





PANNON EGYETEM

VEGYÉSZMÉRNÖKI- ÉS ANYAGTUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

Készítette:

Ungvári Edina

**Komplex anyagi és technológiai rendszerek hálózat-szemléletű  
modellezése**

DOI:10.18136/PE.2023.856

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS

Témavezetők: Dr. Gyurika István Gábor, Dr. Csiszér Tamás

Pannon Egyetem

Mérnöki Kar

Műszaki Tudományok Kutató-Fejlesztő Központ

Géptan Intézeti Tanszék

2023

Az értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében készült a Pannon  
Egyetem

Vegyésmérnöki és Anyagtudományok Doktori Iskolája keretében

Bio-, környezet- és vegyésmérnöki tudományok tudományágban

Írta: Ungvári Edina

Témavezető/i: Dr. Gyurika István Gábor, Dr. Csiszér Tamás

Elfogadásra javaslom (igen / nem)

.....

Dr. Gyurika István Gábor

Elfogadásra javaslom (igen / nem)

.....

Dr. Csiszér Tamás

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom:

Bíráló neve: ..... igen /nem

.....

(bíráló)

Bíráló neve: ..... igen /nem

.....

(bíráló)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján .....%-ot ért el.

Veszprém,

.....

(a Bíráló Bizottság elnöke)

A doktori (PhD) oklevél minősítése.....

Veszprém,

.....

(az EDHT elnöke)

## KIVONAT

Az ipari környezet, az adatfeldolgozás, a gyártást támogató módszerek rohamosan fejlődnek, egymást váltja az Ipar 4.0 és az Ipar 5.0 napjainkban. A megfelelő minőségű termék és szolgáltatás előállításához azonban szükségszerű ugyanilyen ütemben fejleszteni a minőségügyhöz kapcsolódó módszereket is, hogy megfelelően megértsük a vevői hangot és meg tudjunk felelni annak. A minőségügyi módszereknek alkalmazkodniuk kell ehhez a fejlődő környezethez, képesnek kell lennie feldolgozni az ezzel járó nagyobb adathalmazokat.

Jelen dolgozat célja olyan az iparban gyakran használt minőségügyi módszerek fejlesztése, melyek komplex rendszerekként tekinthetők, ezáltal hálózatokkal egyszerűen modellezhetők. A hálózatokkal történő modellezéssel pedig képesek kezelni nagyobb adathalmazt is. Emellett a kutatás célja ezen módszerek általános fejlesztése. Jelen dolgozat tartalmazza az FMEA módszertan skáláinak megvizsgálását azok minőségi kialakításának szempontjából. Három, az irodalomban leggyakrabban használt skálatípus került megvizsgálásra azok reprodukálhatósága és megismételhetősége alapján. A kutatás célja annak bebizonyítása, hogy a skála minőségi kialakítása befolyásolja-e kockázatértékelést, azaz növeli-e az értékelés szubjektivitását. Emellett a dolgozat tartalmazza az FMEA értékelés hálózatokkal történő modellezését kettő megközelítésben. A hálózatos modellezéssel a cél az egyéni értékelés, de csoportos kiértékelés elérése, illetve az értékelési tényezők kiszámítási módjának újabb lehetősége. A modellezés másik iránya a következmények jelentőségének értékelésére igyekszik megoldást adni.

A dolgozat továbbá tartalmazza a páros összehasonlítással végzett eredmények modellezését hálózatokkal. A dolgozat bemutatja a páros összehasonlítással végzett értékelések hálózati mutatókkal történő kiértékelésének kettő lehetséges módját, illetve javaslatot tesz a konzisztencia értékelésére.

A hálózatelemzés eszköztárával a QFD módszertan fejlesztése is a jelen tanulmány részét képezi. A kutatás során három hálózat került kialakításra. A vevői igények egy preferencia hálózatban, a kapcsolati mátrix egy bimodális hálóban, a műszaki paraméterek pedig egy korrelációs hálózaton keresztül lettek kiértékelve. A módszertan fejlesztése során a QFD-ben található, a műszaki paraméterek fontosságát megadó egyenlet fejlesztésre került, továbbá a disszertáció tartalmaz további új egyenleteket melyek a műszaki paraméterek szerepét mutatja be a korrelációs hálózatban. Ezek a tulajdonságok az érzékenység, a befolyás és a szignifikancia.

## ABSTRACT

The industrial environment, data processing, and production support methods are developing rapidly, and today Industry 4.0 and Industry 5.0 are replacing each other. However, to produce products and services of the right quality, it is necessary to develop methods related to quality matters at the same pace, to properly understand the voice of the customer and be able to respond to it. Quality methods must adapt to this evolving environment and must be able to process the larger data sets that come with it.

This thesis aims to develop quality methods often used in industry, which can be considered complex systems and thus can be easily modeled with networks. And by modeling with networks, they can also handle larger data sets. In addition, the aim of the research is the general development of these methods.

This thesis contains an examination of the scales of the FMEA methodology from the point of view of their quality design. Three types of scales most often used in the literature were examined based on their reproducibility and repeatability. The research aims to prove whether the qualitative design of the scale affects risk assessment and whether it increases the subjectivity of the assessment. In addition, the thesis contains the modeling of the FMEA evaluation with networks in two approaches. With network modeling, the goal is to achieve individual evaluation, but also group evaluation, as well as a new option for calculating the evaluation factors. Another direction of modeling aims to provide a solution for evaluating the significance of the effects.

The thesis also includes the modeling of the results of pairwise comparisons with networks. The thesis presents two possible ways of evaluating assessments carried out by pairwise comparisons with network indicators and proposes the evaluation of consistency.

The development of the QFD methodology with the toolbox of network analysis is also part of this study. During the research, three networks were established. The customer needs were evaluated in a preference network, the relationship matrix in a bimodal network, and the technical parameters through a correlation network. During the development of the methodology, the equation found in QFD, which specifies the importance of the technical parameters, was developed, and the dissertation contains additional new equations that show the role of the technical parameters in the correlation network. These properties are sensitivity, influence, and significance.

## ABSTRACT

De industriële omgeving, gegevensverwerking en productieondersteunende methoden ontwikkelen zich snel en vandaag vervangen Industrie 4.0 en Industrie 5.0 elkaar. Om producten en diensten van de juiste kwaliteit te produceren, is het echter nodig om in hetzelfde tempo methoden te ontwikkelen die te maken hebben met kwaliteitszaken, om de stem van de klant goed te begrijpen en daarop te kunnen inspelen. Kwaliteitsmethoden moeten zich aanpassen aan deze evoluerende omgeving en moeten in staat zijn om de grotere datasets die daarmee gepaard gaan te verwerken. Dit proefschrift heeft tot doel kwaliteitsmethoden te ontwikkelen die vaak in de industrie worden gebruikt en die als complexe systemen kunnen worden beschouwd en dus gemakkelijk kunnen worden gemodelleerd met netwerken. En door te modelleren met netwerken kunnen ze ook grotere datasets aan. Daarnaast is het doel van het onderzoek de algemene ontwikkeling van deze methoden.

Dit proefschrift bevat een onderzoek naar de schalen van de FMEA-methodiek vanuit het oogpunt van hun kwaliteitsontwerp. Drie typen schalen die het meest in de literatuur worden gebruikt, werden onderzocht op hun reproduceerbaarheid en herhaalbaarheid. Het onderzoek heeft tot doel aan te tonen of het kwalitatieve ontwerp van de schaal de risicobeoordeling beïnvloedt en of het de subjectiviteit van de beoordeling vergroot. Daarnaast bevat het proefschrift de modellering van de FMEA-evaluatie met netwerken in twee benaderingen. Met netwerkmodellering is het doel om individuele evaluatie te bereiken, maar ook groepevaluatie, evenals een nieuwe mogelijkheid om de evaluatiefactoren te berekenen. Een andere richting van modellering beoogt een oplossing te bieden voor het evalueren van de significantie van de effecten. Het proefschrift omvat ook het modelleren van de resultaten van paarsgewijze vergelijkingen met netwerken. Het proefschrift presenteert twee mogelijke manieren om beoordelingen te evalueren die worden uitgevoerd door paarsgewijze vergelijkingen met netwerkindicatoren en stelt de evaluatie van consistentie voor.

De ontwikkeling van de QFD-methodiek met de toolbox van netwerkanalyse maakt ook deel uit van deze studie. Tijdens het onderzoek zijn drie netwerken ontstaan. De klantbehoeften werden geëvalueerd in een voorkeursnetwerk, de relatiematrix in een bimodaal netwerk en de technische parameters via een correlatienetwerk. Tijdens de ontwikkeling van de methodologie werd de vergelijking gevonden in QFD, die het belang van de technische parameters specificceert, ontwikkeld, en het proefschrift bevat extra nieuwe vergelijkingen die de rol van de technische parameters in het correlatienetwerk laten zien. Deze eigenschappen zijn gevoeligheid, invloed en betekenis.

## **Rövidítések jegyzéke**

<b>FMEA</b>	Failure Mode and Effects Analysis
<b>DFMEA</b>	Design Failure Mode and Effects Analysis
<b>PFMEA</b>	Process Failure Mode and Effects Analysis
<b>MFMEA</b>	Machinery Failure Mode and Effects Analysis
<b>SFMEA</b>	System Failure Mode and Effects Analysis
<b>PC-FMEA</b>	Pairwise-Comparison based Failure Mode and Effects Analysis
<b>S</b>	Severity
<b>O</b>	Occurrence
<b>D</b>	Detection
<b>AHP</b>	Analytic Hierarchy Process
<b>ANP</b>	Analytic Network Process
<b>FTA</b>	Failure Tree Analysis
<b>MCDM</b>	Multiple Criteria Decision Making
<b>QFD</b>	Quality Function Deployment
<b>HoQ</b>	House of Quality
<b>R&amp;R</b>	Repeatability and Reproducibility

## Tartalomjegyzék

1. Bevezetés .....	10
2. Szakirodalmi áttekintés .....	11
2.1 Páros összehasonlításon alapuló módszerek .....	11
2.2 Hibamód és Hatáselemzés módszertana .....	13
2.3 Ismételhetségi és reprodukálhatósági vizsgálat .....	19
2.4 Minőségi módszerek lebontása (QFD) módszer .....	20
2.5 Hálózatelmélet.....	23
2.6 Minőség 4.0.....	26
3. Célkitűzések és motiváció .....	28
3.1 Az alapprobléma megfogalmazása .....	28
3.2 Célkitűzések megfogalmazása .....	29
4. A kutatáshoz használt program .....	30
5. Az FMEA értékeléshez használt skála bizonytalansága .....	32
5.1 Alapprobléma, a skála bizonytalansága .....	33
5.2 Eredmények.....	42
6. Páros összehasonlítással végzett elemzések modellezhetők hálózatokkal ....	44
6.1 Célkitűzések .....	44
6.2 Páros összehasonításon alapuló kockázatértékelés eredményeinek modellezése hálózatokkal.....	44
6.2.1 Egyéni kockázati hálózat .....	45
6.2.2 Összesített kockázati hálózat .....	48
6.3 Preferencia és következetesség értékelése .....	50
6.4 Konzisztencia értékelése .....	52
6.5 Eredmények.....	53
7. A QFD módszertanban a műszaki paraméter fontosság értéke korrigálható a műszaki paraméter korrelációs hálózatban betöltött szerepével.....	54
7.1 Célkitűzések, probléma megfogalmazása .....	54
7.2 Csomópontok közötti korreláció .....	54
7.3 Esettanulmány .....	61
7.3.1 Vevői követelmények súlya.....	62
7.3.2 Korrelációs mátrix .....	64
7.4 Az eredmények kiértékelése hálózatokkal .....	65
7.4.1 A vevői követelmények rangsorolása .....	65
7.4.2 Korrelációs mátrix .....	66
7.4.3 Kapcsolati mátrix.....	67
7.4.4 A műszaki követelmények szerepe a hálózatban.....	69
7.5 Eredmények.....	75
8. FMEA módszertan kiterjesztése hálózatokkal .....	77
8.1 Probléma megfogalmazása.....	77



8.2	Az új RPN érték kiszámítása.....	77
8.3	Esettanulmány .....	78
8.4	Eredmények.....	83
9.	A doktori értekezés tézisei.....	84
10.	Theses of the doctoral dissertation.....	86
11.	Összefoglalás .....	88
12.	A témában található fejlesztési lehetőségek .....	90
13.	Köszönetnyilvánítás.....	91
	Az értekezés témájában megjelent publikációk.....	92
	Irodalomjegyzék .....	93

## 1. Bevezetés

A minőségügy története az emberiség életében nagyon régen kezdődött, hiszen az ember már a kezdetektől fogva az egyre használhatóbb, tökéletesebb szolgáltatások/termékek kialakítására törekedett. A szabványosítás először a hadiiparban jelent meg, majd 1947-ben az ISO (International Organization for Standardization, Nemzetközi Szabványosítási szervezet) megkezdte működését. Ettől kezdve folyamatosan kibocsátásra kerültek a ma is használatos, minőségirányítással kapcsolatos szabványok, például az ISO 9001-es szabvány, mely a minőségirányítási rendszer kereteit fogalmazza meg. A minőségirányításhoz pedig az alapvető szabványokon kívül különböző módszerek is hozzátartoznak. Ezek a módszerek segítenek a folyamatok optimalizálásában. A módszerek megjelenése a minőségirányítás fejlődésével párhuzamosan futott, kockázatértékelést már a hadiiparban is használtak a kezdetekkor. Az 1900-as években már jelen volt a legtöbb módszer, amelyet ma is alkalmazunk. A szükséges szabványoknak és a módszereknek a jelentősége az évek során nem csökkent, azonban azok aktualizálása kissé elmaradt. Az ipari technológiák és azok támogató rendszerének fejlődése szinte lekövethetetlen, a hozzá tartozó minőségügyi környezet viszont nem mutat ilyen nagy mértékű változást. Az Ipar 4.0, 5.0 megjelenésével a gyártási környezet teljes digitalizációja következett be, mely mellé sokszor még most is az elavult, kevésbé digitalizálható minőségbiztosítási módszerek kerülnek alkalmazásra. A legújabb kutatásokban fellelhető módszerek pedig magasabb szintű tudást igényelnek, nehezen használhatók egy multidiszciplináris csoport közös döntésén alapuló, döntéselőkészítő módszereként.

