-eloszlás véges időközönként oszlik el két határ között, amely két pozitív egész szám. Olyan véletlen változók esetében használatos, amikor ismert a felső és az alsó határ.

3. Célkitűzések

A kutatás célja, hogy létrehozzak egy olyan folyamatdiagnosztikai keretrendszert, amellyel különböző üzleti folyamatokban a szakemberek képesek a potenciális hibákat mérés alapon rangsorolni. Fontos, hogy a hagyományos FMEA mint elemzőrendszer struktúráját betartva súlyosság, gyakoriság, és detektálhatóság paraméterek által lehessen értékelni a potenciális hibákat.

A keretrendszer további célja, hogy a feltárt hibák figyelembevételével képes legyen szimuláció segítségével a folyamat teljes átfutási idejét előrejelzeni, ezáltal fontos információt tud szolgáltatni a gyártásütemezésnek. Ez alapján, ha szükséges, a folyamat újraütemezése végrehajtható.

A keretrendszernek meg kell felelnie az ipar 4.0 feltételeinek, azaz egy olyan QR-kód-olvasó applikáció létrehozása a cél, amely a szükséges adatokat a beolvasás útján a keretrendszer számára biztosítja egy adatbázisban. Amennyiben ezek az adatok rendelkezésre állnak, a potenciális kockázatok és a gyártási folyamat átfutási ideje automatikusan kiszámolható.

Szimuláción és kockázat-értékelésen alapuló folyamatelemző keretrendszer létrehozása

Célkitűzések:

1. Potenciális kockázatok értékelése és rangsorolása idő- és költségalapú KPI-val.
2. A legsúlyosabb hibák figyelembevételével a folyamat teljes átfutási idejének előrejelzése.
3. A hagyományos FMEA struktúrájának figyelembevétele, azaz súlyosság, gyakoriság és detektálhatósági paraméterek alapján a kockázatok értékelése.

4. Idő- és költség alapú KPI-k meghatározása a súlyosság, gyakoriság, detektálhatóság paraméterértékek megadására. Ezzel csökkentve a hagyományos FMEA szubjektív tényezőjét, amely a pontskála miatt alakulhat ki.
5. Az ipar 4.0 környezetbe történő alkalmazhatóság vizsgálata.

Szimuláción és kockázat-értékelésen alapuló folyamatlemező keretrendszer adatgyűjtését szolgáló QR-kódalapú alkalmazás fejlesztése

Célkitűzések:

1. Folyamat-tevékenységek ciklusidejének mérésére alkalmas QR-kódalapú applikáció fejlesztése.
2. A potenciális kockázatok rangsorolásának algoritmusát integrálni az applikációba, ezáltal automatizálni a kockázatok értékelését és rangsorolását.
3. A potenciális kockázatokat figyelembe vevő, teljes folyamatátfutási időt előre jelző algoritmus integrálása az applikációba.

4. Anyagok és módszerek

Kutatásom első szakaszában egy alapos irodalomkutatás során a jelenlegi módosított FMEA-változatok értékelését végeztem el. A megállapított hátrányok alapján, megfogalmazásra kerültek az új, módosított FMEA-módszerrel szemben támasztott követelmények. A második lépésben QFD (Quality Function Deployment) alapú terméktervezési módszertannal kifejlesztettem az új FMEA-módszert, amely megfelel az ipar 4.0-ba történő implementálhatóságnak. A harmadik lépésben pedig kifejlesztettem azt az applikációt, amely képes szolgáltatni az adatokat a kockázatelemzésre az ipar 4.0 környezetben.

FMEA változatok értékelése

Az irodalomkutatás során először a hagyományos FMEA hátrányait kigyűjtöttem, majd a szakirodalomban fellelhető különböző, módosított FMEA változatokat meghatározott kategóriákba rendeztem. Továbbá a különböző kategóriáknak az előnyeit és hátrányait meghatároztam.

QFD terméktervezési eljárás

A QFD egy termékminőség-tervezési és -fejlesztési eljárás, amelynek célja, a vevői igények átalakítása műszaki paraméterekké. A 60-as évek elején találták ki Japánban, kezdetben a gyártásban alkalmazták, de napjainkban szolgáltatások tervezésére és fejlesztésére is alkalmazott módszer. A teljes QFD-implementáció 4 mátrixból áll: termékkövetelmény, alkatrész-követelmény, folyamat-követelmény és termelés-követelmény. Az első mátrix, amely a termék-követelményekkel foglalkozik a HOQ (House of Quality – Minőség ház). A kutatásban a termékkövetelmények a

kockázatértékelő keretrendszerrel szemben támasztott követelmények. A HOQ-mátrixot a következő lépésekkel készítettem el [71].

1. Irodalomkutatás alapján a kockázatértékelő keretrendszerrel szemben támasztott követelmények meghatározása.
2. Irodalomkutatás alapján lehetséges kockázat értékelő paraméterek meghatározása, mint műszaki paraméterek.
3. Követelmények fontossági sorrendjének meghatározása AHP-val. A követelmények részét képezi a hagyományos FMEA S-, O-, D-paraméterek, amelyeket azonos fontossági súllyal vettem figyelembe. Tehát a fontossági sorrend meghatározásakor ezen paraméterek nem képezték a bemenet készletét.
4. A kockázatértékelő paraméterek és a követelmények összemérése kapcsolati mátrixban.
 - 9 jelenti az Erős kapcsolatot
 - 3 jelenti a Közepes kapcsolat
 - 1 jelenti a Gyenge kapcsolat
 - Üres cella jelenti azt, hogy Nincs kapcsolat [71]
5. Kockázat értékelő paraméterek fontossági sorrendjének meghatározása a kapcsolati mátrix és a követelmények fontossági sorrendje alapján.

$$W_j = \sum_{i=1}^n d_i * r_{ij} \quad (11)$$

Ahol, W_j a fontossági súlya a j-edik kockázatértékelő paraméternek, d_i a fontossági súlya az i-edik követelménynek; és r_{ij} a kapcsolati mátrix koefficiense az i-edik követelménynek és a j-edik kockázatértékelő paraméternek, ami a kapcsolati mátrixból előálló érték.

6. Versenyelemzés a lehetséges alternatívák között. A lehetséges alternatívák összehasonlítása mindegyik követelmény esetében AHP-elemzéssel történt. Az alternatívák a következők:

- Fuzzy FMEA [22]
 - A módszer célja, hogy a hagyományos FMEA rangsorolási problémáját oldja meg úgy, hogy fuzzy halmazokat használ a kockázat értékelő paraméterek esetén.
- Cost oriented FMEA [23]
 - A hagyományos FMEA szubjektivitását csökkentő módszertani fejlesztésről van szó, mely a folyamat-és hibaköltségeivel számolja a kockázati számot.
- Life cost based FMEA [72]
 - A módszer alkalmazza a Monte-Carlo szimulációt, Crystal Ball v2000.2 szoftver segítségével az egyes alkatrész költségek becslésére, valamint a hibák közötti eltelt idő becslésére. Lényege, hogy a lehetséges hibákat és kockázatokat a termék teljes életciklusa alatt próbálja vizsgálni, a tervezéstől a gyártáson át a felhasználásig.
- MCDM FMEA (AHP) [73]
 - Az egyes hibaokok rangsorolását párosösszehasonlítás alapon végzi el.
- Hagyományos FMEA [12]

A QFD elemzés során a következő követelmények kerültek meghatározásra:

- Egyszerűen mérhető adatok. Könnyen az iparban elérhető eszközökkel lehessen mérni a paraméterek értékét. Ne becslés alapján határozzuk meg az értékeket, hanem mérés alapon.
- Valós időben mérhető (i 4.0). Az ipar 4.0-nak megfelelően a szükséges értékek valós időben mérhetőek legyenek, hogy a gyors kiértékelés lehetőségét megteremtsük.
- Objektív. Előre definiált mértékegységek használata és előre definiált határok használata a kockázati szám értékelésekor.
- Emberi tényező minimalizálása. A különböző emberi tudásból fakadó emberi különbözőségeket kizárása a paraméterérték meghatározásakor és a kiértékeléskor.
- Kockázatok dominó effektjének figyelembevétele. Ha egy kockázat bekövetkezik, annak lehet hatása egy másik kockázat bekövetkezésére. Ezen tulajdonság figyelembevétele.
- A kockázati paraméterekkel matematikai alapon ki lehessen számolni a kockázati számot . Egyenlet megléte, vagy létrehozása, amellyel értékelni lehet a kockázatokat.
- Előrejelzés. Teljes átfutási idő, azaz a rendelés szállítási dátumának előrejelzése a hiba bekövetkezése esetén, mint tulajdonság.
- Gyorsan számítható kockázati szám. Rövid időn belül, pár perc alatt számítható kockázati szám.
- Súlyosság. Hiba hatása a folyamatra.
- Előfordulás. Hiba gyakorisága
- Detektálhatóság. Hiba bekövetkezése után annak érzékelése.

A kapcsolati mátrixban a követelmények és a paraméterek kapcsolatának foka lett meghatározva. A következő paramétereket vettem figyelembe az elemzésnél:

- Ciklusidő. Ismétlődő tevékenység egyszeri elvégzéséhez szükséges idő. Gyártás esetén a következő három elemre bontható. Szükséges idő egy kimenet előállításához, gép kiszolgálási idő és idővesztés.
- Tevékenység költsége. Egy ismétlődő tevékenység egyszeri elvégzésének a költsége. Függhet a tevékenység ciklusidejétől.
- Gyártáskiesés. Gyártáskiesés, amely gép- vagy eszközhiba miatt következik be.

$$\text{Gyártáskiesés} = 1 - \frac{\text{Ténylegesen gyártott mennyiség}}{\text{Az adott idő alatt gyártható mennyiség}} \quad (12)$$

- Minőségi mutató. Gyártáskiesés minőségi hiba miatt.

$$\text{Minőségi mutató} = 1 - \frac{\text{Gyártott mennyiség} - \text{Selejt} - \text{Utómunka}}{\text{Gyártott mennyiség}} \quad (13)$$

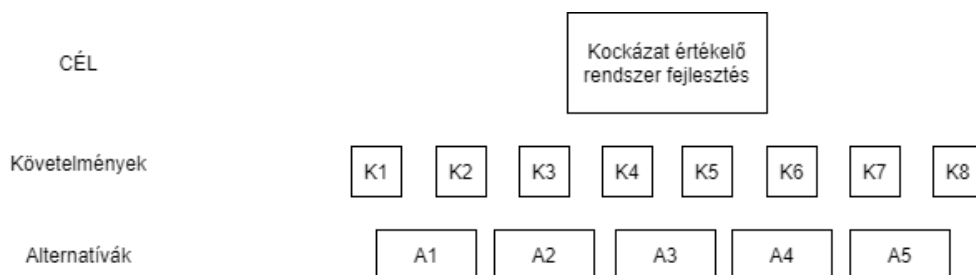
- Hibagyakoriság. Egy meghatározott időintervallumban a hibák száma arányosítva a kimenet számával.
- Hiba belső költsége. Ha a hiba bekövetkezik, szállítás előtt észreveszik és a gyáron belül javítják [23].
- Hiba külső költsége. A hiba bekövetkezik, a terméket a vevőnek leszállítják, a vevő veszi észre a hibát és a vállalat ez után javítja [23].
- Minőség költsége. Számítható a hiba költségéből és a megfigyelés költségéből. Nagyon nehezen mérhető paraméter [72].
- Javítási idő. A hiba javításához szükséges idő [72].

- Meghibásodások között eltelt idő. Két egymás után bekövetkezett meghibásodás között eltelt idő [72], javítható rendszerek esetén.

AHP-módszer

Komplex rendszerek összehasonlítására, valamint többszemponútú döntési problémák megoldására alkalmazható módszer, amely páros összehasonlításon alapszik [72]. Az AHP-módszer különböző kritériumok súlyozására és az alternatívák egyes szempontok szerinti értékelésre alkalmas.

A kutatásban a kockázati követelmények fontossági súlyának meghatározása és az alternatívák egyes követelmények szerinti értékelése történt AHP-módszerrel a következő lépésekben. A döntési struktúra az 5. ábrán látható. A döntési cél, hogy kockázatértékelő rendszert fejlesszünk figyelembe véve a rendszerrel szemben támasztott követelményeket. Az AHP eredménye a követelmények fontossági sorrendje lesz, valamint az alternatívák sorrendje a teljesítményük alapján [73].



Ábra 5: AHP döntési struktúra

Forrás: Saját szerkesztés, 2020.

Az elemzés lépései a következők:

1. A fenti 5.ábrán található döntési struktúra létrehozása.
2. Páros összehasonlítás elkészítése a következő skála alapján:

1. egyformán fontos/ előnyös/ nem létezik
 3. mérsékelten fontosabb/ előnyösebb
 5. sokkal fontosabb/ előnyösebb
 7. nagyon sokkal fontosabb/ előnyösebb
 9. rendkívüli mértékben fontosabb/ előnyösebb
3. Fontossági súlyszámok számolása minden szinten.

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_i^n a_{ij}}, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

4. Minden szinten inkonzisztencia-mérés CI *konzisztencia-index*szel

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (15)$$

Ahol, λ_{max} a párosösszehasonlítás-mátrix legnagyobb sajátértéke és n a párosösszehasonlítás- mátrix sorainak a száma. A konzisztencia-index értékeit minden n esetre véletlenszerűen generált párosösszehasonlítás-mátrixok segítségével adjuk meg és RI-vel jelöljük. RI értéke Saaty nyomán 1,40. A konzisztencia-hányados (CR) a következő képlettel számolandó

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (16)$$

Akkor fogadható el az összehasonlítás, ha a konzisztencia-hányados $CR \leq 0,1$.

Google Apps script

A Google sheet biztosít egy felhőalapú programozási nyelvet, amely a Google Apps Script (GAS). Google Apps script egy Javascript amely egy felhőalapú nyelv, amely segítségével könnyen lehet feladatokat automatizálni.

A kódszerkesztő elérhető a böngészőben, a szkriptek a Google szerverein futnak. A Google Apps script webes alkalmazás funkcióját használtam az applikáció fejlesztéshez. A környezet használata megszab bizonyos feltételeket az alkalmazás közzétételéhez. A kódnak rendelkeznie kell **doGet (e)** vagy **doPost (e)** funkciókkal. A függvényeknek vissza kell adnia egy **HtmlOutput** objektumot a HTML-szolgáltatásból, egy **UiInstance**-objektumot a felhasználói felületszolgáltatásból vagy egy **TextOutput**-objektumot a tartalomszolgáltatásból [74].

A szolgáltatás a Javascript 1.6-on alapul 1.7- és 1.8-verzió-javításokkal.

Gsheet

A Gsheet a Google felhőalapú táblázatkezelő eszköze, amely rendelkezik azokkal a funkciókkal, amellyel a Microsoft Office 365 Excel. Továbbá elérhető hozzá a már fentebb írt scripting-szolgáltatás, amely segítségével különböző feladatok automatizálására képes [74].