Jelen doktori disszertáció célja – a teljesség igénye nélkül – olyan fontos minőségügyi módszerek fejlesztése a hálózat kutatás eszköztárával, amelyek használata kulcsfontosságú a jó termék/szolgáltatás létrehozásához és fenntartásához. A fejlesztések során fontos szempont volt olyan módszerek létrehozása, amelyek az ipari környezetben is könnyen használhatók, megértésük nem igényel mély szakmai hozzáértést, használatukhoz nem szükséges komoly szoftveres támogatottság, egy multidiszciplináris csapat számára is könnyen elsajátítható. A már évtizedek óta működő minőségügyi módszerek is egyszerűek, jól megérthetőek, sikerük ebben is keresendő. A hálózat kutatás módszertana egyre elterjedtebb kutatásfejlesztési irány, melynek még számos kiaknázatlan területe van. Ilyen a hálózat kutatás és a minőségbiztosítás egymáshoz párosítása, az előbbieken említett módszertani fejlesztések elmaradása miatt is. A kutatás során vizsgált elemek komplex rendszereket alkotnak, így azok hálózatokkal való modellezhetősége vizsgálható.

## 2. Szakirodalmi áttekintés

A kutatási munkálatok során olyan minőségbiztosítási módszereket tekintettem át, melyek fontos szerepet töltenek be a legnagyobb iparágak működésében. A szakirodalmi áttekintésben azon módszerek kerülnek bemutatásra, melyeket a hálózat kutatás eszköztárával fejlesztettem vagy amelyek hozzájárultak a kutatásaimhoz. Ezek a módszerek, nevezetesen a páros összehasonlításra alkalmas AHP és KIPA módszerek, a kockázatértékelés elvégzésére alkalmas Hibamód és hatáselemzés (FMEA) és a vevői hang alapján a termékfejlesztési irányok kijelölését támogató QFD módszer. Mindemellett bemutatásra kerülnek a hálózat kutatás eszköztárából a kutatás során felhasznált módszerek, illetve az, hogyan kapcsolódott eddig össze a minőségirányítás és a hálózat kutatás a megjelent irodalmakban.

### 2.1 Páros összehasonlításra alapuló módszerek

A páros összehasonlításra alapuló döntéselőkészítő módszerek száma magas, mely a módszer hatékonyságát is mutatja. Érdeemes először a KIPA módszertant megemlíteni, amelyet magyar kutatók, Kindler és Papp jegyeztek le 1977-ben. A módszertan többtényezős döntési problémák megoldására alkalmas, amelynek alapja a páros összehasonlítás. Az összehasonlítást egyéni preferencia táblázatokba rendezik, ahol nem csak az értékelési tényezők preferenciális sorrendje adódik eredményképpen, hanem a válaszadó konzisztencia szintje is, mely megadja, hogy a kitöltés során mennyire volt következetes [1]. A világirodalomban azonban a KIPA módszertanhoz nagyon hasonló AHP (Analytic Hierarchy Process) döntéselőkészítő eszköz (MCDM, Multi-Criteria Decision Making Method) az elterjedt. A módszer első említése 1972-re datálódik, és Thomas L. Saaty nevéhez fűződik [2]. A módszer alapja szintén az értékelési tényezők páros összehasonlítása, és 4 lépésen keresztül juthatunk el az értékelési tényezők rangsorolásáig. Az első lépés a modellezés, mely a probléma hierarchikus felépítését jelenti. A következő lépés a tényezők páros összehasonlítása, melyhez a módszer ad egy arányskálát, melyet az 1. táblázat tartalmaz. Az összehasonlítások egy pozitív reciproknak mátrixba (1) kerülnek, ahol  $a_{ij}$  jelenti az összehasonlítást  $i$  és  $j$  között [3]. A módszer nemcsak a szempontok fontossági súlyaira alkalmazható, hanem például döntési alternatívák értékelésére is.

## 1. Táblázat: AHP skála a páros összehasonlításos értékeléshez [3]

A fontosság intenzitása	Definíció
1	Ugyanolyan fontos
3	Az egyik tényező egy kicsit fontosabb, mint a másik
5	Jelentős vagy erős fontosság
7	Igazolt fontosság
9	Abszolút fontosság
2,4,6,8	Köztes értékek a két szomszédos ítélet között

Ha a tranzitivitás teljesül, amely szerint,

$$a_{ij} = a_{ik} \cdot a_{kj} \quad (1)$$

akkor a páros összehasonlítási mátrixot konzisztensnek nevezzük [3].

A prioritásvektorok becslésére a legnépszerűbb módszer maga Saaty által javasolt módszer, amely szerint a prioritásvektor legyen  $A$  fő sajátvektora. A módszer a következő megfigyelésből fakad. Ha veszünk egy  $A$  mátrixot, amelynek elemei pontosan a súlyok arányaként vannak megadva, és megszorozzuk  $w$ -vel, megkapjuk, hogy

$$Aw = nw \quad (2)$$

A lineáris algebrából tudjuk, hogy az  $Aw = nw$  típusú megfogalmazás azt jelenti, hogy  $n$  és  $w$   $A$  sajátértéke, illetve sajátvektora.

Ha tudjuk, hogy  $A$  másik sajátértéke  $0$ , és multiplicitása  $(n - 1)$ , akkor tudjuk, hogy  $n$   $A$  legnagyobb sajátértéke. Továbbá a  $w$  vektor bármely  $A$  páronkénti összehasonlító mátrixból megkapható a következő egyenletrendszer megoldásaként:

$$\begin{cases} Aw = \lambda_{max} w \\ w^T \mathbf{1} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

ahol  $\lambda_{max}$   $A$  maximális sajátértéke, és  $\mathbf{1} = (1, \dots, 1)^T$  [4].

A sajátvektor módszer mellett a legkisebb logaritmusok módszere is alkalmazható a prioritási értékeknek a meghatározására a következőképpen [5]:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\ln a_{ij} - \ln w_i + \ln w_j)^2 \quad \text{ha} \quad \prod_{i=1}^n w_i = 1 \quad w \in R_+^n \quad (4)$$

A módszertan sok másik, minőségügyben gyakran használt módszerrel került kombinálásra, hogy azok hibáit kiküszöbölje, vagy az értékelést kiterjessze. Ezen módszerek bemutatására a további fejezetekben kerül sor.

Az AHP módszer előnye, hogy a tényezők súlyozása mellett az is megadható, hogy a kitöltők mennyire voltak következetek a kitöltés során. Ezt a módszer konzisztencia elemzésnek nevezi. A konzisztencia elemzésnél tehát kiszámítható, hogy az értékelő mennyire volt következetes a kitöltés alatt, és az adatai felhasználhatók-e további értékelésre és döntésre. Az AHP módszertan szerint a konzisztencia elemzés a következőképpen végezhető. Saaty definiálta a konzisztencia indexet (CI), ami a sajátérték alapján számítható.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

ahol  $n$  a mátrix dimenziója és  $\lambda_{max}$  a maximális sajátérték. A konzisztencia aránya, tehát az inkonzisztencia érték a következőképpen adható meg:

$$CR = CI / RI \quad (6)$$

ahol RI egy random index, amely CI átlaga 500 random kitöltött mátrixból. Amennyiben CR értéke kisebb, mint 10%, úgy az értékelés konzisztencia szintje elfogadhatónak tekinthető [6].

## 2.2 Hibamód és Hatáselemzés módszertana

A Hibamód és Hatáselemzés (Failure Mode and Effect Analysis, FMEA) az ipari környezetben leggyakrabban használt kockázatértékelési módszer. Az autóiparban az alkalmazása a beszállítói láncban való részvételhez elengedhetetlen.

Az FMEA egy olyan módszer, amely egy adott termék, folyamat vagy projekt meghibásodásának, kockázatainak lehetséges okait és hatásait tárja fel és értékeli [7]. Az FMEA egy széles körben használt módszer [8], különösen az autóiparban, olyan műveletek teljes sorának a vizsgálatára, amelyek csökkentik a rendszerrel vagy a gyártási és összeszerelési folyamattal kapcsolatos kockázatokat [9]. A módszer alapján a kockázatokat három szempont szerint kell értékelni. A gyökérokoknál a hiba előfordulási valószínűségét (Occurrence, O) és a hiba észlelhetőségének valószínűségét (Detection, D), a következmények szintjén pedig annak súlyosságát (Severity, S). A régebbi típusú FMEA-ban minden hiba a rizikó prioritási szám (RPN) szerint van rangsorolva, amelyet a meghibásodás három kockázati tényezőjének, nevezetesen a súlyosságnak, az előfordulási valószínűségnek és az észlelési valószínűségnek a szorzatával számítanak ki, mielőtt a hiba hatásai megvalósulnának, és egy előre meghatározott skálán értékelik, általában 1 (ha nincs vagy elhanyagolható kockázat) és 10 között (a legrosszabb forgatókönyv szerinti érték). Az értékelést végző csapat különböző skálák segítségével határozza meg a hiba előfordulásának vagy észlelésének valószínűségét és a hatás súlyosságát, gondosan átnézve a kritériumokat a rangsor

megállapításához [10]. Az FMEA csapat figyelembe veheti az értékelésnél a korábbi, hasonló termékekről, folyamatokról, rendszerekről, gépekről készült FMEA-kat, a hasonló termékek teszteredményeit, karbantartási eredményeit, meghibásodási gyakoriságait, korábbi baleseteket, meghibásodásokat, reklamációkat, az összehasonlítható rendszerekkel/termékekkel kapcsolatos tapasztalatokat és információforrásokat. Az értékelésnek azonban mindig jelen lesz szubjektív része is, mivel az FMEA mindig tartalmaz új részeket, és minden kockázati forrást újra meg kell vizsgálni, a tapasztalatok csak segítenek a kockázati értékek becslésében. Az FMEA-csapatnak a lehető legobjektívebbnek kell lennie a skálák kritériumai alapján a megfelelő értékelés/rangsor meghatározásában [11]. Az FMEA értékelő csapata a legjobb tapasztalataik és ismereteik alapján tudja meghatározni hibamódok osztályozását [12]. Az ilyen jellegű döntéseknél érdemes megemlíteni a viselkedési közgazdaságtan kapcsolódó eredményeit is. A három ítéletalkotási heurisztika a reprezentativitási, hozzáférhetőségi és horgonyzási, mind a döntési mechanizmusokat vizsgálják, hogy azoknak milyen korábbi élmény vagy tapasztalat lehet az alapja [13].

Az FMEA-nak többféle típusa is lehet az alkalmazási területe szerint. Rendszer-FMEA (SFMEA), amely a rendszerek és alrendszerek elemzésére szolgál, a Termék-FMEA (DFMEA), amely segít összegyűjteni a tervezés kockázatait, a Folyamat-FMEA (PFMEA), amely felméri a kockázatokat a folyamatok során [8] és a Gép-FMEA (MFMEA), amelyet a gépek és berendezések meghibásodásával kapcsolatos kockázatok azonosítására használhatunk [14]. Noha a kutatásokban talán kevesebb figyelmet fordítanak a gépek kockázatértékelésére, ez ugyanolyan fontos része minden gyártási és tervezési folyamatnak. A gyártógépek biztonsága kihat a dolgozók személyes biztonságára, valamint a gyártandó termék biztonságára is. A gépek biztonságával és kockázatértékelésével az ISO 12100 [15] foglalkozik, amely egy A típusú szabvány, amely az alapelveket tartalmazza [16]. A szabvány több lépést is tartalmaz, például a gépek korlátait, a lehetséges kockázatokat, azok azonosítását és értékelését [17]. A vállalatok különféle dokumentumokkal biztosítják a mechanikai, elektromos és ergonómiai biztonsági követelmények betartását. Erre a szabványban megtalálható MFMEA is használható [18]. A szakirodalomban erre több példa is van. A malajziai pálmaolajgyár kritikus berendezéseinek FMEA- és megbízhatósági elemzését végezték el, ahol a kockázatértékelés alapja a berendezés meghibásodásának gyakorisága volt [19]. A hibafa és az FMEA módszereket együtt alkalmazták a 3D nyomtató meghibásodásának kiküszöbölésére és a meghibásodások okainak feltárására [20].

Az MFMEA célja a lehetséges tervezési kockázatok megelőzése és azonosítása, a specifikációk meghatározásának és ellenőrzésének elősegítése. Az FMEA az értékelést is úgy végzi, hogy mindig az okok szintjéről kezdi a kockázatok felmérését. Nem határozza meg és nem értékeli az egyes szintek közötti összefüggéseket [21].

Az FMEA szubjektivitását több alkalommal próbálták mérni. Egy kutatás során két csapattal végeztették el ugyanazt a kockázatértékelést. Mindkét csapat szabadon megválaszthatta az értékeléshez használt skálát. Az értékelés eredménye inkonzisztens lett [22]. A hagyományos és egy fejlesztett FMEA módszertant is összehasonlítottak a konzisztenciát illetően, ahol a fejlesztett FMEA-n keresztül az FMEA módszertan gyengeségeit igyekeztek kiküszöbölni. Az eredmény alapján a hagyományos FMEA nem volt konzisztens, a továbbfejlesztett változat konzisztensebbnek bizonyult [23]. Egy másik kutatásban csoport-alapú FMEA-t javasoltak, ahol a csoportok tagjai közötti konszenzus elérésével a csoporttagok közötti heterogén hálózatokat vizsgálja azok bizonytalansága és hasonlósága szerint [24].

A szubjektivitás és a kockázati események közötti összefüggés-keresés hiánya mellett az FMEA másik korlátja lehet, hogy a skálák nem mindig kellően pontosak és egyértelműek, a kockázati tényezőket nehéz értékelni [25], aminek oka lehet a skála meghatározására vonatkozó követelmény hiánya az irodalmakban. Az FMEA útmutatóknak nincs különösebb elvárása a skálák minőségével kapcsolatban, ezért többféle skálát használnak:

- leíró skálák [26]
- példa skálák
- mérhető értékkel kiegészített skálák (pl. előfordulási valószínűség) [27]

A leíró skála nem elég pontos (számszerű) ahhoz, hogy kizárja a szubjektivitást. A skálák közötti átfedés túl nagy, ami megnehezíti a következetes értékelést. Az előfordulási és észlelési valószínűségeket megadó értékelési táblázatokban az adatok biztosítják, hogy a besorolások közötti változás százalékos értéke megadható legyen. Ez az érték azonban az S, O és D indexekből számított RPN miatt nem szerepel a szorzásban. A szubjektivitásra való lehetőség mellett az FMEA módszertan számos más hibája is feltárára került már a kutatásokban:

- Az S, O és D indexek relatív súlyát nem veszik figyelembe, hogy jobban értelmezhető RPN-eket kapjunk [28].
- Kis változás nagy eltérést okozhat az RPN-ben az S, O és D indexek szorzása miatt [29].

- A különböző FMEA csapattagok az osztályozás nehézségei és az univerzális skála hiánya miatt külön-külön eltérő eredménnyel értékelhetnek. Az egyik tag 5, a másik 6 súlyossági értéket adhat meg. A különböző értékelések közötti kapcsolatot nem veszik figyelembe [29].

2019-ben megjelent egy új FMEA kézikönyv, amelyben az RPN helyett akció prioritási számot (AP, Action Priority) határoztak meg. A különbség a végső értékelésben van, amely három kategóriából áll, magas (H), közepes (M) és alacsony (L), kategóriákból. Egy táblázatból kell kiválasztani a kockázatokhoz tartozó S, O és D értékek alapján, hogy a három kategóriából az adott kockázat melyikbe sorolható [30]. Ez az újítás kiküszöbölte azt a problémát, hogy az előző értékelés nem vette figyelembe a három tényező különböző súlyát. Ugyanis nem ugyanazt jelenti egy 9-es súlyossági érték, amelyhez egy 1-es észlelési valószínűségi érték tartozik, mint egy 9-es észlelési valószínűségi érték, amelyhez egy 1-es súlyossági érték tartozik. Ez azonban az RPN szám származtatása során nem hordozott a szorzat miatt különbséget [31]. Az új kézikönyv módosítása nem oldja meg azonban a szubjektivitásból és a skála minőségéből adódó problémákat, hiszen a kézikönyv az autóiipari beszállítói lánc tagjaira ad kötelező érvényt, nem alkalmazható egyértelműen egy más termék típust, vagy szolgáltatást forgalmazó szektorra. Így általános útmutatást nem nyújt.

A nem megfelelően megtervezett skála csökkentheti az értékelés objektivitását, amit különböző kutatások is alátámasztanak [32]. Az FMEA módszer Monte Carlo szimulációval való kombinációja sem biztosítja a szubjektivitás kiküszöbölését [33]. Egy másik kutatásban a súlyossági értékelést a hibaspecifikus bemeneti információk mennyiségének változtatásával végezték el. A vizsgálat eredményei azt mutatták, hogy a résztvevők megértését befolyásolta az információk elérhetősége, ezért a kockázati besorolás következetlenné vált [32]. A megfelelő skálát az AHP (Analytic Hierarchy Process) módszertan használatával választották ki egy másik értékelés során, továbbá javasolták az ezzel végezhető konzisztencia tesztet [34]. Más kutatások az R&R módszert alkalmazták az FMEA konzisztenciájának mérésére. Egy tanulmányban két különböző, de egyformán képzett csapat értékelte a kockázatokat. Az értékelés eredményében eltéréseket fedeztek fel [35]. Egy másik kutatásban a „life cost-based FMEA” alkalmazását javasolták olyan hiányosságok kiküszöbölésére, mint a költségek meghatározása, érzékenység vizsgálat, illetve a detektálhatósággal kapcsolatos többértelmű megfogalmazás[33].

Az FMEA-val kapcsolatos összegyűjtött hiányosságokat, melyek megoldására a kutatásom során koncentráltam az alábbi, 2. táblázat tartalmazza:



## 2. Táblázat: FMEA módszertan hiányosságai

---

1	Az FMEA értékelés szubjektivitása, mely inkonzisztens értékeléshez vezet [22]
2	Az FMEA faktorokat nehéz értékelni, így szükség van jól megfogalmazott skálákra [25]
3	Az FMEA S,O,D értékei ugyanazzal a súllyal szerepelnek az értékelésben [27]
4	A különböző csoporttagok az értékelés során különböző értékeket adhatnak, és a közöttük lévő kapcsolatokat nem veszik figyelembe [27]

---

Az AHP és az FMEA módszertan már többször is alkalmazásra került együtt különböző problémák vagy döntések megoldására. A legtöbb esetben az AHP módszertannal oldották meg a kockázatok rangsorolását, ezzel megoldást keresve az RPN számban rejlő bizonytalanságokra, minthogy ugyanazon RPN értékek súlya eltérő lehet. A COVID-19 járvány során a logisztikai ágazatokat nagy veszteség érte, ezeknek a felmérése, az okok keresésére pedig sikeresen alkalmazták együttesen a két módszert. A fuzzy-FMEA-t használták a kockázatok értékelésére, az AHP módszertant pedig a kockázati súlyok megadására [36]. Egy másik kutatásban szintén eredményesen alkalmazták a két módszert együttesen, az FMEA módszertant a hibák feltérképezésére és értékelésre, majd pedig az AHP módszertant a kockázatok súlyossági számának megadására [37]. Az FMEA módszertan hiányosságainak kiküszöbölése érdekében, mely az RPN számot érinti, az AHP módszertan szintén alkalmazásra került, amikor a kezdeti problémaválasztást priorizálták a tervezési folyamatokban [38].

Azonban nem csak a két módszertan együttes alkalmazása lehetséges. Kifejlesztésre került egy a páros összehasonlítást használó új kockázatértékelési módszer, a PC-FMEA. A módszer célja az értékelés bizonytalanságának és szubjektivitásának csökkentése páronkénti összehasonlítással. Az AHP módszertan a konzisztencia értékelésére is ad megoldást, ami szintén átvezetésre és átdolgozásra került a kifejlesztett módszertanban is. A páronkénti összehasonlítás az AHP-módszer alapskálájának testreszabott változatán alapul. A módszerrel tehát a páronkénti összehasonlítás eredményének konzisztenciája is értékelhető. Az FMEA csapat  $n(n-1)/2$  összehasonlítást végez el egy páronkénti összehasonlító mátrixban. Az értékeléshez a három szempontra a 3. táblázatban található skálát definiálták. A módszertan alapján a páros összehasonlítás kiértékelése a következőképpen történik.

A módszerben a páronkénti összehasonlításoknak tükrözniük kell az FMEA pontozásbeli különbségeit, mivel az  $i$ -edik és a  $j$ -edik hibamód összehasonlításakor

$$a_{i,j} = x_i - x_j .$$

Miután minden  $n = n_u + n_R$  kockázat összegyűjtésre került, az FMEA csapat  $n(n-1)/2$  összehasonlítást végez, hogy megkapja az  $a_{i,j}$   $i < j$  értékeket. Az értékeléshez használt mátrix többi értéke  $a_{j,i} = -a_{i,j}$  alakban kerül megadásra, ami a következő összehasonlító mátrixot eredményezi:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & a_{1,2} & \dots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & \dots & a_{i,j} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n,1} & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

A cél az, hogy megtaláljuk az értékelés során a  $w = [w_1, \dots, w_n]^T$  prioritáskészletet úgy, hogy  $a_{ij} = w_i - w_j$  megfeleljen az összehasonlításoknak. A módszer a következők alkalmazását javasolja:

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{i,j} \quad (8)$$

ami optimális megoldást ad az additív páronkénti összehasonlítási feladatra.

$$\min_w J(w) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (a_{i,j} - (w_i - w_j))^2 \quad (9)$$

A konzisztens értékeléshez az  $a_{i,j} = a_{i,k} + a_{k,j}$  tranzitivitásnak teljesülnie kell, így tehát az átlagos konzisztencia az összes hármásra, ha  $i$  és  $j$  rögzítettek:

$$e_{i,j} = a_{i,j} - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (a_{i,k} + a_{k,j}) \quad (10)$$

Feltételezve, hogy  $a_{k,j} = -a_{j,k}$  és  $w_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_{j,k}$ , az inkonzisztencia a közelítési hiba formájában fejezhető ki.

$$e_{i,j} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (a_{i,j} + a_{k,i} + a_{j,k}) = a_{i,j} - (w_i - w_j) \quad (11)$$

ami azt mutatja az adatok alapján, hogy a minimalizált célfüggvény  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n e_{i,j}^2$  eredménye közvetlenül reprezentálja az értékelések inkonzisztenciáját.

Ezzel a számítással pedig megadható a módszer által elvégzett értékelés inkonzisztencia szintje a következőképpen [39]:

$$RE(A) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n e_{i,j}^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{i,j}^2} \quad (12)$$

### 3. Táblázat: Skála a páros összehasonlításra alapuló FMEA értékeléshez [39]

$a_{i,j}$	Súlyosság	Előfordulás valószínűsége	Fellelhetőség valószínűsége
0	Ugyanolyan kritikus	Ugyanolyan gyakori	Ugyanannyira kimutatható
1	Kicsit kritikusabb	Kicsit gyakrabban	Kicsit kevésbé észlelhető
2	Mérsékelt kritikusabb	Mérsékelt gyakrabban	Mérsékelt kevésbé észlelhető
3	Kritikusabb	Gyakrabban	Kevésbé észlelhető
4	Erősen kritikusabb	Erősen gyakoribb	Erősen kevésbé észlelhető
5	Erősen (+) kritikus	Erősen gyakrabban (+).	Erősen kevésbé (-) észlelhető
6	Nagyon erősen kritikusabb	Nagyon erősen gyakoribb	Nagyon erősen kevésbé észlelhető
7	Nagyon erősen kritikusabb (+).	Nagyon erősen gyakrabban (+).	Nagyon erősen kevésbé (-) észlelhető
8	Rendkívül kritikusabb	Rendkívül gyakoribb	Rendkívül kevésbé észlelhető
9	Rendkívül kritikusabb (+).	Rendkívül gyakoribb (+).	Rendkívül kevésbé (-) észlelhető

#### 2.3 Ismételhetőségi és reprodukálhatósági vizsgálat

Az R&R a mérések megismételhetőségének és reprodukálhatóságának közös értékelésére szolgáló eljárás [40]. A mérőrendszer megfelelőségét az elvégzett vizsgálatok eredményeinek többszöri ingadozásával, elemeinek állandó (ismételhetőség) vagy változó (reprodukálhatóság) értékei mellett értékelik. Mindkét esetben az elvárások alapján azonosnak tekinthető értékek következetes előállítása a cél, a mérési rendszer robusztusságának biztosítása mellett [41]. Az R&R módszertant alkalmazták a gördülőcsapágyak rezgésének mérési rendszerének vizsgálatára [42]. A Gage R&R egy megfelelő módszer az iparban, hogy mérőrendszerek megfelelőségét határozzák meg. A mérés több résztvevőt foglal magába, akik többször is mérnek egy meghatározott jellemzőt. Ezt az elvet felhasználva került értékelésre egy koordináta mérőgép mérőrendszere [43].