App Inventor

Az MIT App inventory egy online platform mobil applikációk fejlesztésére. Az online platformnak kettő interfésze van. Az első a design interfész, amely segítségével a mobilapplikáció grafikai megjelenítését lehet megtervezni. A második interfész a blokk interfész, ahol a blokkalapú kódolás történik.

A blokkalapú kódolás kettő kategóriába sorolt elemeket tartalmaz. Az első a „built-in” blokkok, amelyek az alapeseményeket, tulajdonságokat tartalmazzák. A második kategória a „component” blokk, amely a programozási nyelveket tartalmazza: számok, betűk, képletek, matematikai operátorok [75].

5. Eredmények

A szakirodalom feldolgozása során azonosításra kerültek a követelmények a rendszerrel kapcsolatban és a lehetséges paraméterek. A paraméterek kiválasztására és az új keretrendszer tervezésére AHP-val kiegészített QFD-módszert választottam. Ennek az eredménye a következő fejezetben látható, valamint a következő fejezetben bemutatásra kerül az elkészített keretrendszer is.

5.1. Szimuláción és kockázat-értékelésen alapuló folyamatelemző keretrendszer létrehozása

A kutatás kiinduló pontja az, hogy az egyik legkedveltebb és az ipar által leginkább használt kockázatelemző módszernek vannak hátrányai. Ezen hátrányok összeírásra kerültek, valamint az ipari alkalmazások során meghatároztuk azokat a gyengeségeket, amelyeket fejlesztve a módszer használatának hatékonysága nő, valamint megfelel az ipar 4.0 követelményeinek is. A kockázatértékelő rendszerrel szemben támasztott követelményeket a hagyományos FMEA hátrányaiból határoztam meg úgy, hogy figyelembe vettem az ipar 4.0 implementálhatóságot. Számos módosított FMEA elérhető az irodalomba, ezek közül minden korábban leírt kategóriából kiválasztottam egyet. Ezen FMEA-alternatívák kockázatértékelő paraméterei a QFD-ház műszaki paraméterei.

A rendszerrel szemben támasztott követelmények fontossági súlyát AHP-val számoltam melynek az eredményét a következő 4. táblázat tartalmazza

Táblázat 4: A Rendszerrel szemben támasztott követelmények

Követelmények	Fontossági súly	Sorrend
Egyszerűen mérhető adatok	0,036	8
Valós időben mérhető (i 4.0)	0,071	5
Objektív	0,242	2
Emberi tényező minimalizálása	0,225	3
Kockázatok dominóhatásának figyelembevétele	0,051	6
A kockázati paraméterekkel matematikai alapon ki lehessen számolni a kockázati számot	0,245	1
Előrejelzés	0,092	4
Gyorsan számítható kockázati szám	0,038	7
Súlyosság	0,100	x
Előfordulás	0,100	x
Detektálhatóság	0,100	x

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Az új keretrendszerrel szemben támasztott legfontosabb követelmények: *A kockázati paraméterekkel matematikai alapon ki lehessen számolni a kockázati számot, objektív, emberi tényező minimalizálása.* Ha ez a három követelmény teljesül akkor az adatok gyűjtésével egy algoritmus automatikusan képes elvégezni a kockázatértékelést, akár valós időben. Ha kiegészítjük szimulációval az algoritmust, akkor az képes lehet a gyártási idő előrejelzésére, amely fontos információ lehet a menedzserek számára, gyártásütemezés, beszerzés, értékesítés, vevői kapcsolattartás szempontjából.

A hagyományos FMEA *Súlyosság, Előfordulás, Detektálhatóság* tényezői követelményként jelennek meg. Szeretném a hagyományos FMEA struktúráját megőrizni és a kockázatértékelés során figyelembe venni a kockázatok súlyosságát, előfordulását, detektálhatóságát ezért szerepelnek ezen tényezők a követelmények között. Az AHP-elemzés bemenetét nem képezték ezen tényezők ezért látható *x* a fontossági súlyuknál. Az AHP-elemzés során minden szinten minden döntési táblázat CR értéke kisebb, mint 0,1.

A keretrendszer tervezésre alkalmazott QFD egyik eredménye a kockázatértékelő paraméterek abszolút súlya, amely megadja azt, hogy mely kockázatértékelő paraméterek felelnek meg leginkább a támasztott követelményeknek. A kockázatértékelő paraméterek abszolút súlyát a következő 5. táblázat tartalmazza.

Táblázat 5: Kockázatértékelő paraméterek abszolút súlya

No.	Paraméter	Abszolút súly	No.	Paraméter	Abszolút súly
1	Ciklus idő	6,97	6	Hiba belső költsége	5,64
2	Tevékenység költsége	5,73	7	Hiba külső költsége	5,50
3	Gyártáskiesés	6,43	8	Minőség költsége	2,57
4	Minőségi mutató	6,03	9	Javítási idő	5,80
5	Hibagyakoriság	3,29	10	Meghibásodások között eltelt idő	6,52

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Az abszolút súly számítása a (14) képlettel történt, a bemeneti adatok a kapcsolati mátrixhoz a 36. függelékben található. A legfontosabb a ciklusidők figyelembevétele a kockázatelemzés során. Ugyanis, ha egy kockázat bekövetkezik, akkor annak oka lehet az, hogy az adott tevékenység, amelyik felelős a kockázatért, nem megfelelő ciklusidővel rendelkezik, továbbá egy felmerülő hiba eredményezhet hosszabb ciklus időt egy másik tevékenységnél. Tehát a hosszabb ciklusidők hosszabb teljes átfutási időhöz vezethetnek, amely vevői elégedetlenséget jelenthet, vagy nem megfelelő effektív kapacitást (C_e), amelynek viszont hatalmas költségvonzata lehet a gyárban [76].

$$C_e = \frac{S \times D \times H \times M}{c/t} \quad (17)$$

Ahol,

$S = \text{Műszakok száma / nap}$

$D = \text{Napok száma/hét}$

$H = \text{Óraszám/műszak}$

$M = \text{Gépek szám}$

$C/t = \text{Ciklusidő [77]}$

Ha a folyamatban egy hiba miatt megnő a ciklusidő, akkor az effektív kapacitás csökkenhet.

A második legnagyobb abszolút súllyal a meghibásodások között eltelt idő látható. Abban az esetben, ha rendelkezésre állnak historikus adatok, akkor ez a mutató használható a hibák gyakoriságának leírására. Mindazonáltal, ha egyedi gyártásról vagy építőipari kivitelezésről beszélünk, akkor szükséges más mutatót keresnünk, abban az esetben is szükséges másik mutatóval számolni, ha nem áll rendelkezésre korábbi adat a hibáról.

A QFD-számítás eredménye az, hogy a harmadik legfontosabb paraméter a gyártáskésés. Ez az adott idő alatt le nem gyártott munkadarabokat jelenti, amelyeket egy későbbi időpontban le kell gyártani, tehát a folyamat teljes átfutási idejére szintén hatással van, hiszen csúszni fog a folyamat. Ez is vevői elégedetlenséget jelenthet, sőt a vállalatot érintheti pénzügyileg kedvezőtlenül is hiszen, ha kötbért kell fizetni a késés miatt, akkor az például az építőiparban jelentős profitsökkenést eredményez.

A negyedik a sorban a minőségi mutató áll. A minőségi mutató meghatározása vállalatonként eltérhet. Ha a vállalat a gyártási folyamat végén ellenőriz, akkor a mutató megadása is ekkor történik, amely azért probléma, mert lehet, hogy egy hibás termék átáramlott az egész gyártási folyamaton úgy, hogy a hiba a folyamat elején keletkezett. Ez költségnövekedést eredményez. Ha a minőségellenőrzés a JIDOKA filozófiájával történik akkor a forrást ellenőrzik [78], amely a megelőző folyamat teljesítménye. Szeretnénk a

módszert valós időben futtatni, de mivel a minőségi mutatót nagyon nehéz, vagy költséges valós időben a gyártás közben meghatározni minden tevékenységnél, ezért a keretrendszer fejlesztésben ezen mutató alkalmazásától eltekintek.

A javítási idő 5,80 abszolút súllyal rendelkezik. Ha egy hiba bekövetkezik, akkor a javítási idő miatt a gyártás átfutási ideje is nőhet. Nem minden termék javítható, ezért ennek a paraméternek a használatától eltekintek.

A tevékenység költsége 5,73 értéket vett fel. A tevékenység költségszámítása vállalatonként eltérhet. Ha egy hiba bekövetkezik, akkor az megnőtt ciklusidő jelent, ha a vállalat ciklusidőalapú költségszámítást használ, akkor a tevékenység költsége is megnő. Emellett egyéb más tényezők is befolyásolhatják a tevékenység költségszámítását, amely főlegesen megbonyolítaná a kockázatértékelést, ezért a tevékenységköltség számításától eltekintek a kockázat értékelésekor.

A hiba belső költsége 5,64 abszolút súllyal, a hiba külső költsége 5,50 abszolút súllyal rendelkezik. Ez is egy nehezebben számítható mutató, akkor egyszerűbb a meghatározása, ha a vállalat rendelkezik historikus adatokkal.

Az utolsó kettő a sorban a hiba gyakorisága 3,29 abszolút súllyal, és a minőség költsége 2,57 abszolút súllyal.

A követelményeknek megfelelően és a kockázati paraméterek kombinációjával a következő lehetséges kockázatértékelési idő- és költségalapú kockázati szám (tcRPN) számítási eljárásokat hoztam létre.

Ha van lehetőség a folyamatban a hiba belső és külső költségét mérni, akkor a következő képlettel határozható meg a hiba kockázati száma.

$$tcRPN = [(P_i \times C_{ai} + P_e \times C_{ae}) + C_f] \times F \times T_p \quad (18)$$

Ahol,

P_i = Annak a valószínűsége, hogy a hibát detektálják szállítás előtt

C_{ai} = Hiba belső költsége

P_e = Annak a valószínűsége, hogy a hibát nem detektálják szállítás előtt

C_{ae} = Hiba külső költsége

C_f = Hiba költsége

F = Hiba gyakorisága

T_p = 1+ SMAPE (Symmetric mean absolute percentage error - Szimmetrikus átlagos abszolút százalékos hiba)

A gyártási folyamatok elemzésére ma elterjedt megközelítés a discrete-event szimuláció. Mivel számszerű értéket kell előrejelzeni, különféle ismert tényezők figyelembevételével a gyártási átfutási idő előrejelzése regressziós probléma. Az előrejelzési hiba leírására SMAPE használható [79].

$$SMAPE = \frac{1}{N} \sum \frac{|F_i - A_i|}{(|F_i| + |A_i|)/2} \quad (19)$$

Ahol F_i a szimulált ciklus ideje; A_i a tényleges ciklus ideje az i -edik tevékenységnek.

Tehát a T_p megadásához folyamatszimulációt kell futtatni. Ehhez szükséges egy eseményvezérelt folyamatlánc-diagram, a tevékenységek ciklusideje, a ciklusidők eloszlásfüggvénye és a tevékenységek bekövetkezési valószínűsége.

Abban az esetben, ha vannak rendelkezésre álló historikus adataink és a termék javítható, a képlet a következőképpen módosul.

$$tcRPN = [(P_i \times C_{ai} + P_e \times C_{ae}) + C_f] \times MTBF \times T_p \quad (20)$$

Ahol, MTBF (Mean time between failures – meghibásodások közt átlagosan eltelt idő)

$$MTBF = \frac{th_{365}}{AFR} = \frac{th_{365}}{\frac{H_s \times (\frac{52}{T_s})}{E_s}} \quad (21)$$

Ahol,

th_{365} = Évenkénti órák száma

H_s = Hibaszám a mintavételi szakaszban

T_s = Mintavételi szakasz hossza hetekben

E_s = Egységek száma a sorozatban [80]

A teljes képlet

$$tcRPN = [(P_i \times C_{ai} + P_e \times C_{ae}) + C_f] \times \left(\frac{th_{365}}{H_s \times \left(\frac{52}{T_s} \right)} \right) \times \left(1 + \frac{1}{N} \sum \frac{|F_i - A_i|}{(|F_i| + |A_i|)/2} \right) \quad (22)$$

A folyamat teljes átfutási idejének figyelembevétele elengedhetetlen a kockázatértékelés szempontjából. Viszont nagyon fontos a folyamat sajátosságait figyelembe venni a folyamat teljes átfutási idejének előrejelzésénél.

Egyedi gyártás esetén a teljes átfutási időt megkaphatjuk a kritikus tevékenységek idejének összegeként, amelyet összefoglalóan kritikus útnak nevez a szakirodalom. Amennyiben a kritikus úton bármely tevékenység valamilyen hiba folytán több időt vesz igénybe, mint amennyi a becsült vagy tapasztalatra alapozott tervezés, úgy a projekt teljes átfutási ideje is nőni fog. Ez az összefüggés csak akkor áll fent a nem kritikus tevékenységek esetében, ha a növekedés mértéke elért egy olyan szintet, amelynek során a kritikus út is megváltozik. Ha a nem kritikus tevékenységek idejének növekedése nem éri el ezt a határvonalat, akkor nem lesz hatása a tevékenység teljes átfutási idejére.

A szakirodalomban számos olyan esetet láthatunk, ahol a teljes átfutási időt egy lineáris regresszió eredményeként jelzik előre [79,81-83]. Ez az összefüggés felhasználható a jelen disszertációban is bemutatott tcFMEA-számításhoz. A Monte-Carlo szimuláció során előre meghatározott számú iteráció eredményeként előálló adatbázis értékei között fennálló kapcsolatot felírhatjuk az alábbi lineáris regressziós képlettel:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (23)$$

ahol:

\hat{y} = A teljes átfutási idő (TPT) becsült értéke (függő változó),

β_0 = A függvény metszéspontja (intercept),

β_i = A lineáris regresszió egy i tevékenységéhez kapcsolódó együttható (független változók),

x_i = A tevékenység becsült átfutási ideje,

ε = hiba.

Természetesen, előfordulhat a szimuláció futtatása utáni elemzés készítésekor, hogy egy nem kritikus tevékenység koefficiensének szignifikanciája elfogadási tartományban van ($p \leq 0.05$), abban az esetben további vizsgálatnak kell alávetni a kapott eredményt. Érdekes ilyenkor az egyes tevékenységidők Pearson-féle korrelációját megvizsgálni, és a regresszióból adódó téves következtetéseket kiigazítva a kockázati számításba belevenni az adatokat.

A korrelációs együttható (r) számítása két változóra vett minta x_1, x_2, \dots, x_n és y_1, y_2, \dots, y_n esetén.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (24)$$

Egyedi gyártás esetén vagy építő ipari kivitelezésnél a hiba belső és külső költségei nem minden esetben értelmezhetőek [19]. Tehát ezeket a paramétereket ki kell váltani. A kockázatok értékelésére ilyen esetben egy lehetséges alternatíva lehet az EMV (Expected Monetary Value – Várható pénzbeli érték) [19]. A tcRPN képlete a következő képen változik.

$$tcRPN = EMV \times F \times \left(\frac{TPT_t}{TPT_e}\right) \times P_d = (P_i \times C_f) \times F \times \left(\frac{TPT_t}{TPT_e}\right) \times P_d \quad (25)$$

Ahol,

TPT_t = Tervezett teljes átfutási idő

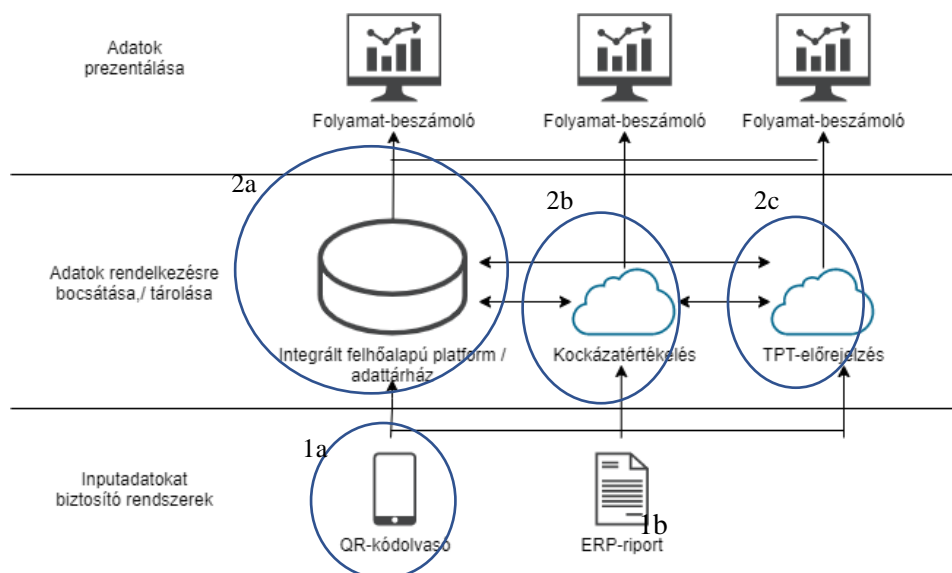
TPT_e = A hiba felmerülése esetén várható teljes átfutási idő

P_d = Késés valószínűsége. Értéke 1 vagy annál nagyobb szám. Ha nincs késés akkor értéke 1.

A fentebb bemutatott tcRPN-képletekkel lehet a kockázatokat rangsorolni a tcFMEA esetén (time and cost oriented Failure Mode and Effect Analysis - Idő- és költségorientált Hibamód- és Hatáselemzés). A kockázatértékelési folyamat felgyorsítására és megkönnyítésére egy QR-kódalapú applikációt fejlesztettem, amely képes mérni a tevékenységek ciklusidejét. Ennek az alkalmazásnak a bemutatása a következő fejezetben látható.

5.2. Szimuláción és kockázatértékelésen alapuló folyamatelemző keretrendszer adatgyűjtését szolgáló QR-kódalapú alkalmazás fejlesztése

A folyamatirányítás támogatására létrehozott applikáció adattárházon alapuló integrált platform, amelynek az architektúra-felépítése a következő, 6. ábrán látható.



Ábra 6: Adattárházon alapuló kockázatértékelő platform.

Forrás: Saját szerkesztés, 2020.

Adattárházon alapuló integrált platformban nincs olyan elem, amely egy folyamatkontrolling számítási logikáját explicit leképezné. Ez a számítási logika egy, a vállalat által már használt informatikai megoldásban integrálhatóan található meg.

Az adatgyűjtő alkalmazás a folyamatteljesítmény méréséhez szükséges tevékenységciklus-időket gyűjti (1a). Minden tevékenységnek egyedileg dedikált QR-kódja van. Ha a munkadarab átáramlik a kamera előtt, akkor az a tevékenység kezdetét jelenti, ha a munkadarab újra átáramlik a kamera előtt, akkor az a tevékenység végét jelenti. Mind a kettő esetben egy időbélyeg kerül rögzítésre az adattárházban (2a), amely a Google-szolgáltatás által biztosított Gsheet munkafüzete. A QR-kódolvasó és a GSheet közötti kapcsolatot a GAS biztosítja.

A kockázatértékelés a Gsheetbe képletezett tcFMEA, amely tartalmazza a folyamat struktúráját és a potenciális hibaokokat (2b). A TPT-előrejelzés modul is a Gsheet része, amely egy Monte-Carlo szimulációs alapú folyamat teljes átfutási időt előrejelző algoritmus (2c). A kockázatértékelés és a TPT-előrejelzés együtt dolgozva kalkulálja a lehetséges átfutási időt és rangsorolja a potenciális kockázatokat, az adattárba gyűjtött adatokból. Ha szükség van még egyéb bemeneti adatra a kalkulációkhoz, akkor azok ERP-riport formájában biztosíthatók. A kockázatértékelés eredményét és az előrejelzett TPT-értékét egy Dashboardon jeleníti meg a rendszer. A 6. ábrán látható kék körök jelzik azokat a részeket, amelyek a saját munkám eredménye.

Amikor egy felhasználó meglátogatja, az Apps Script futtatja a doGet (e) függvényt. Amikor egy program HTTP POST kérést küld az alkalmazásnak, az Apps Script futtatja a doPost (e) parancsot. Mindkét esetben az e argumentum olyan eseményparamétert képvisel, amely információt tartalmazhat bármely kérés paraméteréről.

Az alkalmazás először megnyitja az adattárban elhelyezett Gsheetet URL alapján a meghatározott munkafüzetett előhívja,

```
var ss = SpreadsheetApp.openByUrl("URL");  
var sheet = ss.getSheetByName("daily_inventory");
```

```
function doGet(e){  
  var action = e.parameter.action;  
  
  if(action == "in")  
    return inTime(e);  
  
  if(action == "out")  
    return outTime(e);  
  insert(e,sheet);  
}  
function doPost(e){  
  var action = e.parameter.action;  
  if(action == "in")  
    return inTime(e);  
  
  if(action == "out")  
    return outTime(e);  
  insert(e,sheet);  
}
```

Az alkalmazás az aktuális időbélyeget hozzáadja egy „in” cellához, amikor egy munkadarab beáramlik a munkaterületre, ehhez egy in akciót határoztam meg. Az alkalmazás az aktuális időbélyeget hozzáadja az adott munkadarab „out” cellájához, amikor elhagyja a munkaterületet, ehhez egy out akciót határoztam meg.

```

function inTime(e){
  var id = e.parameter.id;
  var values = sheet.getRange(2,2,sheet.getLastRow(),1).getValues();

  for(var i = 0 ; i<values.length ; i++){
    if(values[i][0] == id){
      i=i+2;
      var in_time = Utilities.formatDate(new Date(), "CET", "HH:mm:ss");
      sheet.getRange(i,4).setValue(in_time);
      return ContentService.createTextOutput("Thank You ! Your In Time is
"+in_time).setMimeType(ContentService.MimeType.TEXT);
    }
  }
  return ContentService.createTextOutput("Id Not
Found").setMimeType(ContentService.MimeType.TEXT);
}

```

Az in funkció esetén az adott QR-kód beolvasásakor az időbélyeg bekerül a munkafüzet meghatározott sorába és oszlopába. Fontos az, hogy ha egy másik kódon egy másik termék érkezik, akkor egy sorral lejjebb az új kódhoz kerüljön be az időbélyeg.

```

function outTime(e){
  var id = e.parameter.id;
  var values = sheet.getRange(2,2,sheet.getLastRow(),1).getValues();

  for(var i = 0 ; i<values.length ; i++){
    if(values[i][0] == id){
      i=i+2;
      var out_time = Utilities.formatDate(new Date(), "CET", "HH:mm:ss");
      sheet.getRange(i,5).setValue(out_time);
      return ContentService.createTextOutput("Thank You ! Your Out Time
is "+out_time).setMimeType(ContentService.MimeType.TEXT);
    }
  }
  return ContentService.createTextOutput("Id Not
Found").setMimeType(ContentService.MimeType.TEXT);
}

```

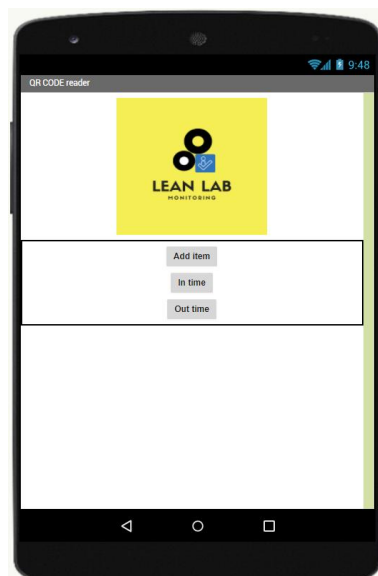
Az out funkció esetén az adott QR-kód beolvasásakor az időbélyeg bekerül a munkafüzet meghatározott sorába és oszlopába. Fontos az, hogy ha

egy másik kódon egy másik termék hagyja el a munkaterületet, akkor egy sorral lejjebb az új kódhoz kerüljön be az időbélyeg.

```
function insert(e,sheet){  
  
    // reciving scanned data from client i.e android app  
    var sdata = e.parameter.sdata;  
  
    var date = new Date()  
  
    sheet.appendRow([date,sdata]);  
  
}
```

A harmadik és utolsó funkciója az alkalmazásnak, az új tevékenység felvitele egy új QR-kóddal. Ebben az esetben az adattárhoz egy új sor kerül, amely az új QR-kód. Minden tevékenységnek egyedi QR-kódja van és minden tevékenységet csak 1 QR-kód alapján lehet azonosítani.

Az alkalmazás a 7.ábrán látható képernyőképpel rendelkezik:



Ábra 7: Alkalmazás megjelenése

Forrás: Saját szerkesztés, 2020.

Az alkalmazás a mobiltelefon vagy tablet saját QR-kódolvasóját használja. Egy Webes kapcsolat és egy óra került még bekötésre. Az alkalmazás az In, Out, Add Item funkciók futtatásához, az előbbieken bemutatott GAS scriptet hívja elő és scriptben meghatározott URL-en található Gsheetre menti az adatokat. Az alkalmazás blokkdiagramját a 8. ábra tartalmazza, mely a függelékben található.

5.3. Tudományos eredmények

5.3.1. Keretrendszer ipari alkalmazása – esettanulmány: építőipar

A projekt egy új automatizált raktár építési projektje Magyarországon, mely 2017.02.02-án kezdődött és 2019.04.01-én fejeződött be. Több mint 150 főtevékenységet tartalmazott, beleértve az építészeti, építőipari, mechanikai és villamos munkákat [19]. A kutatásom terjedelme a projekt ütemtervére és a kockázatkezelésre korlátozódik az építési projekt szakaszból, amely 16 tevékenységből áll (lásd az 6. táblázatot). A tevékenység értékeit és a lehetséges hibákat a korábbi tapasztalatok alapján számoltam ki.

Táblázat 6: Projekt Tevékenységek

No.	Projekt tevékenység	No.	Projekt tevékenység
A	előregyártott RC szerkezet tervezés	I	RC beton alap
B	előregyártott RC elemek gyártása	J	Kőműves munkák
C	előregyártott RC oszlopok	K	első beton vasalat
D	előregyártott RC zártszelvény	L	második beton vasalat
E	RC szegélyezés	M	acél trapézlemezek installálása
F	PC tűzvédelmi fal	N	tetőablak installálás
G	RC beton alap formázás	O	szigetelés
H	RC beton alap vasalat	P	bádogozás

Forrás: Saját szerkesztés, 2020.

A projekt során felmerülő lehetséges kockázatok korábbi hasonló projektek adatai alapján lettek meghatározva. A 7. táblázat tartalmazza a lehetséges kockázatokat és a kockázatokhoz tartozó S-, O-, D-értékeket, amelyek a hagyományos FMEA kockázatértékelő paraméterei.

Táblázat 7: Lehetséges kockázatok és azok paraméter-értékei

No	Potenciális hiba	Bekövetkezési valószínűség (%)	O	S	D	RPN
A1	Nem elérhető munkaerő	20	1	3	2	6
A2	Jogi háttér nem megfelelő	80	8	8	6	384
B1	Nem elérhető anyag	20	1	5	5	25
C1	Infrastruktúra hiánya	40	3	7	7	147
C2	Eszköztörés	30	3	2	8	48
D1	Infrastruktúra hiánya	30	3	4	4	48
D2	Eszköztörés	40	3	2	8	48
E1	Nem elérhető anyag	30	3	5	5	75
F1	Nem elérhető munkaerő	10	1	7	2	14
G1	Infrastuktúra hiánya	30	3	3	5	45
H1	Fizikai vagy kémiai elváltozás az anyagon	25	3	7	6	126
I1	Nem elérhető alapanyag	10	1	4	5	20
J1	Nem elérhető alapanyag	30	3	4	5	60
K1	Fizikai vagy kémiai elváltozás az anyagon	15	2	7	6	84
K2	Nem elérhető anyag	5	1	3	5	15
L1	Fizikai vagy kémiai elváltozás az anyagon	15	1	7	6	42
L2	Nem elérhető anyag	5	1	4	5	20
O1	Eszköztörés	60	4	3	7	84
P1	Nem elérhető anyag	15	1	4	5	20

Forrás: Saját szerkesztés, 2020.

A hagyományos FMEA-val végzett kockázatértékelés megmutatja, hogy a legnagyobb kockázati számmal rendelkező hiba a *nem megfelelő jogi háttér* az A2 tevékenységnél. Rangsorban a következő a C tevékenységnél felmerülő *infrastruktúra hiánya* 147-es RPN-értékkel és a H tevékenységnél felmerülő *Fizikai vagy kémiai elváltozás az anyagon*. A többi kockázat kisebb, mint 100-as RPN-értékkel rendelkezik. Ha a vállalat az irodalomban található 110-es vagy 140-es RPN-küszöböt használja, akkor mivel ezek a kockázatok ezen érték alatt vannak, nem is kellene velük foglalkozni.