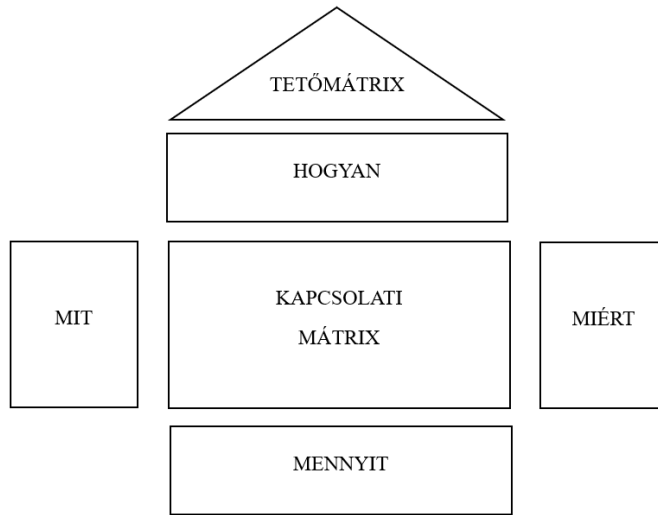
## 2.4 Minőségi módszerek lebontása (QFD) módszer

A módszert először a japán Yoi Akao ismertette 1977-ben. A QFD (Quality Function Deployment) módszertan célja a vevői igények megértése, és azok áttanszformálása a mérnökök által jobban megérthető műszaki paraméterekké. A módszertan tehát egy hidat képez a vevő és a fejlesztői csapat között. Mindemellett javaslatot tesz annak megvizsgálására is, hogy a vevő hogyan látja a mi termékünket a többi, piacon elérhető hasonló termékhez képest. A módszer első lépése a vevői hang megértése, az igények felmérése. A vevői követelményeket általában egy kérdőíven keresztül rangsoroltatjuk a vevőkkel, ezzel megkapjuk a „Mit akar a vevő?” kérdésre a választ. A vevői igényeket utána műszaki paraméterekké alakítjuk és értékeljük a vevői igények szerint. Megvizsgálásra kerül, hogy a műszaki követelmény és a vevői követelmény között van-e kapcsolat. Ezzel megadjuk a „Hogyan valósul meg?” kérdésre a választ. A kapcsolat értékelésére már több skálát is használtak, például 1-2-3 [44], 1-3-5 [45], 1-3-9 [46], 1-2-4, 1-6-9 [47]. Mindegyik az alacsony, közepes és magas összefüggést használja, ami a hagyományos QFD módszer része. Az eredményeket egy „házban” tároljuk, mely a HoQ (House of Quality), minőség háza. A ház közepe a kapcsolati mátrix, a ház jobb oldalán található a vevői értékelés eredményei. A ház tetején tudjuk továbbá megadni, hogy a műszaki paraméterek milyen hatást gyakorolnak egymásra. Ezután a műszaki követelmények értékeinek megadása következik, majd a műszaki jellemzők rangsorolása történik a piaci megítélés szerint. Meg kell vizsgálnunk, hogy a versenytársak termékeinek milyen tulajdonságai vannak, és a mi termékünk milyen tulajdonságokkal rendelkezik, ezzel megadjuk a „Miért?” kérdésre a választ. A műszaki paraméterek értékelése során megadjuk a műszaki paraméter fontossági számát, amellyel egy rangsort tudunk felállítani annak meghatározására, hogy mely műszaki paraméter fejlesztésére kell helyezni a hangsúlyt. Az értékeléshez a 15. képletet használja a módszer, mely a dolgozat 7.2-es fejezetében kerül bemutatásra. Az értékeléshez felhasználásra kerül a vevői értékelés prioritási száma, illetve a kapcsolati mátrixban található érték.

A minőség házában a sorok jelentik a vevők által megfogalmazott elvárásokat. Az oszlopok jelentik a meghatározott műszaki paramétereket. A kapcsolati mátrixba kerülnek a jelek, számok, amelyek a kapcsolatok erősségét adják meg. Amennyiben üres sor található a mátrixban, az kielégítetlen vevői elvárást jelent, melyre eddig még nem történt fejlesztés. Az üres oszlopok olyan műszaki paraméterek, amelyek semelyik elvárással nem függenek össze, vagy magától értetődő elvárások (Kano alapjellemezők) [48]. A QFD általában több fázisból áll,

mint tervezés, részletezés, folyamat és gyártás, és mindegyik fázisnak külön mátrixa van [49].

A lépéseket végig követve látható, hogy a lépések általánossága miatt a fejlesztés tárgya szabadon megválasztható. Az 1. ábra mutatja a minőség házát.



1. Ábra: Minőség háza [forrás: saját munka]

A módszernek azonban vannak korlátai is. A módszer használata nagy számú vevői igények és műszaki paraméterek esetén bonyolult és időigényes lehet. A sok paraméter miatt az emberi szubjektivitás is megnő, ami bizonytalanságokat okozhat. Ezenkívül a folyamat elsősorban kvalitatív. Gyakran kihívást jelent a paraméterek kategorizálása a „vevői igények” kétértelműsége és homályos természete miatt. [50]. A fontossági érték nincs egyértelműen meghatározva, illetve a negatív érték megadásának lehetősége a mátrixban sincs definiálva a módszertanban [51].

A QFD módszert azonban más módszerekkel párosítva több szempontból is fejlesztették, kiterjesztették. A QFD első lépése miatt, ami a vevői hang megértése, a QFD és az AHP módszertan több alkalommal is párosításra került a kutatásokban. Az AHP módszertan páros összehasonlításos értékelését alkalmazták a kérdőív kialakítására. Előnye, hogy ezzel a vevői értékelés szubjektivitása is értékelhető, mellyel kiszűrhető a bizonytalan válasz az értékelésből [52]. Emellett más alkalmazásokban is felhasználásra került a két módszer, mint abban a tanulmányban, ahol a QFD-t és az AHP-t integrálták az autóipar beszállítóinak kiválasztásához. A QFD-t arra használták, hogy a követelményeket több értékelési tényezővé alakítsák át, az AHP-t pedig ezen értékelési tényezők fontosságának meghatározására [53]. Egy másik alkalmazásban a QFD-vel adták meg a kritériumok fontossági súlyait, a beszállítókat pedig az AHP-val értékelték és hasonlították össze [54]. Egy új koncepció kidolgozásakor egy iteratív AHP-QFD-AHP módszert is elvégeztek az ötletelés során. Ezt a két módszert alkalmazták a

kreatív gondolkodáshoz [55]. Egy másik alkalmazásban integrált AHP és QFD megközelítést javasoltak a legmegfelelőbb kibocsátáscsökkentési technológia kiválasztására. Mindkét módszert alkalmazták a technológiák rangsorolására [56]. Annak meghatározására, hogy az orvosok milyen preferenciákat választanak a gyógyszerek felírása során Bangladesben, az AHP-t használták a kritériumok súlyozására, a QFD-t pedig a technikai szempontok rangsorolására [57]. A szakirodalomból látható, hogy ez a két módszer együtt jól alkalmazható különböző területeken [58]. Használatuk azonban megköveteli a módszerek részleteinek teljes ismeretét, ami bonyolultabb, hosszabb alkalmazási időt eredményezhet. A QFD és ANP (Analytic Network Process) módszerek együttesen szintén alkalmazhatók a vevői igények rangsorolására és a fejlesztési célok kijelölésére [59] [60] [61]. A Kano-modell is párosításra került a QFD módszerrel, ahol a Kano segíthet a vásárlói igények megértésében, és a QFD módszer bemeneteként szolgálhat [62]. Továbbá a QFD, a Kano és a fuzzy AHP integrációját is alkalmazták a termék-szolgáltatás rendszerekben. Ezenkívül a Kano modellt használták a vásárlói igények szűrésére, a fuzzy AHP-t pedig a paraméterek és azok bizonytalanságának értékelésére [63]. A QFD módszertan fejlesztése nem csak más módszerek bevonásával és együttes alkalmazásával lehetséges. A módszer számos módon került önmagában is fejlesztésre. A módszer önmagában való fejlesztésének egyik iránya a termékjellemzők abszolút és relatív súlyának tisztázásával valósult meg [64].

A vevői igények kétértelmű jellegének kiküszöbölésére a fuzzy QFD a QFD módszer széles körben használt típusa [65]. A fuzzy QFD alkalmazásával fuzzy súlyok határozhatók meg a műszaki paraméterekhez [66].

Ezek a fejlesztések azonban nem oldják meg a QFD mátrixok összetettségének problémáját, a negatív értékek alkalmazhatóságának hiányát a módszertanban. Továbbá a végső képlet, melyben a műszaki paraméterek súlya adható meg, szintén nem került fejlesztésre a műszaki paraméterek közötti kapcsolat megadásával. A módszertan bár javaslatot tesz a műszaki paraméterek közötti kapcsolatok értékelésére, de a műszaki paraméterek fontossági számának értékelésekor nem vonja azt be az értékelésbe.

A QFD módszertan számos esetben került alkalmazásra a CNC gépek fejlesztése során. A módszer előnye a többi döntéselőkészítő módszerhez képest, hogy a vevői hangot is figyelembe veszi, ezért a CNC esztergaközpontok kiválasztásánál is ezt a módszert használták eredményesen [67]. A DEMATEL, ISM és QFD módszerek kombinációjának használatával a CNC gépek elérhetőségét fejlesztették. A DEMATEL a CNC szerszám gép hibakorrelációs komponensei közötti kölcsönhatás mértékének elemzésére volt használva. Emellett a hierarchikus

szerkezeti modellt az ISM-módszer integrálásával állították össze, és meghatározták a hibakorrelációs komponensek kölcsönös hatását és logikai struktúráját. Harmadszor bemutatták a QFD elemzési modellt. A CNC szerszámgépek felhasználói rendelkezésre állásának javítása érdekében a DEMATEL, interpretive structuring model és a QFD módszertan együttesen alkalmazták. A CNC gépek rendelkezésre állásának követelménycsaládjai összeállításra kerültek a QFD részeként [68].

## 2.5 Hálózatelmélet

A hálózat kutatás módszertana, azaz a hálózatelemzés már sok területen elterjedt, de a minőségirányításban csak kevés területen alkalmazták. A hálózat kutatás alapjai már le lettek fektetve, és az alapvető hálózati módszerek és tulajdonságok is meghatározásra kerültek, mely Barabási Albert László magyar származású kutató nevéhez fűződik [69]. Emellett a minőségi hálózatok alapjait is lefektették [70].

Ha szeretnénk megérteni egy komplex rendszert, akkor meg kell ismernünk azok alkotórészei közötti kapcsolatokat, kölcsönhatásokat, melyre a hálózat kutatás adhat segítséget. A hálózat elemeit csúcsoknak vagy csomópontoknak szokás nevezni, a közöttük lévő kapcsolatot pedig éleknek. Ezek az élek a kapcsolat jellege szerint lehetnek irányított, vagy irányítatlan élek. Az élek ezen tulajdonsága alapján megkülönböztethetünk irányított vagy irányítatlan hálózatokat. A csomópontok és az élek együttese adja a gráfot, vagyis a hálózatot [71]. Ha komplex, bonyolult rendszereket így képzelünk el, akkor az segíthet azok megértésében és elemzésében. Amennyiben minden csomópont között létezik kapcsolat, azt teljes gráfnak nevezzük. Ha irányított hálózatról beszélünk, akkor megadhatjuk a csomópontok be-fokszámát és ki-fokszámát, ahol a fokszám az élek, kapcsolatok számát jelentik egy csomópont esetében. Léteznek azonban súlyozott hálózatok is, ahol a kapcsolatoknak van valamekkora súlya [72]. Az irányított hálózatokból kinyerhető kettő alábbi mutatót szeretném kiemelni, melyet kutatásaim során többször is alkalmaztam:

- Be-fokszám: Irányított gráfban a  $k_i^{be}$  a kiválasztott csúcsra mutató élek számát jelenti, ahol  $k_i$  az  $i$ -edik pont fokszáma;
- Ki-fokszám: Irányított gráfban a  $k_i^{ki}$  a kiválasztott csúcsból más csúcsokba mutató élek számát jelenti, ahol  $k_i$  az  $i$ -edik pont fokszáma [72];
- PageRank: olyan algoritmus, amely meghatározza egy csúcs fontosságát a hálózatban. Az algoritmus azon alapul, hogy megvizsgálja, hogy a csúcsnak hány kapcsolata van, és azon kapcsolatok mennyire fontosak. Ennek értékéből származtatja a PageRank mutatót [73].

A minőségügyi hálózatokban az élek alapján 3 féle típusú hálózatot különböztettek meg, az áramlás, az attribútum és a preferencia típusú hálózatokat. A preferencia típusú hálózatban az élek, kapcsolatok, a csúcsok által valamilyen szempont szerint kijelölt csúcsokhoz kapcsolódnak. A kapcsolat tehát egy szempont szerinti preferenciát jelent. A 4. táblázatban a preferencia típusú hálózatok jellemzői kerülnek bemutatásra, melyekkel a kutatási munkálataim során én is dolgoztam [74].

#### 4. Táblázat: A preferencia hálózatban az élek tulajdonságai [74]

Preferencia típusú él definíciója	Él irányítottsága	Él súlya	Él előjele	Párhuzamos vagy többszörös él
Valamilyen szempont szerinti csúcsválasztás	A kezdő pont a kiválasztó csúcs, a végpont a kiválasztott csúcs. Lehet kétirányú él is, ha a preferencia mindkét irányba igaz.	A preferencia erőssége egy skálán mérve.	Megkülönböztethető a pozitív és a negatív választás az előjelek megadásával.	Ezek összegzését érdemes elvégezni.