A kockázatelemzés pontossága erősen függ a megfelelő valószínűségi eloszlás alkalmazásától, ugyanis pontosan ki kell, hogy fejezzék az eset bizonytalanságát, véletlenszerűségét és változékonyságát. A legmegfelelőbb eloszlások, amelyek kifejezik a projekt tevékenységi idejét és költségét a következők: a háromszög, a béta, a programértékelés és az áttekintési technika (PERT), valamint a négyparaméteres bétaeloszlás (Beta4). A háromszögeloszlás általában túlságosan hangsúlyozza az eloszlás farkát és alul hangsúlyozza a vállakat, összehasonlítva más természetesebb eloszlásokkal. A bétaeloszlás egy folyamatos $[0, 1]$ intervallumon belüli, definiált valószínűségi eloszlás, amelyet két pozitív paraméter jelöl, melyeket általában α -val és β -val jelölünk, és amelyek a véletlen változó hatványaként jelennek meg és szabályozzák az eloszlás alakját. A PERT-eloszlás (Beta-PERT) egy folyamatos valószínűségi eloszlás, mely a Bétaeloszláson alapul. Ugyanazt a három paramétert igényli, mint a háromszögeloszlás, azzal a plusz feltétellel, hogy a várható érték (átlag) a minimum súlyozott átlaga, a legvalószínűbb, és a maximális érték az az érték, amelyet a változó vehet igénybe, ha az értékre alkalmazott súly négyszerese a legvalószínűbb érték [84]. A kutatásom során több PERT-hálózatot vizsgáltam és arra a következtetésre jutottam, hogy a legvalószínűbb tevékenység-idő becslés (módusz – legtöbbet előforduló elem a mintában) reálisan haszontalan. A módusz helye a legtöbb projektfeladatban

megközelítőleg az egyharmadát tette ki a minimumtól a maximális értékig éterjedő távolságnak [26]. A Béta 4 eloszlást figyelembe véve (α , β , a, b) ez egyenlő: $\alpha = 2$ és $\beta = 3$. Így megfelelő a Beta4 (2, 3, min, max) használata a PERT (min., módusz, max) helyet azzal a plusz előnnyel, hogy az embernek elég egyszerűen megkérdezni az adott szakértőt csupán erről a két értékről (min, max) [14]. Az összegyűjtött adatok alapján mindegyik tevékenység eloszlásnak csak minimális és maximális értéke van. Ezért a Beta4 eloszlást fogom használni a tevékenységek időtartamának ábrázolására. A Beta4 (2, 3, min, max) pozitívan ferde (a gyakori pontszámok az alsó végén csoportosulnak a fark felől a magasabb vagy több pozitív pontszám felé). Ez azt jelenti, hogy nem szimmetrikus, nagyobb súlya van a kockázatnak a minimális érték felé. Következésképpen a Beta4-et (2, 2, min, max) kell használni a Beta4 (2, 3, min, max) helyet mivel ez szimmetrikus és egyenlő súlyokat ad a kockázatnak mind a minimális, mind a maximális érték felé [84], [85].

A Monte-Carlo szimuláció alapú kockázatértékelés bemeneti adatait a 8. és 9. táblázatok tartalmazzák. A 8. táblázatban olvashatóak a tevékenység idővel kapcsolatos adatok, SS (Start, Start – Kezdés, Kezdés) logikát követ FS (Finished, Start – Befejezés, Kezdés) logikát követ.

Táblázat 8: Tevékenységek adatai

No.	Min duration (day)	Max duration (day)	Predecessor	Type	Lag (day)
A	76	95	-	SS	-
B	62	76	A	SS	45
C	27	33	B	SS	10
D	39	51	C	SS	10
E	59	73	D	FS	10
F	49	69	E	FS	10
G	3	3	D	FS	0
H	6	12	G	FS	0

I	1	1	H	FS	0
J	27	44	I	FS	28
K	28	32	I	FS	28
L	25	35	K	SS	10
M	14	18	L	SS	15
No.	14	26	M	FS	0
O	43	77	N	SS	9
P	37	43	O	SS	40

Forrás: Saját szerkesztés, 2020.

Az MCS (Monte-Carlo Szimuláció) modell eredményét általában statisztikai elemzésnek vetik alá. Mert minden generált véletlenszámot egy modellképlet alapján arra használunk, hogy elérjük a kimeneti változó próbaértékét. Amikor ezek a vizsgálatok befejeződtek, az összegyűjtött értékeket elemezzük. A próba kimeneti értékeinek átlagolása véget ér a kimeneti változó várható értékében. A kimeneti értékek felhalmozása méret szerinti csoportokban és az értékek frekvencia-hisztogramként való bemutatása adja a hozzávetőleges értéket és határozza meg a PDF alakját. A kimeneti értékek önmagukban is alkalmazhatók empirikus eloszlásként, ezáltal kiszámítva a percentiliseket és egyéb statisztikákat. Ellenkező esetben a kimeneti értékek hozzá illeszthetők egy valószínűségi eloszláshoz és az eloszlás általános statisztikája kiszámítható. Ezeket a statisztikákat aztán fel lehet használni [84], [85]. Az MCS-ben használt minták, iterációk, vizsgálatok száma 50000 volt.

Táblázat 9: Potenciális kockázatok és adatai

No	Potenciális hiba	Bekövetkezési valószínűség (%)	Csúszás valszeg.	Csúszás napban	Hiba költsége (\$)
A1	Nem elérhető munka erő	20	0,07	0	826
A2	Jogi háttér nem megfelelő	80	0,07	95	806
B1	Nem elérhető anyag	20	0,06	31	2348
C1	Infrastruktúra hiánya	40	0,054	23	851
C2	Eszköztörés	30	0,054	0	980
D1	Infrastruktúra hiánya	30	0,7	41	851
D2	Eszköztörés	40	0,7	41	980
E1	Nem elérhető anyag	30	0,096	63	5935
F1	Nem elérhető munkaerő	10	0,09	59	930
G1	Infrastuktúra hiánya	30	0,034	0	851
H1	Fizikai vagy kémiai elváltozás az anyagon	25	0,43	12	1755
I1	Nem elérhető alapanyag	10	0	1	930
J1	Nem elérhető alapanyag	30	0,024	16	2736
K1	Fizikai vagy kémiai elváltozás az anyagon	15	0	4	2186
K2	Nem elérhető anyag	5	0	0	173
L1	Fizikai vagy kémiai elváltozás az anyagon	15	0,034	25	2186
L2	Nem elérhető anyag	5	0,034	0	173
O1	Eszköztörés	60	0,3	58	893
P1	Nem elérhető anyag	15	0,17	3	334

Forrás: Saját szerkesztés, 2020.

A szimulált és a meglévő adatok felhasználásával a (25) képlettel számoltam a kockázati rangsort. A meglévő kockázatokra RA (Risk of activity) értéket számoltam, amely az egy tevékenységhez tartozó kockázatok

összege. Ez alapján a kockázatok RA- sorrendje tcRPN alapján a 10. táblázatban látható:

Táblázat 10: Tevékenységek RA-sorrendje tcRPN alapján

Tevékenység	tcRAi	Rangsor
D	519,2221	1
E	209,2499	2
H	196,7193	3
O	193,9177	4
A	71,9595	5
C	35,76214	6
B	31,28438	7
J	20,82086	8
L	12,43457	9
F	10,1274	10
G	8,6802	11
P	8,607929	12
I	0	13
K	0	14

Forrás: Saját szerkesztés, 2020.

A hagyományos FMEA-elemzésben használt RPN-alapú tevékenység RA sorrendjét is elkészítettem, amely a következő 11. táblázatban látható:

Táblázat 11: Tevékenységek RA-sorrendje RPN alapján

Tevékenység	RAi	Rangsor
A	390	1
C	195	2
H	126	3
K	99	4
D	96	5
O	84	6
E	75	7
L	62	8
J	60	9
G	45	10
B	25	11
I	20	12
P	20	13
F	14	14

Forrás: Saját szerkesztés, 2020.

Egyértelműen látható, hogy két különböző sorrendet ad a két FMEA-megközelítés.

Az eredmények ellenőrzésére Spearman-korrelációt használtam a tevékenységidőn és a projekt teljes átfutási időn, amely megmutatja, hogy milyen mértékben határozza meg az egyik változó nagysága a másik változó nagyságát [19].

$$CRI(\rho) = 1 - \frac{\sum d_i^2}{\frac{1}{2}n(n-1)} \quad (26)$$

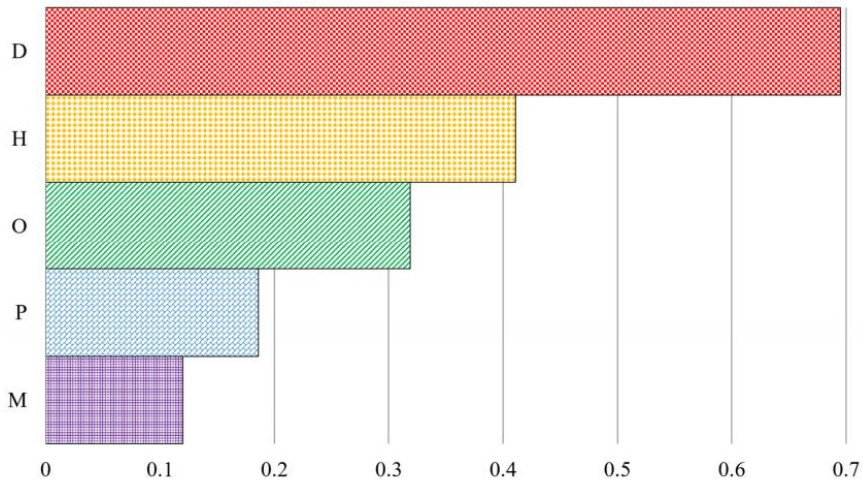
Ahol,

$CRI(\rho)$ = Spearman-korrelációs koefficiens

d_i = Rangsorérték különbsége a tevékenység-időnek és a szórásnak

n = Futtatott szimulációk száma.

Minden tevékenységre a kalkulált Spearman-korreláció eredményét a következő 8. ábra tartalmazza.



Ábra 8: A tevékenységek Spearman-korrelációs értékei

Forrás [19].

A 8. ábrán látható, hogy *D* és *H* tevékenység rendelkezik közepes-erős kapcsolattal a teljes átfutási idő tekintetében. Ezzel a sorrenddel nem egyezik meg a tcRA-érték alapján sorrendbe rendezett tevékenységek. Ennek az az oka, hogy a tcRA figyelembe veszi a hibaköltséget is a kockázatértékelésnél. Mivel az *E* tevékenységnél felmerülő kockázat magas költséggel rendelkezik, ezért az *E* tevékenység is a rangsor elejére került. Ha kivesszük a költségtényezőt a képletből és a lehetséges átfutási időnövekedés alapján rangsoroljuk a kockázatokat tevékenység szinten, akkor a következő rangsort kapjuk (12.táblázat).

Táblázat 12: Tevékenység RA-értékei az idő tekintetében

Tevékenység	TPTt/TPTe	Rangsor
D	1,60427	1
H	0,44836	2
O	0,36192	3
P	0,17181	4
A	0,16367	5
E	0,11752	6
C	0,11242	7
F	0,10890	8
L	0,07102	9
B	0,06662	10
G	0,03400	11
J	0,02537	12
I	0,00000	13
K	0,00000	14

Forrás: Saját szerkesztés, 2020.

Itt már látható, hogy a sorrend megegyezik a Spearman-korrelációs érték tevékenység-sorrenddel, tehát a tcRPN használatával a lehetséges hibák fontossága a valósághoz közelibb értéket kap a hagyományos FMEA RPN használatával.

A tcFMEA és az MCS eredményei azt mutatják, hogy az építési projekt fázisának valószínűsíthető determinisztikus befejezési ideje: 2018. 09. 09. hétfő, mely 281 napos időtartam, 20%-os valószínűséggel. Ez azt jelenti, hogy 80% illetve 100% esély van arra vonatkozóan, hogy az építkezés időtartama és költsége meg fog nőni a projekt szakasza alatt a bizonytalanság és az építkezéshez kapcsolódó kockázatok miatt. A legrosszabb forgatókönyv esetében, két hónap késés fog bekövetkezni fix 22 000 dolláros költségnövekedéssel. Az érzékenységi elemzése feltárja, hogy nagy gondot kell fordítani a D és E tevékenységekre, mivel ezek vannak a legnagyobb

hatással az építési projekt szakaszának időtartamára és az költségekre. Ezek alapján a hagyományos FMEA-alapú determinisztikus megközelítés hatástalan az építési projektek megvalósításában [19], mert a hagyományos FMEA nem foglalkozik valószínűségi (véletlenszerű) komponensekkel. A hagyományos FMEA sokszor félrevezető, és ha a szervezet alkalmaz kockázati küszöb értékeket akkor sokszor olyan kockázatok kicsúszhatnak a további vizsgálat alól, amelyek amúgy tényleg befolyásolják a folyamatot. Továbbá az elemek (változók) közötti matematikai és logikai kapcsolatok előre rögzítve vannak, és azokat nem befolyásolja bizonytalanság [85]. Következésképpen determinisztikus megközelítés helyett a sztochasztikus megközelítést kell alkalmazni, amely figyelembe veszi a projekt kockázatainak lehetséges hatásait és egyéb bizonytalansági forrásokat a projekt célkitűzéseinek elérése érdekében [19,85].

5.3.2. Keretrendszer ipari alkalmazása – esettanulmány: gyártásütemezés

A piaci diverzifikáció és az állandóan változó, bizonytalan igények arra ösztönzik a vállalatokat, hogy gyorsan reagáljanak az ügyfelek elégedettségének növelése érdekében. A HMVL gyártási folyamatban nagy termékvariabilitással viszonylag kis mennyiségben gyártanak a vállalatok. A nagy termékvariabilitás sok problémát okoz a gyártás ütemezésében. Számos terméket testre szabnak különböző igények szerint, amelyek gyártási folyamata a későbbiekben nem ismétlődik. A folyamat összetett és a kiszámíthatósága problémás lehet [86].

Ezért a probléma megoldására a projekt célkitűzése az, hogy egy hibrid ütemezési rendszert alkossunk, amely a gyártás ütemezése során figyelembe

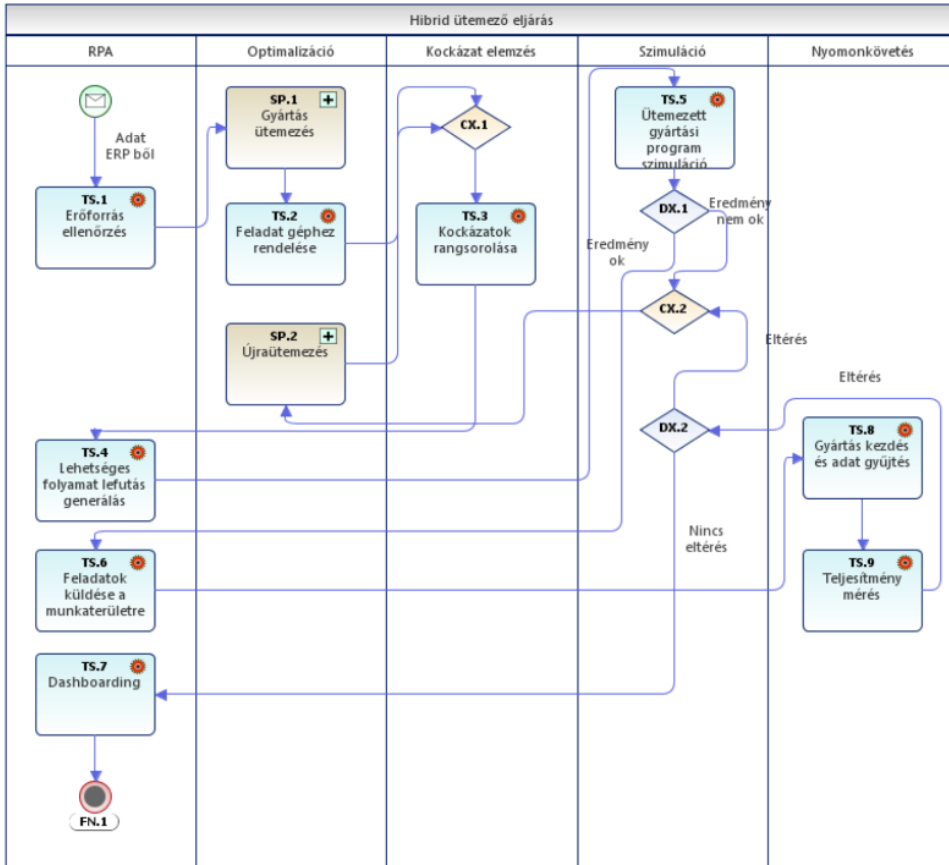
veszi a várható kockázatokat, és a folyamat kiszámíthatósági problémáját próbálja megoldani folyamat -szimulációval.

J_1, J_2, \dots, J_3 , önállóan ütemezett feladatok halmaza. Minden J_i feladat $O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{in}$ műveletsorozatból áll, amelyeket egymás után kell végrehajtani egy előre meghatározott sorrendbe. Adott időpillanatban minden feladat kiosztható valamelyik gépre (M). Minden gép egyidőben csak 1 feladatot képes elvégezni. Alap esetben a HMLV gyártási formát kettő kategóriába sorolják. Bármelyik feladat bármelyik gép által elvégezhető az adott gépcsoportból vagy minden művelet egy előre dedikált gépen végezhető csak el.

Gyártási folyamathoz kapcsolódó feltételezések:

- Minden feladat egy időben csak gépen végezhető el.
- Tevékenység ciklus idők függetlenek egymástól.
- A tevékenységek nem megszakíthatóak.
- A gépi működéshez szükséges beállítási időt a tevékenység ciklusideje tartalmazza.

A hibrid ütemezési rendszer folyamatábrája a következő 9. ábrán látható:



Ábra 9: Hibrid ütemező eljárás

Forrás: Saját szerkesztés, 2020.

Az eljárás 5 fő részből áll. A bemeneti adatokat egy ERP-rendszer biztosítja. Az ERP biztosítja a gyártandó termékek mennyiségét és tulajdonságait. Ezután egy RPA (Robot Process Automation – Szoftver robot) ellenőrzi a szükséges erőforrások meglétét a gyártáshoz. Ha minden erőforrás rendelkezésre áll, akkor a gyártásütemezési rész, elkészíti egy lehetséges gyártási sort és annak EPC-diagramját. Ezen információkat felhasználva a kockázatelemzés, historikus adatokon alapulva elkészíti a lehetséges kockázatok rangsorát. Ehhez a (18) képletet használja és a kockázati rangsort a tcRPN alapján állítja fel. A lehetséges gyártásifolyamat- és a kockázatelemzés eredménye lesz a folyamatszimuláció bemenete.

A folyamatszimuláció 10.000-szer futtatja a folyamatot, a fuzzy tagsági függvény alapján.

$$y = \frac{1}{1 + e_i^a(b_i - x)} \quad (27)$$

Kifejezve az x -et, a következő képletet kapjuk

$$x = b_i - \frac{\ln \frac{1}{y} - 1}{a_i} \quad (28)$$

Ahol y egy random szám 0 és 1 között, b_i az intercept pont, a_i várható x érték koefficiense. Az egyenlet alapján, minden tevékenység ciklusideje egy szimulált érték, a tevékenység lehetséges minimum és maximum ciklusideje között. A várható teljes átfutási idő 95%-os valószínűségi szint mellett határozandó meg a normális eloszlásfüggvény inverzével, a 10.000 folyamat-lefutás átlagából és szórásából.

Ha a folyamatszimuláció eredménye az előre vállalt szállítási határidőn belül van, akkor a gyártás elkezdődik és a folyamat KPI-értékei nyomon követéssel rögzítésre kerülnek. Ha valamilyen probléma fellép a gyártás közben, vagy a szimulált ütemezési program nem megfelelő, akkor az optimalizációs algoritmus újra ütemezi a folyamatot, újra készül a kockázatelemzés és a szimuláció is. Ha számos optimalizáció eredménye az, hogy nem lehet teljesíteni a vállalt szállítási határidőt, akkor, ha van rá lehetőség bizonyos tevékenységet kiszervez a vállalat, vagy a futatott szimulációk alapján a legkedvezőbb feltételek alapján gyártja le a termékeket.

A projekt eredményeképpen létrejött egy olyan folyamatütemezési keretrendszer, amely alkalmazható HMLV gyártási környezetben és figyelembe veszi a lehetséges kockázatokat a gyártás ütemezése során. Ezáltal a vállalati döntéshozás felgyorsítható, a gyártási folyamat kontroll alatt tartható és az igényelt minőség a tervezett időn belül szállítható a vevők számára.

5.3.3. A disszertáció új eredményei, megállapításai

- Az üzleti folyamatban fellépő kockázatok idő- és költségtulajdonságokkal rendelkeznek, amelyek mérhetők vagy kalkulálhatók. Ha ezeket a tulajdonságokat használjuk a kockázat-értékeléskor, akkor, a szubjektivitást csökkentve, mérés alapon lehet a kockázatokat rangsorolni.
- Folyamatszimulációval támogatott kockázatértékelés során képesek vagyunk vizsgálni azt, hogy a kockázatok a felmerülésük esetén milyen hatással vannak a folyamatra idő és költség tekintetében. Figyelembe véve a bizonytalanságot realizisztikusabb kockázatértékelés végezhető a determinisztikus megközelítésekhez képest.
- Idő- és költségalapú kockázat-értékelésre a következő folyamatindikátorok alkalmasak tcFMEA esetén: tevékenység-ciklusidő és azokban történő eltérés, gyártáskiesés, meghibásodások között eltelt idő. Ezen indikátorok használatával csökken a szakértői vélemények súlya az elemzés során, csökken a kockázatértékelés szubjektivitása.
- A mérhető adatok teszik a tcFMEA-elemzést is automatizálhatóvá. Ipar 4.0 környezetben a szükséges adatok egyszerűen mérhetőek és tárolhatóak, a rendszerben fellépő változásokat számos esetben mérni tudja.
- A tcFMEA-alapú kockázatértékelés, nem támaszkodik iparági specifikumokra, nem kell adatokat vagy skálát transzformálni (5%-os

selejt arány lehet alacsony egy faiparban, míg lehet magas a repülőgépiparban).

- A tcFMEA-val támogatott gyártásütemezés képes lehet előrejelezni a gyártás átfutási időt a bizonytalanságok és kockázatok figyelembevételével. Ezen megközelítést alkalmazva egy vállalat számos esetben nagyobb biztonsággal, gyorsabban, eredményesebben reagálhat a változó vevői igényekre magas termék-variabilitás és relatíve alacsony termékszám mellett.
- Szimulációval támogatott tcFMEA-kockázatértékelés magasabb számítási kapacitást igényel, de megbízható, releváns bemeneti paraméterek alkalmazása esetén képes lehet a valósághoz közeli eredményt adni, amely különféle folyamatlefutások figyelembevételével vizsgálja a kockázatok hatását a folyamat teljes átfutási időre.

7. Összefoglalás

Az hatékony teljesítménynövelés érdekében szükséges a bizonytalanságokat kezelni az üzleti folyamatok fejlesztése esetében annak érdekében, hogy a vállalat képes legyen reagálni a változó piaci igényekre a megfelelő időben. Dolgozatomban egy új kockázatértékelő keretrendszert mutattam be részletesen, melynek segítségével a kockázatok rangsorolása reálisabb, valamint megfelelő gyártási környezet esetében a kockázatrangsorolás automatizálható. Az idő- és költség alapú hibamód- és hatás elemzés Monte Carlo szimulációval kezeli a folyamatban fellépő bizonytalanságokat és különböző scenáriók alapján vizsgálja a kockázatok hatását a folyamat teljes átfutási idejére. A kockázatok egy másik tulajdonsága a bekövetkezésük esetén fellépő költségnövekedés, amellyel szintén számol az eljárás. Az eljárás iparágfüggetlen és nem folyamatspecifikus.

A kutatás kiinduló pontja az volt, hogy a hagyományos Hibamód-és Hatáselemzés módszerét fejlesszem annak érdekében, hogy a módszer hátrányait eliminálni tudjam és egy pontosabb, hatékonyabb kockázatértékelő eljárás jöjjön létre. PhD-kutatásom eredményeként sikerült olyan módszertani fejlesztést kidolgozni, amely mérés alapon a kockázat idő- és költségtulajdonságai alapján vizsgálja a kockázatok fontosságát. Az új eljárás megtartotta a hagyományos FMEA felépítését, tehát a súlyosság, előfordulás, detektálhatóság paraméterkategóriák alapján vizsgálja a kockázatokat. Az új módszerben a következő folyamatindikátorok használandók a súlyosság esetében: kockázat hatása a folyamat teljes átfutási idejére, a kockázat bekövetkezése esetén felmerülő költségnövekedés, detektálhatóság esetében: hiba bekövetkezése esetén a javítás belső és külső költsége, gyakoriság: meghibásodások között eltelt idő.

Az idő- és költségalapú kockázatértékelés rcRPN-alapon a következő bemeneti adatokat használja: A folyamat logikai struktúrája és időbeni lefutása, a folyamat-tevékenységek ciklusideje, és azok eloszlásfüggvénye, a tevékenységek bekövetkezési valószínűsége, a potenciális kockázatok és azok költsége.

Dolgozatomban bemutatom a tcFMEA felépítését és a kockázatok rangsorolására használható képleteket, valamint két esettanulmányon keresztül prezentálom a módszer hatékonyságát, és validálom a módszer helyességét egy építőipari példán keresztül.

Az eljárás alkalmazható valós időben történő kockázatértékelésre ipar 4.0 környezetben, azzal az applikációval, amelyet fejlesztettem a tevékenységek ciklusidejének mérésére. Ekkor, ha a valamelyik tevékenységnél ciklusidőbeli változás lép fel, akkor a szimuláció kiszámolja a lehetséges folyamatbefejezési időpontot, és ha az eltér a tervezettől, akkor jelez és lehetőség van beavatkozni még a csúszás előtt.

8. Summary

For the efficient performance management, it is essential to cope with uncertainty in the business process improvement. This induces the effective, accurate and flexible response for the continuously changing market- and customer demands. In my PhD thesis I implemented and presented a novel approach for risk assessment, with which ranking risks within a particular business process can be done in a more realistic and, - in an appropriate manufacturing environment - automated way. The novelty tool, time and cost-based Failure Mode and Effects Analysis (hereinafter: tcFMEA) identifies the risks with the support of Monte Carlo simulation, and it assess and examines the risks' effects on the total process time. Additional vital property of the risks is the manufacturing cost increase, which is also taken into account in the proposed method. The tcFMEA is independent of industry and process.

The starting point of the research was to develop the traditional Failure Mode and Effects Analysis in order to eliminate its known drawbacks, and to create a more accurate and efficient risk assessment tool. As a result of my PhD thesis, a new method was proposed, which can assess the importance of each risk by measuring time and cost figures of a particular set of risks. The tcFMEA kept its conventional structure, thus severity (S), occurrence (O) and detectability (D) categories remained the same, but the way of calculation changed. In this method the following KPIs are used to:

- Measure severity:
 - o Time increase in the total process time,
 - o Cost increase in the production cost,
- Measure detectability:
 - o In case of a problem, the internal and external cost of the repair,
- Measure occurrence:

- Time passed between two consecutive failures

The tcFMEA risk assessment tool uses the following input data for the calculation of tcRPN:

- Logical structure of the process and process duration,
- Process activity durations and their distributions,
- The probability of occurrence of the activities,
- Potential risks and their costs.

In my PhD thesis I present the structure of tcFMEA, the equation for calculating the priority numbers. Furthermore, I present the efficiency of the method by 2 case studies, which also serve as validation.

The technique is applicable in real time risk assessment in the industry 4.0 environment with that software application which is developed for the measurement of activities' time duration. When there is a deviation from the estimated cycle time, this application can calculate the probable finishing time of the process with the use of Monte Carlo simulation. If an alteration is detected, the software warns the decision maker in order to intervene in the process before the occurrence of the problem.

9. Irodalomjegyzék

1. Kocsi, B.; Matonya, M.M.; Pusztai, L.P.; Budai, I.: Real-Time Decision-Support System for High-Mix Low-Volume Production Scheduling in Industry 4.0. *Processes* 8, 912. 2020.
2. Mikulak, R. J; McDermott, R.; Beauregard, M.: The Basics of FMEA, 2nd Edition. *New York: Productivity Press*, 2008.
3. Saglimbene M.: Reliability analysis techniques: How they relate to aircraft certification. *Reliability and Maintainability Symposium*, 218–222. 2009.
4. Carlson C.S.: Understanding the Fundamental Definitions and Concepts of FMEAs in Effective FMEAs. *John Wiley & Sons Inc.* 21–55, 2012.
5. Korenko, M.; Krocko, V.; Kaplík, P.: Use of FMEA method in manufacturing organization, *Journal of Manufacturing and Industrial Engineering*, 11:2, 48-50. 2012.
6. J1739: Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMEA) and Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA) and Effects Analysis for Machinery (Machinery FMEA) - SAE International, (online) url: https://www.sae.org/standards/content/j1739_200901/ (letöltés ideje: 2020. 11. 22. 14:55)
7. ISO 9001:2015: Quality management systems- requirements. Megjelenés: 2015.01.09
8. Huang, J; You, J. X; Liu, H.C; Song, M.S: Failure mode and effect analysis improvement: A systematic literature review and future research agenda, *Reliability Engineering & System Safety*, 199, 2020.

9. Saleh, J. H., Marais, K. Highlights from the early (and pre-) history of reliability engineering. *Reliability Engineering & System Safety*, 91:2, 249-256. 2006.
10. Kocsi, B; Oláh, J: Potential connections of unique manufacturing and industry 4.0. *Logforum* 13:4. 2017.
11. Snee, R.; Rodebaugh, W.: Failure Modes and Effects Analysis. *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*, 10.1002. 2008.
12. Stamatis, D: Failure Mode and Effect Analysis FMEA from Theory to Execution. (2nd ed.) *ASQ Quality Press*. 2003.
13. AIAG & VDA FMEA Handbook, 2019
14. QS 9000:1998: Quality system requirements. Automotive Industry Action Group (AIAG). 1998.
15. BS EN IEC 60812:2018 megjelenés: 2018.10.15
16. CSN EN 16602-30-02 Space product assurance - Failure modes, effects (and criticality) analysis (FMEA/FMECA) megjelenés: 2014
17. DIN ISO 12132 Plain bearings - Quality assurance of thin-walled half-bearings - Design FMEA (ISO 12132:2017) megjelenés: 2019
18. Liu, H: "1.3 the terminology of FMEA," in FMEA using Uncertainty Theories and MCDM Methods, *1st ed. Anonymous Springer Science+Business Media*. 3-6. 2016.
19. Abusalem, O.; Bertalan, N.; Kocsi, B. Implementing quantitative techniques to improve decision making in construction projects: A case study. *Pollack Period.* 14, 223–234. 2019.
20. Liu, H; Liu, L; Liu, N: Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review, *Expert Systems with Applications*, 40:2. 828-838, 2013.
21. Liu H. C; You J.X; Ding X.F; Q, S: Improving risk evaluation in FMEA with a hybrid multiple criteria decision making method.