Az élek csoportosítása mellett a csúcsok szerint is tudunk csoportosítást elvégezni. A csomópontok lehetnek esemény, kompetencia és erőforrás típusúak. Az esemény csomópontok valamilyen folyamatot írnak le, a kompetencia csúcsok valamilyen tulajdonságot, készséget, képességet, az erőforrás csúcsok pedig lehetnek gépek vagy például emberek [74].

A hálózatkutatókat a minőségüggyel kapcsolatban álló területeken és témákban a következők szerint alkalmazták a kutatásokban. A termékfejlesztési folyamatot komplex hálózatként modellezték, ahol a termékfejlesztési modellezés célja a jellemzési elemzések fokozása volt a cél [75]. A hálózatokat az ügyfelek véleményének megértésére is használták. A közösségi hálózatokat a kereslet sűrűségének és a termékjellemzők központi szerepének értékelése céljából vizsgálták [76]. A PageRank algoritmust és a QFD módszert együttesen alkalmazták a termékszolgáltatás-orientált tervezések befolyásoló tervezési tényezőinek azonosítására. Az optimális alternatívát ezután a PageRank mutatóval választották ki [77]. Ezen túlmenően a PageRank algoritmust használták a követelmények rangsorolásánál is. Ezt a módszert azért alkalmazták, mert a kapcsolatok közötti függőséget is figyelembe kellett venni a prioritások kialakításakor [78]. Ezenkívül többdimenziós hálózatelemzést alkalmaztak a



vásárlói preferenciák modellezésére és a tervezési döntések támogatására. Kétféle réteget hoztak létre, egyet a vevőknek és egyet a termékeknek. A két réteg közötti kölcsönhatásokat a hálózat vonatkozásában vizsgálták [79]. Egy másik kutatási projektben a gyártási hálózat stratégiáját és a QFD módszertant együtt alkalmazták, de a hálózat kutatás előnyeit nem aknázták ki [80]. A QFD módszertan további hátránya, hogy csak egyrétegű értékelést tud, és nem képes kezelni az egyéni kettősséget. Ennek a hiányosságnak a megoldására egy többrétegű QFD módszertant vezettek be, ahol a különböző érdekelt felek igényei is értékelhetők [81]. A módszert a Kansai International Airport szolgáltatásminőségmenedzsmentjében is alkalmazták. A HoQ értékelésére három réteget határoztak meg: utasigények, légitársasági követelmények és műszaki intézkedések. [82]. A többrétegű QFD-t a rövid távú tengeri szállítás minőségének felmérésére is kiválasztották és eredményesen alkalmazták [83]. A tajvani szabadkereskedelmi kikötői zóna szolgáltatásminőségének javítása a többrétegű QFD másik alkalmazása, ahol az ügyfelek és a szolgáltató hangja is átalakult HoQ-vá [84]. A QFD módszertant hálózati áramlási problémaként is megfogalmazták kettős céllal. Maximalizálják a vevői igények kielégítésének előnyeit lineáris optimalizálással, vagy minimalizálják a műveletek összköltségét, miközben továbbra is kielégíti az ügyfelek igényeit a minimális költségáramlás megközelítés hozzárendelésével. Továbbá a QFD hipergráfként jelenik meg, amely lehetővé teszi a kapcsolati és korrelációs mátrix interakcióinak hatékony ábrázolását, valamint a lényeges tényezők meghatározását a centralitási metrikák alapján [85].

Az irodalomkutatás során a QFD módszer fejlesztése hálózatokkal többször is előkerült, mely szintén azt bizonyítja, hogy a módszer fejlesztésére és használatára megvan az igény, és struktúrája miatt hálózatokkal könnyen fejleszthető és kiterjeszhető.

Az FMEA módszertan hálózatkutatással történő fejlesztéséről is elvégeztem az irodalomkutatást, mely alapján a következő eredményekre jutottam. Az egyik fejlesztés során egy hibahálózatot fejlesztettek ki a jobb vizualizáció és a több rendszerszint közötti bonyolult hibaterjedési mechanizmusok megértése érdekében [86]. Az APIS által kifejlesztett IQ-RM szoftver a hibahálózatok és a funkcióhálóok megjelenítését is tartalmazza, hogy jobban megértsük az összetevők és meghibásodásaik kapcsolatait. A módszer használatának a része, hogy a felhasználó összeköti az ok-okozati, illetve funkcionális kapcsolatok alapján a funkciókat, illetve a kockázatokat. Ebben az értelmezésben a kapcsolatok irányítatlanok és csak a kapcsolatok vizualizálására és a következmény-ok utak létrehozására alkalmasak az RPN vagy AP értékelés elvégzéséhez [87]. A kockázatértékelést és a közösségi hálózatok elemzését együtt alkalmazták,

nevezetesen a Fuzzy kockázatelemzésben (FCRA) [88]. A hálózat karakter-alapú hálózatát (NoN) is alkalmazták a veszélyek kritikus jellemzőinek azonosítására, hogy segítsék a biztonsági ellenőrök irányítását [89]. Egy nemrégiben készült tanulmány egy intelligens módszert mutatott be, amely a hibafa elemzést és a fuzzy neurális hálózatokat kombinálta. A hibafa elemzés bemutatta a hibák logikai struktúráját, és a fuzzy neurális hálózatok segítségével tanítják meg a hibatüneteket és hibák közötti kapcsolatleképezést [90]. A kínai széntelepek földalatti bányászata során fellépő szén- és gázkitörések lehetséges kudarcának előrejelzésére a Hibafa-elemzést (FTA) és a mesterséges neurális hálózatot (ANN) együtt használták. A modell eredménye egy új módszert kínál a lehetséges kockázatok megelőzésére [91]. Továbbá a Fuzzy-alapú Bayes-hálózatot, az FMEA-t és a Best Worst módszert kombinálták, hogy kiküszöböljék az FMEA korlátait, mint például a szubjektivitás, a kockázati paraméterek súlyértékeinek hiánya, valamint a hibaesemények közötti feltételesség figyelmen kívül hagyása [92]. Egy másik tanulmány integrált megközelítést dolgozott ki a kockázati összefüggések azonosítására, figyelembe véve az ügyfelek igényeit és a meghibásodási módok közötti hibaok-okozati összefüggéseket (FCR). Először egy QFD-t hoztak létre, amely jellemzi az ügyfelek igényeit a fuzzy értékelés alapján. Másodsor, a termékkomponensek közötti és azokon belüli FCR-eket irányított hálózati modellel írták le. Ebben a hálózatban a hibamódok csúcspontként, a meghibásodási módok közötti oksági kapcsolatok pedig irányított élekként vannak modellezve. Az irányított élek értékeit súlyozott kockázati prioritási számok jellemzik, a kockázati tényezők súlyát pedig nemlineáris programozási modell optimalizálja. Ezután a termékkomponensek közötti és azon belüli meghibásodási módok közötti interaktív kapcsolatokat a belső hibahatás és a külső hibahatás jellemzi [93]. Ezek a tanulmányok az FMEA módszertan számos hiányosságának orvosolása érdekében jöttek létre. A kutatásokból látható, hogy az FMEA módszertanban értékelt kockázatok hálózatos ábrázolása, és értékelése már több alkalommal felmerült.

## **2.6 Minőség 4.0**

A Minőség 4.0 megjelenésével, fontosságával több új tanulmány is foglalkozik. Az Ipar 4.0 következménye, hogy rengeteg adat áll rendelkezésre, amelyet értékelni, analizálni kell. A régi minőségügyi módszerek nem képesek arra, hogy ekkora adathalmazt feldolgozzanak, hiszen azok kitöltése sok esetben még mindig manuálisan és nem pedig automatizálva történik. Ezek tehát nem integrálhatók az Ipar 4.0 környezetébe. A módszerek használata azonban fontos, a Quality 4.0 megjelenésére és fejlesztésére megvan az igény, hiszen ezek csökkentik a minőségköltségeket, növelik a vevői elégedettséget, fejlesztik a termék minőséget

[94]. A Quality 4.0 empirikus tanuláson és empirikus tudásfeltáráson, valamint valós idejű adatgeneráláson, adatgyűjtésen és adatelemzésen alapul annak érdekében, hogy intelligens működési döntéseket hozzunk meg [95]. Egy megjelent tanulmány a QFD módszertant használja a Minőség 4.0 bevezetésére. Néhány javítandó minőségi célkitűzést fogalmaztak meg az esettanulmány végén, mint a stabil minőség, a berendezések megbízhatósága, a vevői elégedettség és a termékkel kapcsolatos panaszok. A tanulmány során azonban a QFD módszer jelenlegi felépítésének aktualitása a Minőség 4.0 szempontjából nem került elő [96]. A Minőség 4.0 bevezetésének 7 kulcs tényezője is meghatározásra került, melyek a következők:

- big data kezelése,
- Minőség 4.0 használata a hatékony vertikális, vízszintes és végpontok közötti integrációhoz,
- Minőség 4.0 használata a stratégiai előny érdekében,
- vezetői szerep,
- oktatások,
- szervezeti kultúra illesztése a Minőség 4.0-hoz,
- felsővezetői támogatás [97].

A minőségi modellek és gyakorlatok számos fejlődési lépésen mentek keresztül a modern történelem során – az ellenőrzéstől a minőségbiztosításon és a minőségirányításon át a tervezési minőségig. Ezek a minőségi modellek próbálják követni az Ipar 4.0 fejlődését és forradalmát. Úgy tűnik azonban, hogy az elmúlt néhány évben a fejlődés megtorpant, nagyon kevés innovatív minőségi modellt javasolnak, a vállalatok és szervezetek minőségügyi szakemberei nyilvánvalóan elvesztették vezető pozíciójukat. Emellett az új és innovatív minőségi modellek kutatásából is kevesebb volt az elmúlt néhány évben. A negyedik ipari forradalom lehetőség arra, hogy a minőségügyi mozgalom vezető erővé váljon ebben a fejlődésben [98].

Az irodalomkutatás során nem kerültek elő olyan eredmények, amelyekben a jelenlegi, legtöbbször használt minőségügyi módszerek fejlesztését a minőség 4.0 szempontjából támasztották volna alá. Azon módszerek fejlesztésére azonban, amelyek tudják kezelni a nagy adathalmazokat, az igény minden tanulmányban megjelenik.

### **3. Célkitűzések és motiváció**

A nemzetközi irodalom feldolgozása és elemzése alapján megfogalmaztam azokat a kutatási célokat, amelyek mentén a módszerek fejlesztésre kerültek. A kutatás motivációját az iparban eltöltött munkám során a módszerek használatával megszerzett tapasztalat adta, illetve a hálózat kutatás és a minőségirányítás közös alkalmazásának kiaknázatlan lehetőségei. Munkám során FMEA moderátorként többször is találkoztam azzal a problémával, hogy az értékelés nagyon szubjektív tud lenni még úgy is, hogy az autóiipari FMEA-ban a tényezők értékelésére részletesen kidolgozott skála elérhető. A kockázatértékelést az IQ-RM programban végeztük, amely hálózatosan ábrázolta a BoM (alkatrészlista) szerinti alkatrész, funkció és kockázat rendszert. A programban azonban csak a kapcsolatok jelölésére szolgálnak a hálózatok, azok elemzése nem történik meg. A páros összehasonlításos kérdőívek hálózatos kiértékelését már a doktori munka előtt megkezdtem, mely munkámat annak kiaknázatlan lehetőségei és már megfogalmazott fejlesztési lehetőségei miatt folytattam. A kiválasztott módszerek a kutatásban tehát az FMEA, AHP és QFD módszerek. A módszerek kiválasztásánál szempont volt – a korábbiakban említettek szerint – azok használatának gyakorisága, összetettsége, modellezhetősége, egymással való kombinálhatósága. Az irodalomkutatás során alátámasztásra került, hogy ezek a módszerek egymással jól kombinálhatók, azok együttes alkalmazására több példa is van.

#### **3.1 Az alapprobléma megfogalmazása**

Alapproblémaként két terület került megfogalmazásra a kutatás kezdetekor. Az egyik, ami a kutatás nagyobb szeletét fedte le, hogy az iparban használt minőségügyi módszerek régóta nem kerültek úgy fejlesztésre, hogy azok az ipari alkalmazásba is átkerüljenek. Ennek oka, hogy az irodalomban megtalálható módszerek nagy része bonyolult, azok használatához olyan tudás kell, amely az ipari vállalatok számára nem megfizethető, beleértve a hozzájuk tartozó szoftvereket is. Sok esetben programozási tudás nélkül a módszerek alkalmazásának megértése nem egyszerű. A gyártási technológia, adatgyűjtés, elemzés, tanulási módszertanok ezzel szemben olyan mértékben fejlődnek, amit nyomon követni is nehéz, egymást váltja az Ipar 4.0 és az 5.0. A minőségügyi módszerek ilyen jellegű fejlesztése a gyakorlati felhasználás szempontjából azonban az évtizedek során elmaradt. A használt módszerek vizualizációja, összetettsége messze elmarad a gyártó rendszerek optimalizálásra szolgáló módszerektől.