- International Journal of Quality & Reliability Management*, 32:7,763-782, 2015.
22. Gargama, H; Chaturvedi, S.K: Criticality Assessment Models for Failure Mode Effects and Criticality Analysis Using Fuzzy Logic, *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 60:1. 102-110, 2011.
 23. Von, A. A: Cost oriented failure mode and effects analysis, *International Journal of Quality & Reliability Management*, 25:5. 466-476, 2008.
 24. IFUA Horváth & Partners: Folyamatmenedzsment a gyakorlatban - Árbevétel-növelés és költségcsökkenés tartósan jó folyamatteljesítménnyel, ISBN: 9789639659216. 2008.
 25. Hammer, M; Champy, J: Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution, New York. 2001.
 26. Champy, J.: X-Engineering the Corporation, New York. 2002.
 27. Kieninger, M: Reengineering und Prozessoptimierung, in Horváth & Partner (Hrsg.), Prozesskostenmanagement, München, 1998.
 28. Rothlauf, J: Total Quality Management in Theorie und Praxis, München. 2004.
 29. Gaitanides, M.; Scholz, R.; Vrohling, A.: Prozessmanagement – Grundlagen und Zielsetzungen in: Gaitanides, M. (Hrsg.), Prozessmanagement, München. 1994.
 30. Péczely Gy.; Péczely Cs; Péczely Gy.: LEAN 3 – Termelékenységfejlesztés egységes rendszerben, A.A. Stádium Diagnosztikai és Menedzsment Kft., ISBN: 978-963-08-3163-5. 2014.
 31. Pentti, H.; Atte, H.: Failure mode and effects analysis of software-based automation systems. *VTT Industrial Systems, STUK-YTO-TR*, 33:48, 190. 2002.

32. Johnson, K. G.; Khan, M. K. :A study into the use of the process failure mode and effects analysis (PFMEA) in the automotive industry in the UK. *Journal of Materials Processing Technology*, 139:1, 348-356. 2003.
33. Chrysler LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation. Potential Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). AIAG – Automotive Industry Action Group. 2008
34. Onodera, K. : Effective techniques of FMEA at each life-cycle stage. *Reliability and Maintainability Symposium. Proceedings, Annual*. 50-56. 1997
35. Dong, C. Failure mode and effects analysis based on fuzzy utility cost estimation. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 24: 9, 958-971. 2007.
36. Dinmohammadi, F.; Shafiee, M. A fuzzy-FMEA risk assessment approach for offshore wind turbines, *International Journal of Prognostics and Health Management*, 4:13, 59-68. 2013.
37. Chin, K. S., Chan, A., Yang, J. B. Development of a fuzzy FMEA based product design system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36:7-8, 633-649. 2008.
38. Guimarães, A. C. F., Lapa, C. M. F. Fuzzy inference to risk assessment on nuclear engineering systems. *Applied Soft Computing*, 7:1, 17-28.2007.
39. Banduka, N.; Veza, I.; Bilic, B. (2016). An integrated lean approach to Process Failure Mode and Effect Analysis (PFMEA): A case study from automotive industry. *Advances in Production Engineering & Management*, 11:4, 355-365. 2016.

40. Montgomery, T. A.; Marko, K. A: Quantitative FMEA automation. *Reliability and Maintainability Symposium. Proceedings, Annual* 226-228. 1997.
41. Rivera, S. S.; McLeod, J. E. N. Recommendations generated about a discontinuous distillation plant of biofuel. *Proceedings of the World Congress on Engineering* 1: 651-56. 2009.
42. Bouti, A.; Kadi, D. A. A state-of-the-art review of FMEA/FMECA. *International Journal of reliability, quality and safety engineering*, 1:4, 515-543. 1994.
43. Teoh, P. C.; Case, K. An evaluation of failure modes and effects analysis generation method for conceptual design, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 18, No. 4, 279-293. 2005.
44. Arabian-Hoseynabadi, H.; Oraee, H.; Tavner, P. J. Failure modes and effects analysis (FMEA) for wind turbines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 32: 7, 817-824. 2010.
45. Ribeiro da Silva, E.H.D.; Angelis, J.; de Lima, E.P. In pursuit of Digital Manufacturing. *Procedia Manuf.* 28, 63–69, 2019.
46. Ribeiro da Silva, E.H.D.; Shinohara, A.C.; de Lima, E.P.; Angelis, J.; Machado, C.G: Reviewing Digital Manufacturing concept in the Industry 4.0 paradigm. *Procedia* 81, 240–245, 2019.
47. Gregori, F.; Papetti, A.; Pandolfi, M.; Peruzzini, M.; Germani, M. Digital Manufacturing Systems: A Framework to Improve Social Sustainability of a Production Site. *Procedia.* 63, 436–442, 2017.
48. Machado, C.G.; Winroth, M.; Carlsson, D.; Almström, P.; Centerholt, V.; Hallin, M. Industry 4.0 readiness in manufacturing companies: challenges and enablers towards increased digitalization. *Procedia* 81, 1113–1118, 2019.

49. Monostori, L.; Kádár, B.; Bauernhansl, T.; Kondoh, S.; Kumara, S.; Reinhart, G.; Sauer, O.; Schuh, G.; Sihn, W.; Ueda, K. Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Ann.* 65, 621–641, 2016.
50. Meissner, H.; Aurich, J.C. Implications of Cyber-Physical Production Systems on Integrated Process Planning and Scheduling. *Procedia Manuf.* 28, 167–173, 2019.
51. Ahmad, I.; Ayub, A.; Kano, M.; Cheema, I.I: Gray-box Soft Sensors in Process Industry: Current Practice, and Future Prospects in Era of Big Data. *Processes*, 8, 243. 2020.
52. Henning, K. Recommendations for Implementing the Strategic Initiative *Industrie* Germany, 2013.
53. Bogle, I.D.L. A Perspective on Smart Process Manufacturing Research Challenges for Process Systems Engineers. *Engineering* 3, 161–165, 2017.
54. Waibel, M.W.; Steenkamp, L.P.; Moloko, N.; Oosthuizen, G.A. Investigating the Effects of Smart Production Systems on Sustainability Elements. *Procedia Manuf.* 8, 731–737, 2017.
55. Laudante, E. Industry 4.0, Innovation and Design. A new approach for ergonomic analysis in manufacturing system. *Des. J.* 20, S2724–S2734, 2017.
56. Billaut, J.C.; Roubellat, F. A new method for workshop real time scheduling. *Int. J. Prod. Res.* 34, 1555–1579. 1996.
57. Billaut, J.C.; Roubellat, F. Characterization of a set of schedules in a multiple resource context. *J. Decis. Syst.* 5, 95–109. 1996.
58. Rossit, D.A.; Tohmé, F.; Frutos, M. Industry 4.0: Smart Scheduling. *Int. J. Prod. Res.* 57, 3802–3813, 2019.
59. Akkan, C. Overtime Scheduling: An Application in Finite-Capacity Real-Time Scheduling. *J. Oper. Res. Soc.* 47, 1137–1149, 1996.

60. Vafeiadis, T.; Kalatzis, D.; Nizamis, A.; Ioannidis, D.; Apostolou, K.; Metaxa, I.; Charisi, V.; Beecks, C.; Insolvibile, G.; Pardi, M. Data analysis and visualization framework in the manufacturing decision support system of COMPOSITION project. *Procedia Manuf.* 28, 57–62. 2019.
61. Ákos Károly, Kislexikon, Budapest, Akadémia Kiadó. 1968.
62. Pápay Zsolt, A mérés-technika alapjai, BME VIK. 2008.
63. W.M.P. van der Aalst. Business Process Simulation Revisited. In J. Barjss, editor, Enterprise and Organizational Modeling and Simulation, *Lecture Notes in Business Information Processing*, 63: 1–14. 2010
64. Van Der Aalst, W. M: Business Process simulation survival guide, in Handbook on Business Process Management, 1: 337-370, Springer, Berlin, Heidelberg. 2015.
65. S. Robinson. Successful Simulation: A Practical Approach to Simulation Projects. McGrawHill, Maidenhead, UK, 1994.
66. Sceaer, A. W.: ARIS – business process modeling. 2nd ed. Berlin: Springer 1999.
67. White, S. A.: Business Process Modeling Notation. Specification, BPMI.org, 2004.
68. Harald Störrle: Models of software architecture, Design and Analysis with UML and Petri-nets, Ludwig-Maximilians-Universität München, 2000.
69. *Intaver* *Institute* -
www.intaver.com/Presentations/MonteCarloScheduleAnalysis.ppt -
 letöltés dátuma: 2017.03.24.
70. Raisz Péter, Fegyverneki Sándor: Sztochasztikus modellezés, Nemzeti tankönyvkiadó, 2009

71. Griffin, A.: Evaluating QFD's use in US firms as a process for developing products, *Journal of Product Innovation Management*, 9:3, 171–187. 1992.
72. Rhee, S. Spencer, C. : Life Cost Based FMEA Manual: A Step by Step Guide to Carrying Out a Cost-based Failure Modes and Effects Analysis. 10.2172/946447. 2009.
73. Durán O, Aguilo J: Computer-aided machine-tool selection based on a Fuzzy-AHP approach. *Expert Syst Appl* 34:1787–94. 2008.
74. Michael M., Your Guide to Building Spreadsheet Applications in the Cloud, leanpub, 2015.
75. Xie, B., Shabir, I., Abelson, H. Measuring the usability and capability of app inventor to create mobile applications. In Proceedings of the 3rd International Workshop on Programming for Mobile and Touch 1–8. *ACM* 2015.
76. Kocsi B, Budai I.: Kapacitásszámítási modell fejlesztése = Developing of Capacity analysis method, *International journal of engineering and management sciences / műszaki és menedzsment tudományi közlemények* 1 1-19. 2016.
77. Koltai T.: Termelésmenedzsment, Typotex Elektronikus Kiadó Kft., Budapest, 2009.
78. Hiroyuki H.: IT Implementation Manual Complete Guide to Just-In-Time Manufacturing: Volume 5 -Standardized Operations -Jidoka and Maintenance/Safety. *Productivity Press*, 2009.
79. Rosen, R.; Von Wichert, G.; Lo, G.; Bettenhausen, K.D. : About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. *IFAC PapersOnLine* 48, 567–572. 2015.

80. Wendy T.; Victor A.: Hatékony MTBF összehasonlítások végzése az adatközpontú infrastruktúrák számára, 112. tanulmány, *American Power Conversion*, 2009.
81. Dávid Gy.; András P.; Gábor N.; Viola G.; Wilfried S.; László M.;; Lead time prediction in a flow-shop environment with analytical and machine learning approaches, *IFAC* 51:11, 1029-1034, 2018.
82. Edelman, E. R., van Kuijk, S., Hamaekers, A., de Korte, M., van Merode, G. G., & Buhre, W.: Improving the Prediction of Total Surgical Procedure Time Using Linear Regression Modeling. *Frontiers in medicine*, 4: 85.
83. Lukas L.; Viola G.; Fazel A.; Dávid Gy.; András P.; Wilfried S.; László M.;; Lead time prediction using machine learning algorithms: A case study by a semiconductor manufacturer, *Procedia CIRP*, 72, 1051-1056. 2018.
84. Vose D. :Risk analysis - A quantitative guide, Chichester, Wiley, 2008.
85. Raychaudhuri S. Introduction to Monte Carlo simulation, in: Mason S. J., Hill R. R., Mönch L., Rose O., Jefferson T., Fowler J.W. (Eds) Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, Global Gateway to Discovery, Miami, Florida, USA, 91–100. 2008.
86. Araya, J.M.: Value Stream Mapping Adapted to High-Mix, Low-Volume Manufacturing Environments. Master's Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2012.

10. Tárgyszavak-Keywords

Kockázatelemzés, FMEA, Monte-Carlo szimuláció; ütemezés; folyamatmodellezés, tcRPN, tcFMEA, kockázatértékelés, Hibamód- és Hatáselemzés

Risk analysis; FMEA; Monte-Carlo Simulation, Scheduling, Process Modelling; tcRPN; tcFMEA, Risk evaluation; Failuremode and Effect Analysis

11. Köszönetnyilvánítás

A kutatás feltételeinek megteremtéséért köszönet illeti a témavezetőmet, *Dr. Budai Istvánt*, a Műszaki Kar egyetemi docensét, aki éveken keresztül támogatta a PhD-munkámat.

Köszönetet szeretnék mondani *Prof. Dr. Szűcs Editnek*, aki éveken keresztül segítette a munkámat és lehetővé tette a kutatás lefolytatását.

Köszönet illeti *Pusztai László Pétert*, aki éveken keresztül nyújtott szakmai támogatást, ötleteivel, javaslataival segítette a kutatás alapjainak kidolgozását, valamint sokat tett a kutatási eredmények publikálása terén.

Köszönet illeti *Dr. Tóth Jánost*, aki kritikus látásmódjával véleményezte eredményeimet.

Végezetül, de nem utolsó sorban szeretném köszönetemet kifejezni, feleségemnek, családomnak és barátaimnak, akik minden körülmények között mellettem álltak és biztatásukkal folyamatosan támogattak.