További problémaként került megfogalmazásra, hogy az FMEA értékelés szubjektivitását növelheti, hogy az irodalomban nincs elegendő ajánlás arra vonatkozóan, hogy az értékeléshez milyen skálát érdemes használni. A kutatás kezdetén a feltételezésem az volt, hogy az értékeléshez használt skálák és azok bizonytalanságai befolyásolják az értékelés pontosságát. Nem mindegy tehát, hogy az értékeléshez milyen skálát használunk fel.

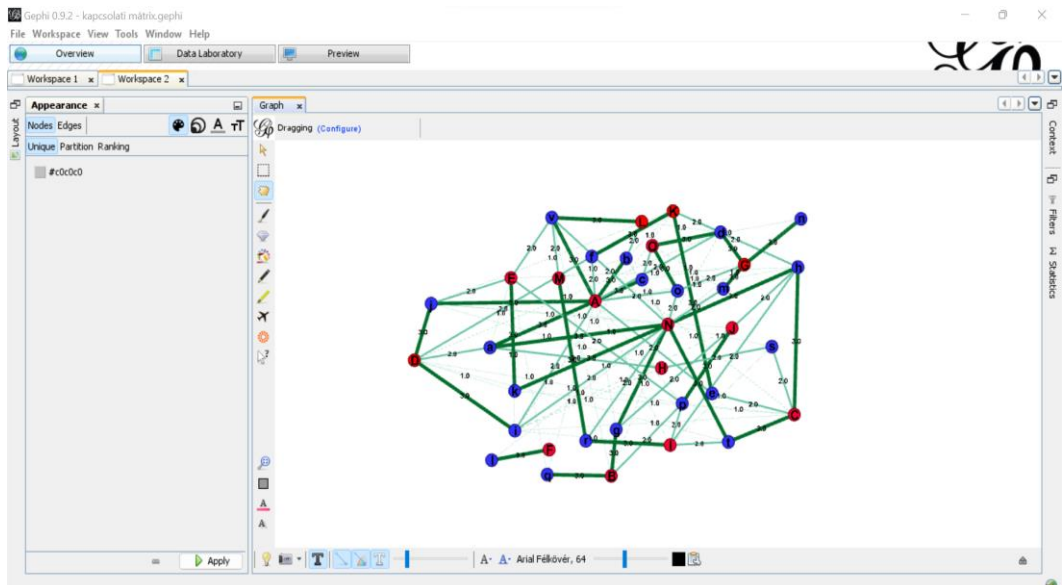
### **3.2 Célkitűzések megfogalmazása**

A jelen disszertációban bemutatott munkák célja néhány, az ipari gyakorlatban gyakran használt minőségügyi módszerek fejlesztése, azok hibáinak, hiányosságainak kiküszöbölése és amennyiben lehetséges, azok fejlesztése a hálózatkutatás eszköztárával. A cél annak megvizsgálása, hogy ezen módszerek modellezhetőek-e hálózatokkal, és ha igen, a hálózatkutatás mutatóit használva milyen új eredményeket kapunk. Továbbá létrehozható-e ezáltal egy olyan új módszer, amely a jelenlegi, gyorsan fejlődő digitális világba könnyen adaptálható és mindemellett könnyen megérthető és alkalmazható. A kutatás másik felének a célja pedig, hogy bebizonyítsam, hogy az FMEA értékelés során használt skála befolyásolja az értékelés bizonytalanságát, így célszerű további kutatásokat folytatni annak érdekében, hogy iránymutatást adjunk a skálák kiválasztásához és kialakításához.

## 4. A kutatáshoz használt program

A hálózatkutatásban alkalmazható programok száma magas, az igényeink szerint kiválaszthatjuk a számunkra megfelelő módszert. Kutatásom további szakaszában a hálózatkutatás modellezéséhez a Gephi programot választottam ki és használtam. Azért erre a programra esett a választásom, mert ingyenesen elérhető és letölthető. Használata nem bonyolult, és az Interneten elérhető oktató anyagok száma is igen magas. A vizualizálás a módszerrel látványos, könnyen exportálhatóak az adatok a programból. Az eszköz bármilyen típusú hálózat kiértékelésére és vizualizálására alkalmas. A hálózatok elkészítéséhez az adatokat Excel táblázatból tudjuk importálni. Az adatok megadásánál fontos a sorrend, az első oszlopba kerülnek a kiinduló csomópontok értékei, a második pontba a cél csomópont értékei, a harmadik oszlopba pedig a kapcsolat súlya.

A 2. ábrán látható, hogyan lehet konfigurálni a hálózatokat. Meg lehet adni, milyen színnel jelenjenek meg a csomópontok és az élek, továbbá a színek intenzitása meg tudja határozni például a csomópontok egy tulajdonságának az erősségét. Az élek vastagságával vagy a színintenzitásával pedig az élek súlyának nagyságát lehet ábrázolni. A csomópontok elnevezését is meg lehet adni szövegesen egy-egy betűvel, de akár szavakkal, leírásokkal is.



2. Ábra: A Gephi programban a hálózatok szerkesztéséhez használt nézet.

A vizualizálás mellett a program másik előnye, hogy az általunk kiválasztott adatokat táblázatosan is megadja. A táblázatban szereplő adatok könnyen exportálhatók Excel táblázatba, hogy további számításokat végezhessünk el rajtuk. Az adatokat bemutató táblázat a 3. ábrán látható.

Gephi 0.9.2 - kapcsolati mátrix.gephi

File Workspace View Tools Window Help

Overview Data Laboratory Preview

Workspace 1 x Workspace 2 x

Data Table x

Nodes Edges Configuration Add node Add edge Search/Replace Import Spreadsheet Export table More actions Filter: Id

Id	Label	Interval	Degree	Weighted D...	Eccentricity	Closeness Cen...	Harmonic Closeness Ce...	Betweenness Cen...	Modularity ...	PageRank	Compone...	Clustering Coef...	Number of tria...	Eigenvector Cen...
A	A		14	29.0	4.0	0.538462	0.659524	0.179044	1	0.068307	0	0.0	0	0.927063
a	a		5	11.0	3.0	0.466667	0.52381	0.023394	4	0.027646	0	0.0	0	0.48299
b	b		5	8.0	3.0	0.466667	0.52381	0.038234	1	0.021862	0	0.0	0	0.402984
c	c		4	7.0	3.0	0.454545	0.504762	0.021705	1	0.019165	0	0.0	0	0.350253
d	d		7	13.0	3.0	0.492958	0.561905	0.072661	6	0.032914	0	0.0	0	0.534114
e	e		3	7.0	5.0	0.393258	0.453333	0.004422	0	0.018833	0	0.0	0	0.276804
f	f		4	8.0	5.0	0.402299	0.472381	0.007786	0	0.020837	0	0.0	0	0.357699
g	g		4	9.0	3.0	0.454545	0.504762	0.017939	2	0.023782	0	0.0	0	0.376628
h	h		7	14.0	3.0	0.492958	0.561905	0.043291	3	0.033978	0	0.0	0	0.630669
i	i		9	13.0	3.0	0.522388	0.6	0.072543	4	0.031812	0	0.0	0	0.755542
j	j		7	12.0	3.0	0.492958	0.561905	0.044496	4	0.029541	0	0.0	0	0.612944
o	o		5	10.0	3.0	0.466667	0.52381	0.037617	6	0.026188	0	0.0	0	0.394366
p	p		7	12.0	5.0	0.443038	0.536667	0.037145	2	0.030283	0	0.0	0	0.540676
q	q		3	5.0	5.0	0.376344	0.439048	0.004841	2	0.015272	0	0.0	0	0.259086
v	v		7	14.0	3.0	0.492958	0.561905	0.071246	1	0.035591	0	0.0	0	0.527864
B	B		5	10.0	4.0	0.402299	0.47381	0.017768	2	0.027389	0	0.0	0	0.301128
C	C		8	14.0	4.0	0.411765	0.516667	0.038868	3	0.035221	0	0.0	0	0.516897
k	k		4	8.0	3.0	0.454545	0.504762	0.0134	4	0.020971	0	0.0	0	0.381413
s	s		4	6.0	4.0	0.443038	0.497619	0.01696	3	0.017694	0	0.0	0	0.329721
t	t		4	9.0	4.0	0.443038	0.497619	0.01347	3	0.023242	0	0.0	0	0.366638
b	b		5	11.0	3.0	0.466667	0.52381	0.023394	4	0.027646	0	0.0	0	0.48299

Add column Merge columns Delete column Clear column Copy data to other column Fill column with a value Duplicate column Create a boolean column from regex match Create column with list of regex matching groups Negate boolean values Convert column to dynamic

3. Ábra: A hálózatból kinyerhető adatok táblázatos nézete a Gephi programban (0.9.2-es verzió).

## 5. Az FMEA értékeléshez használt skála bizonytalansága

Ebben a fejezetben kerül bemutatásra az a kutatási terület, melynek célja, hogy megvizsgálja, az FMEA értékelés során a skála kialakítása hogyan befolyásolja az értékelés bizonytalanságát. Ennek érdekében az FMEA-t a kockázatértékelés „mérőrendszerének” tekintetem, amelynek elemei és jellemzői jelentősen befolyásolják a vizsgálat eredményét. Mint minden mérési rendszerben, itt is különbséget kell tenni a mérendő tárgy (kockázat), a mérőeszköz (FMEA), a mérési módszer (értékelő skálák), a mérést végző személy (értékelő) és a környezet között (értékelések között eltelt idő, értékeléshez használt program). Az ismételhetőség a mérés során azt jelenti, hogy ugyanazon a tételen az egymást követő méréseknek ugyanazt az eredményt kell adniuk, ha a mérési rendszer összes többi változója azonos. A reprodukálhatóság azt jelenti, hogy ugyanazon a tételen az egymást követő mérések ugyanazt az eredményt adják, ha a mérési rendszerben egy másik változó, általában a mérést végző személy megváltozik. A stabilitás egy megadott időtartamon belül a mérési rendszer változása. A linearitás megadja, hogy a mért értékek a valós érték körül mennyire szóródnak ez tehát, a mérési hibák egyezőségének vizsgálata. A pontosság a mérőeszköz mérési bizonytalansága. Minél kisebb ez a bizonytalanság, annál pontosabb a mérőeszközünk [99].

Az elvárásoknak való megfelelést a mérési rendszer összes változója befolyásolja. Kutatásom célja annak vizsgálata, hogy az FMEA, illetve a módszer, mint mérési rendszer esetében az elvárások hogyan értelmezhetők, mely változó befolyásolja, hogy mennyire felel meg a kockázatértékelés kimenetelével kapcsolatos kritériumoknak. A kutatásom során a kockázati tényezők értékelésére használt skála hatását vizsgáltam az FMEA reprodukálhatóságra.

A negyedik ipari forradalom idején a vevők termékgyártással kapcsolatos igényei jelentősen megváltoztak. A változás legfontosabb eleme, hogy a vevői igények ciklikus, sok esetben szélsőséges változásai a termék teljes tervezési és gyártástervezési folyamatában megfigyelhetők. A termékeket előállító vállalatoknak kellő rugalmassággal kell reagálniuk a vevői igények termékgyártási folyamata során generált gyakori változásaira, hogy sikeres piaci szereplők maradjanak. Ezek az új igények adták az alapot a digitális gyártástudomány létrejöttéhez, melynek egyik fő pillére a digitális gyártási rendszerre épülő tervezés és gyártástervezés. A digitális gyártási rendszer alap gondolata, hogy a vevői igényeket kielégítő termékeket előállító vállalatok és gyártószövetségek együtt dolgoznak, egymástól időben és térben függetlenek, és a gyártószövetség tagjai között digitális környezetben az információáramlás a következő: igények, koncepcionális tervek, anyagszükségletek, tervezési és gyártási tervezés virtuális környezetben, valamint szimuláció [100]. Tekintettel a témakör fontosságára, a



kockázatértékelés a digitális gyártási rendszeren alapuló tervezés kockázataira összpontosít.

## **5.1 Alapprobléma, a skála bizonytalansága**

Alapproblémaként került megfogalmazásra, hogy a kockázatértékelés során használt skála befolyásolhatja az értékelés bizonytalanságát. Ennek megvizsgálására és igazolására egy kísérletet végeztünk el, ahol különböző skálák használata során vizsgáltuk a bizonytalanságot.

A hipotézis bebizonyítására egy 6 fős FMEA csapatot hoztam létre, akik a digitális gyártási rendszeren alapuló tervezés szakértői. Az értékeléshez 17 kockázatot azonosítottam, amelyeket a 6. táblázat mutatja. Az értékeléshez három skálát fejlesztettem ki. Egy arányskála, amely az egyes kockázatok előfordulásának valószínűségét mutatja százalékban. Egy, numerikus értékek nélküli leíró skála és egy, páronkénti összehasonlításra szolgáló skála, amely az AHP módszertani skála módosított változata. Mindhárom skála 1-től 7-ig terjed, a 0 pedig az azonos előfordulási valószínűséget jelenti a páronkénti összehasonlításban. A kockázatértékelés során a résztvevőknek meg kellett becsülniük a kockázatok bekövetkezésének valószínűségét az előre definiált skálákon, az értékelés egy alkalommal lett végrehajtva. Az értékeléshez használt skálák az 5. táblázatban láthatók. A kockázatok előfordulásának becslésére a három skála szerint három kérdőív készült, amelyeket több hetes különbséggel töltöttek ki, így biztosítva, hogy a csoport tagjai ne emlékezzenek korábbi válaszaikra. A kérdőívet a kitöltés után pedig már nem tudták újból megtekinteni és szerkeszteni. Az értékelés során a résztvevőket arról is megkérdeztem, hogy mennyi ideig tartott a módszerrel végzett értékelés, és mennyire volt nehéz annak alkalmazása. A kockázatértékelést a résztvevők külön-külön végezték el nem csoportosan, hogy saját magukhoz képest is mérhessem a pontosságot.

**5. Táblázat: A kockázatértékeléshez használt előfordulási valószínűséget megadó skálák.**

Előfordulási skála (százalékok)		Előfordulási skála (leíró)		Előfordulási (páros összehasonlítás)	
				<b>0</b>	Ugyanolyan gyakori
<b>1</b>	O=0%	<b>1</b>	Az előfordulás valószínűsége csekély	<b>1</b>	Kicsit gyakrabban
<b>2</b>	0%<O<=20%	<b>2</b>	Az előfordulás valószínűsége kicsi	<b>2</b>	Mérsékelten gyakrabban
<b>3</b>	20%<O<=40%	<b>3</b>	Az előfordulás valószínűsége mérsékelt	<b>3</b>	Gyakrabban
<b>4</b>	40%<O<=60%	<b>4</b>	Az előfordulás valószínűsége közepes	<b>4</b>	Erősen gyakoribb
<b>5</b>	60%<O<=80%	<b>5</b>	Az előfordulás valószínűsége általános	<b>5</b>	Nagyon erősen gyakoribb
<b>6</b>	80%<O<100%	<b>6</b>	Az előfordulás valószínűsége nagyon gyakori	<b>6</b>	Rendkívül gyakoribb
<b>7</b>	O=100%	<b>7</b>	Az előfordulás valószínűsége nagy	<b>7</b>	Rendkívül gyakoribb (+).

**6. Táblázat: Azonosított kockázatok az értékeléshez és azok azonosító számai.**

<b>Id</b>	<b>Meghatározott kockázatok</b>
<b>1</b>	A vevői igények nem megfelelő mélységű felmérése a pontosság hiánya miatt. Lehetséges következmény: Az ügyféligények felmérése ezért nem elég gyors. Előfordulhat, hogy a terméktervezési folyamat során többször is fel kell keresni az ügyfelet pontosításokkal.
<b>2</b>	A saját termék fejlesztése során a piacfelmérés nem olyan részletes, mint amennyire az a megfelelő tervezéshez szükséges.
<b>3</b>	A saját termék fejlesztése során rossz célközönséget választanak ki a piacfelmérésnél.
<b>4</b>	Egy termékgyártási folyamathoz szükséges saját kompetenciák helytelen meghatározása (a fejlesztő cégnél), mielőtt egy virtuális gyártószövetség tagjait megkeresné és kiválasztaná.
<b>5</b>	Termékgyártási folyamat esetén a saját kompetenciák elosztásához szükséges koncepcióterv nem kellő mélységű (a koncepcióterv nem veszi kellőképpen figyelembe az üzemen belüli gépkapacitást).
<b>6</b>	A kompetenciák nem megfelelő meghatározása egy virtuális gyártási szövetségen belüli alternatív kompetenciacsapatok létrehozásakor. Magyarázat: A virtuális gyártási szövetségen belül alternatív kompetenciacsoporthoz állítanak össze, amelyeket a szövetségi vállalatok szakemberei közül választanak ki az adott kompetenciának megfelelően.
<b>7</b>	Nem megfelelő szakemberek kiválasztása a virtuális gyártási szövetségen belüli kompetenciák elosztásában alternatív kompetencia csapatok létrehozásához.
<b>8</b>	A vevői igények nem megfelelő figyelembevétele az együttműködésen alapuló tervezéssel kapcsolatban.

9	Szigorúbb gyártási követelményeket támasztanak a tervezők az építési tervekben, mint amit a megrendelő elvár. Ennek következménye lehet, a gyártás drágább lesz.
10	Tervek nem megfelelő használata a kollaboratív gyártástervezésben.
11	Az együttműködésen alapuló gyártástervezés során Ön nem rendelkezik a szükséges szakértelemmel a tervek megfelelő alkalmazásához a szerkezeti tervezésben. Ennek az lehet a következménye, hogy a vevői igényeknek nem megfelelő terméket állítanak elő.
12	A kollaboratív gyártástervezés során a gyártási környezetnek nem megfelelő termékgyártási paramétereket szakértelem hiányában határozzák meg.
13	Az együttműködésen alapuló gyártástervezés során a túlzott menedzsment nyomás miatt olyan termékgyártási paramétereket határoznak meg, amelyek nem felelnek meg a termelési környezetnek. (pl. a termelékenység növelésére).
14	Nem megfelelő minőség-ellenőrzési módszer kiválasztása a termék megfelelőségének ellenőrzésére a gyártás és a végső ellenőrzés során.
15	A nem megfelelő termékparamétereket a gyártás és a végellenőrzés során ellenőrzik, hogy igazolják a termék megfelelőségét.
16	A termék nem megfelelőségével kapcsolatos kockázatok hiányos felmérése.
17	Megfelelő pótalkatrészek hiánya a terméktámogatás során.

Az értékelést mind a 6 csoporttag három különböző skálán végezte el, mind a 17 kockázat esetében. Az eredményeket a 7. táblázat tartalmazza, ahol P a százalékos skála válaszainak eredménye, L a leíró skála válaszainak eredménye, PW pedig a páronkénti összehasonlítás eredménye a korábban bemutatott skálákon. A táblázatban a szórás értékét „S” jelöli, és az azonos kockázatokra adott válaszok átlagértéke (X) minden válaszadóra kiszámításra került. Az azonos válaszokat zölddel jelöltük a táblázatban. Ebben az esetben az értékeléshez használt skálát, illetve a kitöltő személyét változtattam a mérési rendszerünkben.

**7. Táblázat: A kockázatértékelés eredménye három skálával, P százalékos skála, L nyelvi skála és PW páronkénti összehasonlítási módszerrel. A zöld cellák ugyanazt az előfordulási eredményt jelölik különböző skálákon adott értékelésekben.**

	P	L	PW	P	L	PW	P	L	PW	P	L	PW	P	L	PW	P	L	PW	P	L	PW	P	L	PW			
	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	4	5	5	6	6	6	7	7	7	8	8	8	9	9	9
1.	6	3	7	6	3	8	4	3	7	6	3	7	4	4	6	3	4	6	5	4	6	5	3	7	3	5	3
2.	4	4	6	5	5	6	5	4	6	3	4	6	4	5	4	4	3	6	1	2	7	5	5	6	4	3	5
3.	4	4	4	5	5	6	3	3	6	4	4	8	4	5	6	5	3	8	5	3	7	4	5	6	6	6	5
4.	5	6	4	6	6	5	3	3	7	5	3	7	4	3	5	2	2	9	7	3	9	3	5	3	2	4	3
5.	2	5	5	4	4	6	5	6	6	2	3	8	3	2	7	6	4	7	6	2	7	3	3	6	7	5	2
6.	6	4	3	3	4	5	5	3	5	4	6	7	5	3	9	3	4	7	2	4	7	5	4	5	6	6	6
S	1.52	1.03	1.47	1.17	1.05	1.09	0.98	1.21	0.75	1.41	1.17	0.75	0.63	1.21	1.72	1.47	0.81	1.16	2.34	0.89	0.98	0.98	0.98	1.38	1.97	1.17	1.55
X	5	4	5	5	5	6	4	4	6	4	4	7	4	4	6	4	3	7	4	3	7	4	4	6	5	5	4
	P	L	PW	P	L	PW	P	L	PW	P	L	PW	P	L	PW	P	L	PW	P	L	PW	P	L	PW			
	10	10	10	11	11	11	12	12	12	13	13	13	14	14	14	15	15	15	16	16	16	17	17	17			
1.	4	4	6	4	4	6	5	4	6	5	5	3	4	4	4	5	4	6	4	4	6	6	5	4			
2.	3	3	5	3	3	6	4	6	6	4	2	6	4	6	7	1	5	6	1	3	7	2	5	7			
3.	4	4	5	4	2	5	5	3	6	6	3	7	4	2	6	5	3	6	5	2	6	5	3	3			
4.	3	2	5	5	3	8	4	3	6	5	6	3	2	4	8	2	5	8	2	3	8	3	4	4			
5.	4	3	5	2	2	7	1	4	8	4	5	2	5	3	8	3	2	8	5	5	6	5	4	2			
6.	4	5	6	2	4	7	3	5	6	5	4	6	3	4	6	4	4	7	5	5	6	4	5	5			
S	0.52	1.05	0.52	1.21	0.89	1.05	1.51	1.17	0.82	0.75	1.47	2.07	1.03	1.33	1.52	1.63	1.17	0.98	1.75	1.2	0.83	1.47	0.81	1.72			
X	4	4	5	3	3	7	4	4	6	5	4	5	4	4	7	3	4	7	4	4	7	4	4	4			

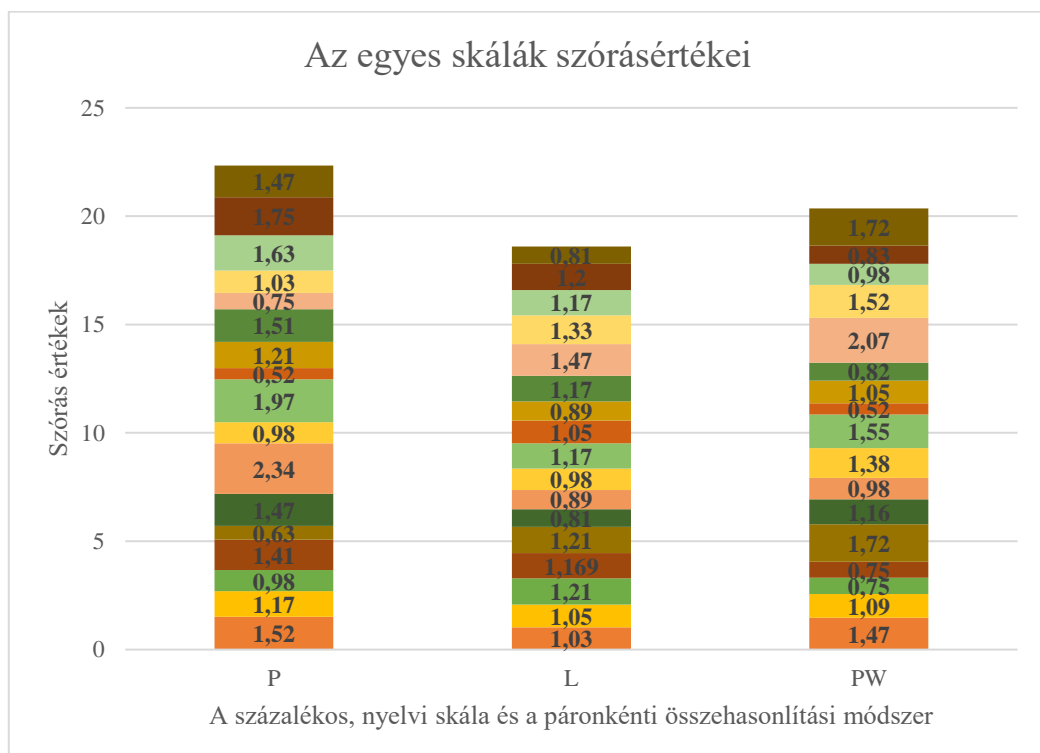
Az eredmények több szempontból is vizsgálhatók az értékelési rendszerben történt változások alapján. Például amikor megvizsgáljuk, hogy ugyanazon a skálán a különböző válaszadók eredményei mennyire különböznek egymástól, így vizsgálhatjuk a skála robusztusságát. Természetesen itt fontos, hogy biztosítsuk, a kitöltést végző szakemberek kompetenciája közel azonos. A szórásértékek azt mutatják, hogy sok esetben a különböző válaszadók eltérő választ adtak ugyanazokra a kockázatokra ugyanazon skála vagy módszer alkalmazásával. Az 1-2 skálaérték eltérés a legjellemzőbb. Ez származhat a csapattagok eltérő véleményéből is, ami konszenzussal egy csoportos megbeszélés során oldható fel, amely egyébként is része az FMEA értékelési módszerének.

Ezen kívül érdemes megvizsgálni a szórások átlagos és medián értékeit is, melyek eredményeit a 8. táblázat tartalmazza.