12. Függelék

Táblázat 13: Kritériumok jelölése

Kritérium	Jelölés
Egyszerűen mérhető adatok	C1
Valós időben mérhető (i 4.0)	C2
Objektív	C3
Emberi tényező minimalizálása	C4
Kockázatok dominóhatás figyelembevétele	C5
A kockázati paraméterekkel matematikai alapon ki lehessen számolni a kockázati számot	C6
Előrejelzés	C7
Gyorsan számítható kockázati szám	C8

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 14: Kritériumok és fontosságuk

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
C1	1	1/4	1/6	1/6	1/2	1/8	1/2	2
C2	4	1	1/6	1/4	1/2	1/5	2	2
C3	6	6	1	2	6	1	2	3
C4	6	4	1/2	1	6	1	3	9
C5	2	2	1/6	1/6	1	1/4	1/5	1
C6	8	5	1	1	4	1	5	5
C7	2	1/2	1/2	1/3	5	1/5	1	3
C8	1/2	1/2	1/3	1/9	1	1/5	1/3	1

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 15: A kritériumok relatív fontossága

Kritériumok	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	Relatív fontosság
C1	0,034	0,013	0,043	0,033	0,021	0,031	0,036	0,077	0,036
C2	0,136	0,052	0,043	0,050	0,021	0,050	0,143	0,077	0,071
C3	0,203	0,312	0,261	0,398	0,250	0,252	0,143	0,115	0,242
C4	0,203	0,208	0,130	0,199	0,250	0,252	0,214	0,346	0,225
C5	0,068	0,104	0,043	0,033	0,042	0,063	0,014	0,038	0,051
C6	0,271	0,260	0,261	0,199	0,167	0,252	0,356	0,192	0,245
C7	0,068	0,026	0,130	0,066	0,208	0,050	0,071	0,115	0,092
C8	0,017	0,026	0,087	0,022	0,042	0,050	0,024	0,038	0,038
Összesen	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 16: Konzisztenciaszámítás

Kritérium	Átlagos súly (A)	product of Matrices (B)	Consistency Measure (B/A)	Konzisztenciaindex
C1	0,036	0,310	8,606	0,087
C2	0,071	0,647	9,059	0,151
C3	0,242	2,185	9,040	0,149
C4	0,225	2,017	8,956	0,137
C5	0,051	0,461	9,098	0,157
C6	0,245	2,211	9,036	0,148
C7	0,092	0,813	8,839	0,120
C8	0,038	0,328	8,567	0,081
Átlagos konzisztenciaindex (CI)				0,129
Konzisztencia-hányados (CR)				0,092

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 17: Alternatívák jelölése

Alternatíva	Jelölés
Fuzzy FMEA	A1
Cost Oriented FMEA	A2
Life cost based	A3
MCDM AHP FMEA	A4
Traditional FMEA	A5

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 18: Az alternatívák összehasonlítása a(z) "Egyszerűen mérhető adatok (C1)" kritériumra vonatkozóan

	A1	A2	A3	A4	A5
A1	1	4	4	1/3	1/7
A2	1/4	1	2	1/4	1/9
A3	1/4	1/2	1	1/5	1/9
A4	3	4	5	1	1/7
A5	7	9	9	7	1

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 19: Az alternatívák összehasonlítása a(z) "Valós időben mérhető (C2)" kritériumra vonatkozóan

	A1	A2	A3	A4	A5
A1	1	1/8	1/7	1	1
A2	8	1	1/2	7	8
A3	7	2	1	7	8
A4	1	1/7	1/7	1	1
A5	1	1/8	1/8	1	1

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 20: Az alternatívák összehasonlítása a(z) "Objektív (C3)" kritériumra vonatkozóan

	A1	A2	A3	A4	A5
A1	1	1/8	1/8	3	3
A2	8	1	1/3	5	9
A3	8	3	1	7	9
A4	1/3	1/5	1/7	1	1
A5	1/3	1/9	1/9	1	1

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 21: Az alternatívák összehasonlítása a(z) "Emberi tényező minimalizálása (C4)" kritériumra vonatkozóan

	A1	A2	A3	A4	A5
A1	1	1/5	1/7	1	1
A2	5	1	1/4	4	4
A3	7	4	1	5	4
A4	1	1/4	1/5	1	1
A5	1	1/4	1/4	1	1

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 22: Az alternatívák összehasonlítása a(z) "Kockázatok dominó hatásának figyelembe vétele (C5)" kritériumra vonatkozóan

	A1	A2	A3	A4	A5
A1	1	1/2	1/2	1	1
A2	2	1	1	2	2
A3	2	1	1	2	2
A4	1	1/2	1/2	1	1
A5	1	1/2	1/2	1	1

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 23: Az alternatívák összehasonlítása a(z) "A kockázati paraméterekkel matematikai alapon ki lehessen számolni a kockázati számot (C6)" kritériumra vonatkozóan

	A1	A2	A3	A4	A5
A1	1	1/5	1/4	1	1
A2	5	1	2	4	4
A3	4	1/2	1	2	2
A4	1	1/4	1/2	1	1
A5	1	1/4	1/2	1	1

Forrás: Saját szerkesztés, 202

Táblázat 24: Az alternatívák összehasonlítása a(z) "Előrejelzés (C7)" kritériumra vonatkozóan

	A1	A2	A3	A4	A5
A1	1	1/2	1/6	1	1
A2	2	1	1/5	2	2
A3	6	5	1	8	9
A4	1	1/2	1/8	1	2
A5	1	1/2	1/9	1/2	1

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 25: Az alternatívák összehasonlítása a(z) "Gyorsan számítható kockázati szám (C8)" kritériumra vonatkozóan

	A1	A2	A3	A4	A5
A1	1	2	2	1/3	1/6
A2	1/2	1	2	1/3	1/7
A3	1/2	1/2	1	1/4	1/7
A4	3	3	4	1	1/3
A5	6	7	7	3	1

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 26: Az alternatívák standardizált fontossága a(z) "Egyszerűen mérhető adatok (C1)" kritériumra vonatkozóan

	A1	A2	A3	A4	A5	Relatív fontosság
A1	0,087	0,216	0,190	0,038	0,095	0,125
A2	0,022	0,054	0,095	0,028	0,074	0,055
A3	0,022	0,027	0,048	0,023	0,074	0,039
A4	0,261	0,216	0,238	0,114	0,095	0,185
A5	0,609	0,486	0,429	0,797	0,663	0,597
Összesen	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 27: Az alternatívák standardizált fontossága a(z) "Valós időben mérhető (C2)" kritériumra vonatkozóan

	A1	A2	A3	A4	A5	Relatív fontosság
A1	0,056	0,037	0,075	0,059	0,053	0,056
A2	0,444	0,295	0,262	0,412	0,421	0,367
A3	0,389	0,589	0,523	0,412	0,421	0,467
A4	0,056	0,042	0,075	0,059	0,053	0,057
A5	0,056	0,037	0,065	0,059	0,053	0,054
Összesen	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 28: Az alternatívák standardizált fontossága a(z) "Objektív (C3)" kritériumra vonatkozóan

	A1	A2	A3	A4	A5	Relatív fontosság
A1	0,057	0,028	0,073	0,176	0,130	0,093
A2	0,453	0,225	0,195	0,294	0,391	0,312
A3	0,453	0,676	0,584	0,412	0,391	0,503
A4	0,019	0,045	0,083	0,059	0,043	0,050
A5	0,019	0,025	0,065	0,059	0,043	0,042
Összesen	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 29: Az alternatívák standardizált fontossága a(z) "Emberi tényező minimalizálása (C4)" kritériumra vonatkozóan

	A1	A2	A3	A4	A5	Relatív fontosság
A1	0,067	0,035	0,078	0,083	0,091	0,071
A2	0,333	0,175	0,136	0,333	0,364	0,268
A3	0,467	0,702	0,543	0,417	0,364	0,498
A4	0,067	0,044	0,109	0,083	0,091	0,079
A5	0,067	0,044	0,136	0,083	0,091	0,084
Összesen	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 30: Az alternatívák standardizált fontossága a(z) "Kockázatok dominó effektjének figyelembevétele (C5)" kritériumra vonatkozóan

	A1	A2	A3	A4	A5	Relatív fontosság
A1	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143
A2	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286
A3	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286	0,286
A4	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143
A5	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143
Összesen	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 31: Az alternatívák standardizált fontossága a(z) "A kockázati paraméterekkel matematikai alapon ki lehessen számolni a kockázati számot (C6)" kritériumra vonatkozóan

	A1	A2	A3	A4	A5	Relatív fontosság
A1	0,083	0,091	0,059	0,111	0,111	0,091
A2	0,417	0,455	0,471	0,444	0,444	0,446
A3	0,333	0,227	0,235	0,222	0,222	0,248
A4	0,083	0,114	0,118	0,111	0,111	0,107
A5	0,083	0,114	0,118	0,111	0,111	0,107
Összesen	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 32: Az alternatívák standardizált fontossága a(z) "Előrejelzés (C7)" kritériumra vonatkozóan

	A1	A2	A3	A4	A5	Relatív fontosság
A1	0,091	0,067	0,104	0,080	0,067	0,082
A2	0,182	0,133	0,125	0,160	0,133	0,147
A3	0,545	0,667	0,624	0,640	0,600	0,615
A4	0,091	0,067	0,078	0,080	0,133	0,090
A5	0,091	0,067	0,069	0,040	0,067	0,067
Összesen	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 33: Az alternatívák standardizált fontossága a(z) "Gyorsan számítható kockázati szám (C8)" kritériumra vonatkozóan

	A1	A2	A3	A4	A5	Relatív fontosság
A1	0,091	0,148	0,125	0,068	0,093	0,105
A2	0,045	0,074	0,125	0,068	0,080	0,078
A3	0,045	0,037	0,063	0,051	0,080	0,055
A4	0,273	0,222	0,250	0,203	0,187	0,227
A5	0,545	0,519	0,438	0,610	0,560	0,534
Összesen	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 34: Konzisztencia ellenőrzése "Egyszerűen mérhető adatok (C1)" kritériumra vonatkozóan

	Average Weight (A)	product of Matrices (B)	Consistency Measure (B/A)	Consistency index
A1	0,125	0,645	5,148	0,037
A2	0,055	0,276	5,044	0,011
A3	0,039	0,200	5,198	0,049
A4	0,185	1,057	5,722	0,181
A5	0,597	3,606	6,042	0,261
Átlagos konzisztenciaindex (CI)				0,108
Konzisztencia-hányados (CR)				0,097

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 35: Konzisztencia ellenőrzése "Valós időben mérhető (C2)" kritériumra vonatkozóan

	Average Weight (A)	product of Matrices (B)	Consistency Measure (B/A)	Consistency index
A1	0,056	0,279	5,005	0,001
A2	0,367	1,874	5,111	0,028
A3	0,467	2,419	5,180	0,045
A4	0,057	0,285	5,028	0,007
A5	0,054	0,271	5,024	0,006
Átlagos konzisztenciaindex (CI)				0,017
Konzisztencia-hányados (CR)				0,016

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 36: Konzisztencia ellenőrzése "Objektív (C3)" kritériumra vonatkozóan

	Average Weight (A)	product of Matrices (B)	Consistency Measure (B/A)	Consistency index
A1	0,093	0,471	5,071	0,018
A2	0,312	1,853	5,944	0,236
A3	0,503	2,911	5,785	0,196
A4	0,050	0,257	5,154	0,038
A5	0,042	0,214	5,061	0,015
Átlagos konzisztenciaindex (CI)				0,101
Konzisztencia-hányados (CR)				0,091

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 37: Konzisztencia ellenőrzése "Emberi tényező minimalizálása (C4)" kritériumra vonatkozóan

	Average Weight (A)	product of Matrices (B)	Consistency Measure (B/A)	Consistency index
A1	0,071	0,358	5,067	0,017
A2	0,268	1,397	5,209	0,052
A3	0,498	2,796	5,611	0,153
A4	0,079	0,400	5,087	0,022
A5	0,084	0,425	5,055	0,014
Átlagos konzisztenciaindex (CI)				0,052
Konzisztencia-hányados (CR)				0,046

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 38: Konzisztencia ellenőrzése "Kockázatok dominóhatásának figyelembe vétele (C5)" kritériumra vonatkozóan

	Average Weight (A)	product of Matrices (B)	Consistency Measure (B/A)	Konzisztencia index
A1	0,143	0,714	5,000	0,000
A2	0,286	1,429	5,000	0,000
A3	0,286	1,429	5,000	0,000
A4	0,143	0,714	5,000	0,000
A5	0,143	0,714	5,000	0,000
Átlagos konzisztenciaindex (CI)				0,000
Konzisztencia-hányados (CR)				0,000

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 39: Konzisztencia ellenőrzése "A kockázati paraméterekkel matematikai alapon ki lehessen számolni a kockázati számot (C6)" kritériumra vonatkozóan

	Average Weight (A)	product of Matrices (B)	Consistency Measure (B/A)	Consistency index
A1	0,091	0,457	5,019	0,005
A2	0,446	2,257	5,058	0,014
A3	0,248	1,265	5,099	0,025
A4	0,107	0,541	5,042	0,011
A5	0,107	0,541	5,042	0,011
Átlagos konzisztenciaindex (CI)				0,013
Konzisztencia-hányados (CR)				0,012

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 40: Konzisztencia ellenőrzése "Előrejelzés (C7)" kritériumra vonatkozóan

	Average Weight (A)	product of Matrices (B)	Consistency Measure (B/A)	Consistency index
A1	0,082	0,414	5,071	0,018
A2	0,147	0,746	5,087	0,022
A3	0,615	3,157	5,132	0,033
A4	0,090	0,455	5,069	0,017
A5	0,067	0,335	5,020	0,005
Átlagos konzisztenciaindex (CI)				0,019
Konzisztencia-hányados (CR)				0,017

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 41: Konzisztencia ellenőrzése "Gyorsan számítható kockázati szám (C8)" kritériumra vonatkozóan

	Average Weight (A)	product of Matrices (B)	Consistency Measure (B/A)	Consistency index
A1	0,105	0,537	5,113	0,028
A2	0,078	0,393	5,013	0,003
A3	0,055	0,280	5,075	0,019
A4	0,227	1,176	5,182	0,045
A5	0,534	2,781	5,205	0,051
Átlagos konzisztenciaindex (CI)				0,029
Konzisztencia-hányados (CR)				0,026

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 42: Az összehasonlítás végeredménye

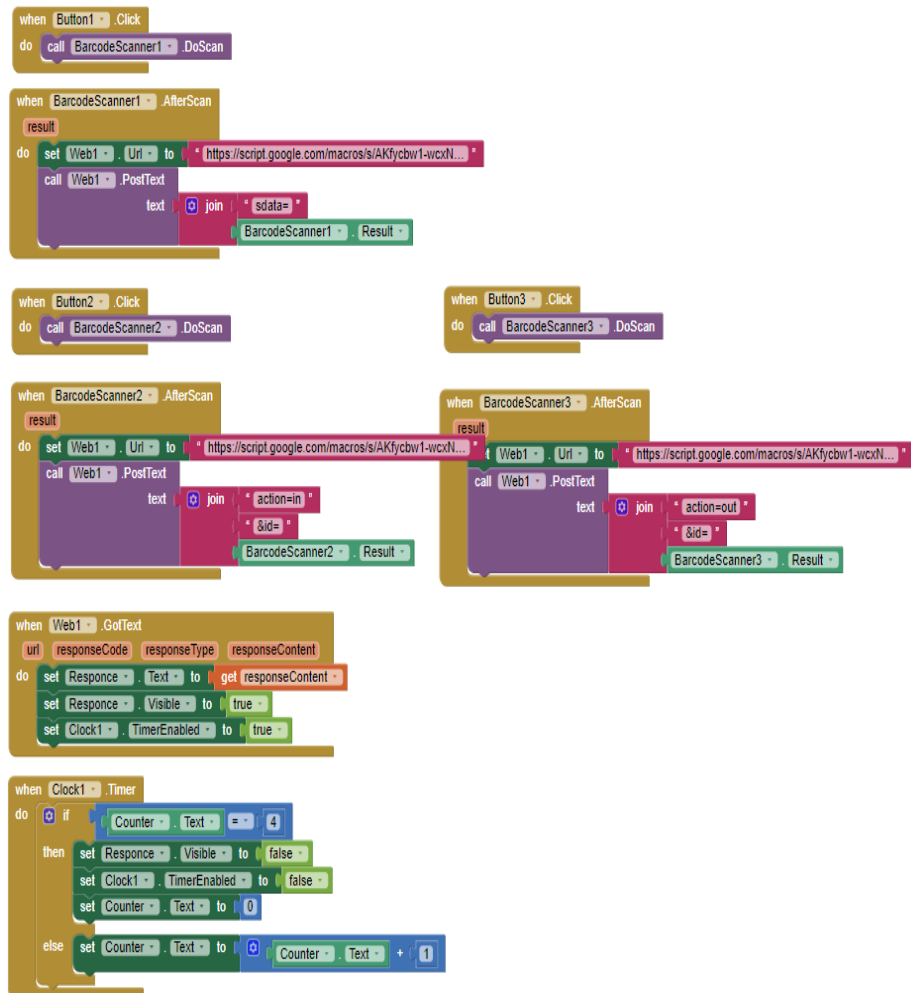
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	Total
A1	0,125	0,056	0,093	0,071	0,143	0,091	0,082	0,105	0,088
A2	0,055	0,367	0,312	0,268	0,286	0,446	0,147	0,078	0,304
A3	0,039	0,467	0,503	0,498	0,286	0,248	0,615	0,055	0,402
A4	0,185	0,057	0,050	0,079	0,143	0,107	0,090	0,227	0,091
A5	0,597	0,054	0,042	0,084	0,143	0,107	0,067	0,534	0,115
Súly	0,036	0,071	0,242	0,225	0,051	0,245	0,092	0,038	0,000

Forrás: Saját szerkesztés, 2020

Táblázat 43: Quality Function Deployment (QFD) módszer eredménye

		Műszaki paraméterek (Hogyan?)												
		Ciklus idő	tevékenység költsége	Gyártás kiesés	Minőségi mutató	Hiba gyakoriság	Hiba belső költsége	hiba külső költsége	minőség költsége	javítási idő	Meghibásodások között eltelt idő			
Vevői igények	1	Egyszerűen mérhető adatok	9	3	3	3	3	3	3	1	9	9	0,036	Vevői igények prioritás sorrendje
	2	Valós időben mérhető (i 4.0)	9	3	3	3	3	3	1	1	3	9	0,071	
	3	Objektív	9	9	9	9	3	9	9	3	9	9	0,242	
	4	Emberi tényező minimalizálása	3	3	3	3	1	3	3	1	3	3	0,225	
	5	Kockázatok dominó effektjének figyelembe vé	1	1	1	1	3	1	1	1	3	3	0,051	
	6	erekkel matematikai alapon ki lehessen számol	3	3	3	3	1	1	1	1	3	3	0,245	
	7	Előrejelzés	9	9	9	9	3	9	9	3	3	3	0,092	
	8	Gyorsan számítható kockázati szám	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	0,038	
	9	Súlyosság	9	3	9	3		9	9	3	9		0,100	
	10	Előfordulás		3	1	3	9	1	1	3		9	0,100	
	11	Detektálhatóság	3		3	3	1					3	0,100	
Abszolút súly		6,975	5,73	6,43	6,03	3,29	5,641	5,498	2,573	5,796	6,524			

Forrás: Saját szerkesztés, 2020.



10. ábra. QR-kódolvasó alkalmazás blokkdiagramja

Forrás: Saját szerkesztés, 2020.



Nyilvántartási szám: DEENK/360/2020.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Kocsi Balázs
Doktori Iskola: Informatikai Tudományok Doktori Iskola
MTMT azonosító: 10040144

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (2)

1. Abusaleem, O., Bertalan, N., **Kocsi, B.**: Implementing quantitative techniques to improve decision making in construction projects: a case study.
Pollack Period. 14 (3), 223-234, 2019. ISSN: 1788-1994.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1556/606.2019.14.3.21>
2. Pusztai, L. P., **Kocsi, B.**, Budai, I.: Making engineering projects more thoughtful with the use of fuzzy value-based project planning.
Pollack Period. 14 (1), 25-34, 2019. ISSN: 1788-1994.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1556/606.2019.14.1.3>

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (2)

3. **Kocsi, B.**, Matonya, M. M., Pusztai, L. P., Budai, I.: Real-Time Decision-Support System for High-Mix Low-Volume Production Scheduling in Industry 4.0.
Processes. 8 (8), 1-26, 2020. EISSN: 2227-9717.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/pr8080912>
IF: 2.753 (2019)
4. **Kocsi, B.**, Oláh, J.: Potential connections of unique manufacturing and industry 4.0.
LogForum. 13 (4), 389-400, 2017. ISSN: 1895-2038.
DOI: <http://dx.doi.org/10.17270/J.LOG.2017.4.1>

További közlemények

Magyar nyelvű könyvek (1)

5. Budai, I., **Kocsi, B.**: Tevékenységmenedzsment - Folyamat elemzés, folyamatoptimalizálás (elmélet). Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Debrecen, 81 p., 2015. ISBN: 9789634739135





Magyar nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (4)

6. Pusztai, L. P., **Kocsi, B.**: Talajlazító mezőgazdasági vontatmány összeszerelési folyamatának fejlesztése = Product assembly process improvement of agricultural cultivator trailers.
IJEMS. 2 (1), 59-62, 2017. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2017.1.11>.
7. Nyárádi, A., **Kocsi, B.**, Tornyos, I., Budai, I.: Autóipari termelő vállalat gyártási folyamatának optimalizálása lean eszközökkel = Optimization of automotive industry's manufacturing process with lean tools.
IJEMS. 1 (2), 81-89, 2016. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2016.2.11>.
8. **Kocsi, B.**, Budai, I.: Kapacitásszámítási modell fejlesztése = Developing of Capacity analysis method.
IJEMS. 1 (1), 1-19, 2016. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2016.1.27>.
9. **Kocsi, B.**, Oláh, J.: Hogyan lehet a Kárpát-medencei szervezetek működési hatékonyságát javítani egy hazai cég logisztikai folyamatának példáján keresztül?
Taylor. 6 (3), 214-223, 2014. ISSN: 2064-4361.

Magyar nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (1)

10. **Kocsi, B.**, Oláh, J., Budai, I.: A gyártási folyamat racionalizálása a Partner Pont Kereskedelmi és Szolgáltatói Kft.-nél.
Közgazdász fórum. 15 (112), 22-37, 2013. ISSN: 1582-1986.

Idegen nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (7)

11. Tóth, J., **Kocsi, B.**: Comparative case study on system-integrated measurement technologies.
Pollack Period. 15 (2), 60-69, 2020. ISSN: 1788-1994.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1556/606.2020.15.2.6>
12. Pusztai, L. P., **Kocsi, B.**, Budai, I., Nagy, L.: Investigation of a production process under uncertainty.
Pollack Period. 15 (2), 49-59, 2020. ISSN: 1788-1994.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1556/606.2020.15.2.5>
13. Pusztai, L. P., **Kocsi, B.**, Budai, I., Nagy, L.: Analysis of activity times in the process of a wooden box manufacturing.
Int. J. Eng. Manag. Sci. 3 (4), 475-484, 2018. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2018.4.39>.
14. Szendrei, J., **Kocsi, B.**, Szűcs, E.: Role of biomass in urban energy management.
Int. J. Eng. Manag. Sci. 3 (4), 62-76, 2018. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2018.4.7>.





15. Pusztai, L. P., **Kocsi, B.**, Budai, I.: Business process development with the application of simulation technique.
IJEMS. 2 (3), 109-118, 2017. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2017.3.11>.
16. Szendrei, J., **Kocsi, B.**, Budai, I., Grasselli, G., Szűcs, E.: Role of Lean and Agile Supply Chain Models for Pellet Fuel Technologies.
IJEMS. 2 (3), 119-130, 2017. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2017.3.12>.
17. Szendrei, J., Grasselli, G., **Kocsi, B.**, Budai, I., Szűcs, E.: Model calculations on the use of mobile and stationary units for wood pellet production.
IJEMS. 1 (1), 1-8, 2016. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2016.1.42>.

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (2)

18. Franyó, D., **Kocsi, B.**, Bukta, E., Szabó, J., Dombbrádi, Z. R.: Assessing the intestinal carriage rates of vancomycin-resistant Enterococci (VRE) at a tertiary care hospital in Hungary.
Folia Microbiol. 65 (3), 483-490, 2019. ISSN: 0015-5632.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12223-019-00751-x>
IF: 1.73
19. Franyó, D., **Kocsi, B.**, Lesinszki, V., Pászti, J., Kozák, A., Bukta, E., Szabó, J., Dombbrádi, Z. R.: Characterization of Clinical Vancomycin-Resistant Enterococcus faecium Isolated in Eastern Hungary.
Microb. Drug Resist. 24 (10), 1559-1567, 2018. ISSN: 1076-6294.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1089/mdr.2018.0074>
IF: 2.397

Egyéb folyóiratközlemények (4)

20. Keller, K., **Kocsi, B.**, Budai, I.: Acélszerkezeteket gyártó vállalat beszállítói értékelése = Evaluation of suppliers at a steel structure manufacturer. Utánközlés második közlés,
Műsz. tud. közl. = PTS. 9 (1), 111-114, 2018. ISSN: 2601-5773.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33895/mtk-2018.09.23>
21. Keller, K., **Kocsi, B.**, Budai, I.: Evaluation of Suppliers at A Steel Structure Manufacturer.
Utánközlés nyelvi változat,
Műsz. tud. közl. = PTS. 9 (1), 111-114, 2018. ISSN: 2601-5773.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33894/mtk-2018.09.23>
22. Pusztai, L. P., **Kocsi, B.**, Budai, I., Nagy, L.: Material Flow Optimization with The Application of Generalized Network Flow Model. Utánközlés nyelvi változat,
Műsz. tud. közl. = PTS. 9 (1), 203-206, 2018. ISSN: 2601-5773.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33894/mtk-2018.09.46>





23. Pusztai, L. P., **Kocsi, B.**: Esettanulmány üzleti folyamatfejlesztésre - ipari folyamat racionalizálása = Business process improvement - a case study - rationalisation of industry process. Utánközlés másodközlés,
Műsz. tud. közl. = PTS. 7, 343-347, 2017. ISSN: 2601-5773.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33895/mtk-2017.07.78>

Magyar nyelvű konferencia közlemények (3)

24. Keller, K., **Kocsi, B.**, Budai, I.: Acélszerkezeteket gyártó vállalat beszállítói értékelése.
In: A XXIII. Fiatal Műszaki Tudományos Ülésszak előadásai. Szerk.: Bitay Enikő, Erdélyi Múzeum Egyesület (EME), Kolozsvár, 111-114, 2018. ISBN: 9789634490777
25. Pusztai, L. P., **Kocsi, B.**, Budai, I., Nagy, L.: Alapanyag áramlásának optimalizálása általánosított hálózati folyam modellel.
In: A XXIII. Fiatal Műszaki Tudományos Ülésszak előadásai. Szerk.: Bitay Enikő, Erdélyi Múzeum Egyesület (EME), Kolozsvár, 203-206, 2018. ISBN: 9789634490777
26. Pusztai, L. P., **Kocsi, B.**: Esettanulmány üzleti folyamatfejlesztésre: ipari folyamat racionalizálása = Business Process Improvement : a Case Study : Rationalization of Industry Process.
In: A XXII. Fiatal Műszaki Tudományos Ülésszak előadásai = Proceedings of the XXII-th International Scientific Conference of Young Engineers. Szerk.: Bitay Enikő, Erdélyi Múzeum Egyesület (EME), Kolozsvár, 343-346, 2017. ISBN: 9789634490180

Idegen nyelvű konferencia közlemények (3)

27. **Kocsi, B.**, Pusztai, L. P., Budai, I.: New approach for resource allocation in digital healthcare 4.0.
In: 5th CARPE Conference : Horizon Europe and beyond. Eds.: Javier Orozco Messana, Juan Miguel Martínez Rubio, Editorial Universitat Politècnica de Valencia - UPV, Valencia, 244-251, 2019. ISBN: 9788490487891
28. Pusztai, L. P., **Kocsi, B.**, Budai, I., Nagy, L.: Industrial process modelling with operations research method.
In: The 11th Conference of PhD Students in Computer Science : volume of short papers : CS2, University of Szeged, Institute of Informatics, Szeged, 106-109, 2018.
29. **Kocsi, B.**, Pusztai, L. P., Budai, I., Szűcs, E.: How to build our houses in order to consume the minimum energy.
In: 12th Conference on Advanced Building Skins, Advanced Building Skins GmbH, Sarnen, 399-405, 2017. ISBN: 9783952488317

Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (6)

30. Tóth, J., **Kocsi, B.**: Comparative case study on system-integrated measurement technologies.
In: Abstract book for the 14th Miklós Iványi International PhD & DLA Symposium : Architectural, Engineering and Information Sciences. Eds.: Attila Fülöp, Péter Iványi, Pollack Press, Pécs, , 2018. ISBN: 9789634292845





31. Abusalem, O., Bertalan, N., **Kocsi, B.**: Implementing quantitative techniques to improve decision making in construction projects: case study.
In: Abstract book for the 14th Miklós Iványi International PhD & DLA Symposium : Architectural, Engineering and Information Sciences. Eds.: Attila Fülöp, Péter Iványi, Pollack Press, Pécs, , 2018. ISBN: 9789634292845
32. **Kocsi, B.**, Budai, I.: Optimization of syntactic metal matrix foam manufacturing.
In: Abstract book for the 14th Miklós Iványi International PhD & DLA Symposium : Architectural, Engineering and Information Sciences. Eds.: Attila Fülöp, Péter Iványi, Pollack Press, Pécs, , 2018. ISBN: 9789634292845
33. **Kocsi, B.**, Pusztai, L. P., Budai, I.: Total process time prediction in complex manufacturing environment.
In: Abstract book for the 14th Miklós Iványi International PhD & DLA Symposium : Architectural, Engineering and Information Sciences. Eds.: Attila Fülöp, Péter Iványi, Pollack Press, Pécs, , 2018. ISBN: 9789634292845
34. **Kocsi, B.**, Tóth, J., Budai, I.: "Green Laboratory": Lean Methods in the Preanalytical Phase.
Clin. Chem. Lab. Med. 53 (4), 83-84, 2015. ISSN: 1434-6621.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1515/cclm-2015-0091>
35. **Kocsi, B.**, Oláh, J.: Rationalization of business processes at Partner-Pont Ltd.
In: Agrárinformatika 2013 Nemzetközi Konferencia - Agricultural Informatics 2013 International Conference / [kiad. a] Magyar Agrárinformatikai Szövetség, Magyar Agrárinformatikai Szövetség, Debrecen, , 2013.

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 6,88

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapján szolgáló közleményekre): 2,753

A DEENK a Jelölt által az IDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudományometriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2020.11.25.