**8. Táblázat: A szórások átlagos és medián értékei.**

	P	L	PW
<b>Átlag</b>	1.31	1.095	1.198
<b>Medián</b>	1.41	1.169	1.09

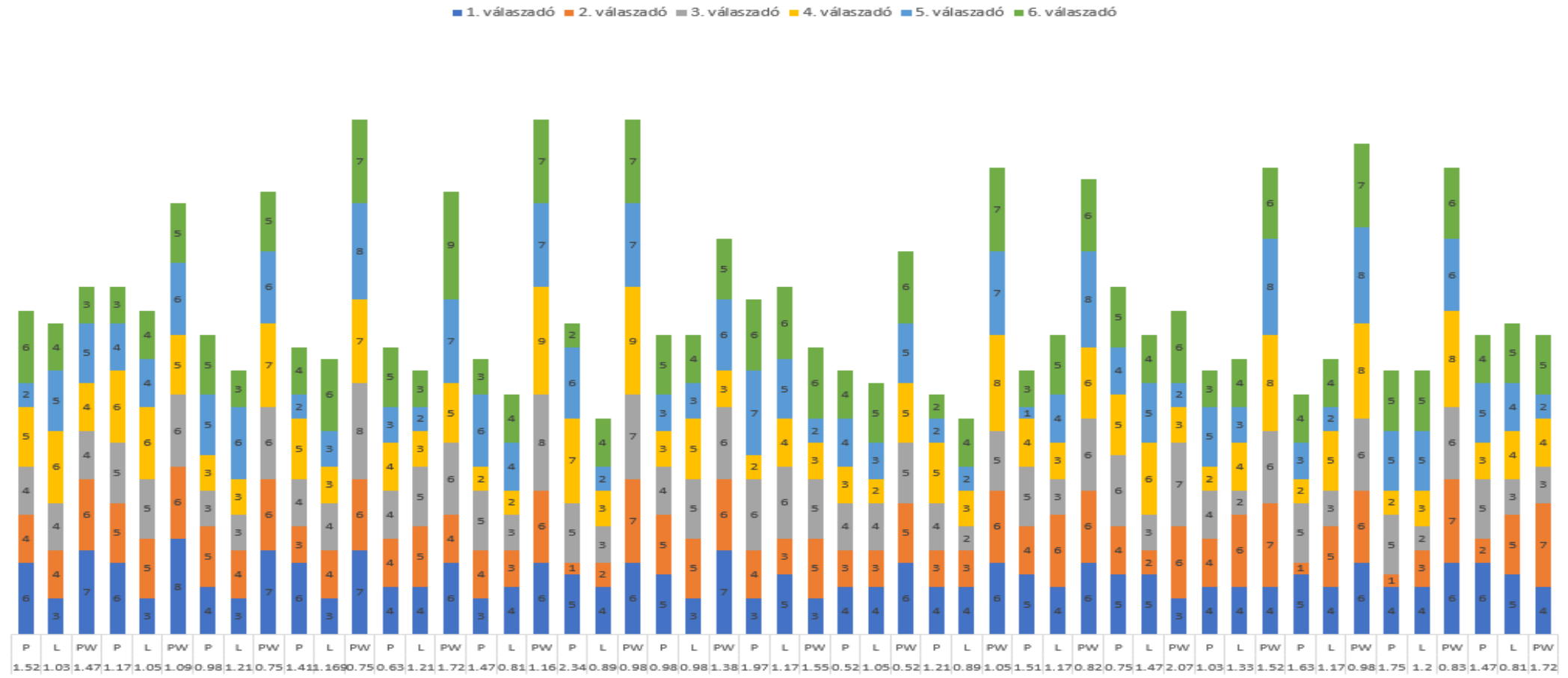
Az egyes skálákon megadott szórás eloszlása megmutatja, hogy melyik skálán szóródtak leginkább az adatok. Az eredmények a 4. ábrán láthatók. A szórás értékeinek összege alapján a nyelvi skálán megadott értékek szórása a legkisebb, a százalékos skálán a legnagyobb. Ez azt mutatja, hogy a nyelvi skála robusztussága a legjobb.



4. Ábra: Az előfordulási értékek szórásának megoszlása a három skála esetén.

A rendszer másik változója a skála, amely szintén változott minden résztvevőnél. Az 5. ábra az egyes válaszadók által megadott kockázati előfordulási értékeinek megoszlását mutatja a három skála esetén. Az ábrából jól látható, hogy sok esetben kiugró különbségek vannak a különböző skálákon adott értékelések 6 kitöltőre vetített összege között. Ez azt jelenti, hogy egy-egy értékelésben a különbség több skálaosztás is lehet attól függően, hogy melyik skálát választjuk.

### A kockázatértékelés eredményei



5. Ábra: A három skála előfordulási értékeinek megoszlása és az azonos skálán adott eredmények szórása

A 9. táblázat mutatja, hogy azonos értékelő által különböző skálán adott eredmények között mekkora a skála érték különbség. A legnagyobb eltérés különbség 7, átlagosan pedig 2 skálaérték a különbség az értékelések között.

Ezekből az eredményekből arra lehet következtetni, hogy a skálák kialakítása akkor is befolyásolhatja az értékelés végeredményét, ha ugyanaz a tartalom különböző módon jelenik meg. Ez már az 5. ábrából is kikövetkeztethető, ahol a különböző skálák válaszai gyakran nagyon eltérnek egymástól.

A skálákkal és a módszerrel kapcsolatos vélemények a 11. táblázatban találhatóak. A skálák és a módszer jelölései megegyeznek az előző táblázatokban használtakkal. A vélemények alapján az egyes skálák használatakor nem volt jelentős nehézségi különbség. Az egyik résztvevő úgy értékelte, hogy a páronkénti összehasonlítással történő értékelés nagyon egyszerű. Az átfutási időt tekintve minden egyes skála alkalmazása hosszúnak vagy nagyon hosszúnak bizonyult. A százalékos és nyelvi skálák nehézsége eltérő volt az értékelők számára, a legtöbb válasz nehéz vagy könnyű volt. A skálák nehézsége tehát nem befolyásolhatta számottevően az értékelés bizonytalanságát, hiszen a kitöltők közel azonos válaszokat adtak a nehézséget illetően.

A páronkénti összehasonlítás inkonzisztenciájának mértékét is értékeltük. A módszertan az  $RE(A) < 0,1$  értéket tartja elfogadhatónak, de ez csak alacsony tényező szám esetén lehetséges. 17 kockázati tényező esetében számolni kell a fáradtság megjelenésével az értékelés során. Az értékelés eredményeit a 10. táblázat tartalmazza. Az eredmények a 12. egyenlet alapján lettek kiszámítva.





10. Táblázat: A mérések inkonzisztenciája a hat válaszadó esetében.

Kockázatértékelés inkonzisztenciája		
1.	0.02753	3%
2.	0.796235	80%
3.	0.708084	71%
4.	0.398368	40%
5.	0.446742	45%
6.	0.538912	54%

11. Táblázat: A válaszadó véleménye a skálákról és a páronkénti összehasonlítás módszeréről.

	1.			2.			3.			4.			5.			6.			
	P	L	PW	P	L	PW	P	L	PW	P	L	PW	P	L	PW	P	L	PW	
<b>Mennyire volt egyszerű a skála alkalmazása a kockázatértékelés során?</b>																			
Nagyon nehéz			x			x										x			x
Nehéz		x			x						x			x	x				x
Egyszerű	x				x		x	x											x
Nagyon egyszerű									x		x								
<b>Mennyi ideig tartott a kockázatértékelés az egyes skálák használatával?</b>																			
Nagyon rövid ideig (kevesebb, mint 10 perc)						x			x										x x
Rövid ideig (10 és 20 perc között)	x										x	x		x	x				
Hosszú ideig (20 és 30 perc között)		x			x									x					x
Nagyon hosszú ideig (több mint 30 percig)									x								x		

Az egyik csapattag esetében az inkonzisztencia szintje nagyon alacsony volt, mindössze 3%. A kiugró inkonzisztenciák értéke a 2. és 3. alany esetében tapasztalható; itt megkérdőjelezhető az értékelés következetessége és pontossága.

## 5.2 Eredmények

A digitális gyártási rendszerre épülő tervezési folyamat kockázatait három különböző skálán lettek értékelve, ahol nem volt számottevő jelentésbeli különbség a skálák osztásai között. Az értékelés 2 mérési rendszer elem változásán alapult, a válaszadó megváltozása vagy az értékeléshez használt skála megváltoztatása.

Az értékelő megváltoztatásakor a legnagyobb eltérés 2 skálaérték volt a szórás tekintetében. Azonban a maximális osztás különbség az értékelések között egyes esetekben 7-es értéket is mutatott. Ha a skálaváltoztatáskor a szórások különbségét nézzük, akkor levonható az a következtetés, hogy a szórások összege a százalékos skálán lett a legnagyobb, tehát az a skála mondható legkevésbé robusztusnak. A százalékos skálán az átlag- és mediánértékek voltak a legmagasabbak, míg a nyelvi skálán és a páronkénti összehasonlításnál a legalacsonyabbak.

Az eredmények alapján az a következtetés vonható le, hogy a skálák és az értékelési módszerek változásai befolyásolják az értékelés bizonytalanságát, hiszen azok kevés esetben adták ugyanazt az értéket az előfordulás valószínűségére. A szórás, átlag és medián értékek tekintetében a nyelvi skála és a páronkénti összehasonlítás tűnik pontosabb értékelésnek. A különböző skálákon adott azonos kitöltő által adott válaszok alapján pedig elmondható, hogy a három skálán sok esetben nagyon különböző eredmények születtek. Mérhető a páronkénti összehasonlítás konzisztenciája is, amely a hat értékelő esetében két esetben igen magas, egy esetben pedig nagyon alacsony volt. A legnehezebb és legidőigényesebb módszernek a páros összehasonlítás bizonyult. A másik 2 skálán az értékelés nem volt ilyen bonyolult, és kevesebb időt vett igénybe. Ez abból is következik, hogy páronkénti összehasonlításnál minden párt össze kell hasonlítani, ami sokkal több időt jelent.

Az 5. ábrán és a 9. táblázatban bemutatott eredmények mutatják a legjobban, hogy sok esetben milyen kiugróan eltérő értékelések születtek a 3 skála használata során. Sok esetben 1-2 skálaérték is nagy különbséget jelent, hiszen az eredmény meghatározza, hogy mely kockázatok csökkentésével érdemes először foglalkozni. A kutatás során bizonyításra került, hogy a különböző skálákon adott értékelések eltérőek lehetnek, annak ellenére, hogy azok skálaterjedelme azonos volt. ***A kutatás eredményeként levonható az a következtetés, hogy a skálaváltoztatás és a skálához tartozó bizonytalanság (nem egyértelmű megfogalmazás, túl szubjektív) hatással van az értékelés pontosságára, befolyásolja azt. Így a feltett***

*hipotézis bebizonyításra került, miszerint az FMEA során használt skála minőségi kialakítása befolyásolja az értékelés pontosságát.*

## 6. Páros összehasonlítással végzett elemzések modellezhető hálózatokkal

A szakirodalmi áttekintés során már bemutatásra került, hogy a páros összehasonlítással végzett elemzések nagyon elterjedtek, akár önmagukban, de más módszerek kiegészítéseképpen is.

### 6.1 Célkitűzések

A kutatásom során azt a kérdést fogalmaztam meg, hogy a páros összehasonlítással végezhető elemzések modellezhetőek-e hálózatokkal. A cél annak megvizsgálása, hogy a hálózatokkal való fejlesztéssel milyen új eredmények adódnak hozzá a páros összehasonlítás eredményeihez. További célkitűzésként került megfogalmazásra annak megvizsgálása, hogy értékelhető-e a hálózatokkal kiterjesztett módszerben a konzisztencia szintje kettő értékelési tényezőre. Az AHP és KIPA módszerekben az inkonzisztencia a tranzitivitás elmélete szerint értékelhető, 3 tényező esetére. Abban az esetben azonban, ha az értékelési tényező párokra kétszer kérdezzük rá, nem nyújtanak megoldást ezek a módszerek. Használata azonban különböző pszichológiai tesztekénél elterjedt.

### 6.2 Páros összehasonlításra alapuló kockázatértékelés eredményeinek modellezése hálózatokkal

A hipotézis bizonyítására a PC-FMEA módszertant vettem alapul, mely a kockázatértékelés páros összehasonlítását leíró módszere. Az értékeléshez létrehoztam egy páros összehasonlításra alapuló hálózatot, melynek a következő tulajdonságai vannak. A páronkénti összehasonlítás eredményeiből felépített hálózat irányított, ami a kritikusság irányát mutatja. Az irány mellett a kritikusság mértéke is megadható az élek súlyaként. Az azonos irányba mutató élek összevonhatók azok súlyaival együtt. Létrejött tehát egy súlyozott hálózat  $C = \{V, E, W\}$ , ahol  $V$  a csúcsok halmaza,  $E$  az élek halmaza,  $W$  pedig az élek súlya. A hálózatban  $\alpha_{ij}$  az  $i$  csomópont és a  $j$  csomópont összekapcsolását jelenti, és minden kapcsolatnak  $(i, j)$  van  $w_{ij}$  súlya. A súlyozott be-fokszám  $w_1 D_j$  kiszámítása a 13. egyenletben látható [101].

$$w_1 D_j = \sum_{(v_i, v_j) \in E} w_{ij} \quad (13)$$

A következő, a kockázatok súlyának értékelésére jól használható mutató a PageRank érték.

A kutatás során tehát ötvöztem a PC-FMEA és a hálózatok kutatás technikáit. Az értékelés páronkénti összehasonlítással történik, amelyet hálózati modellezéssel

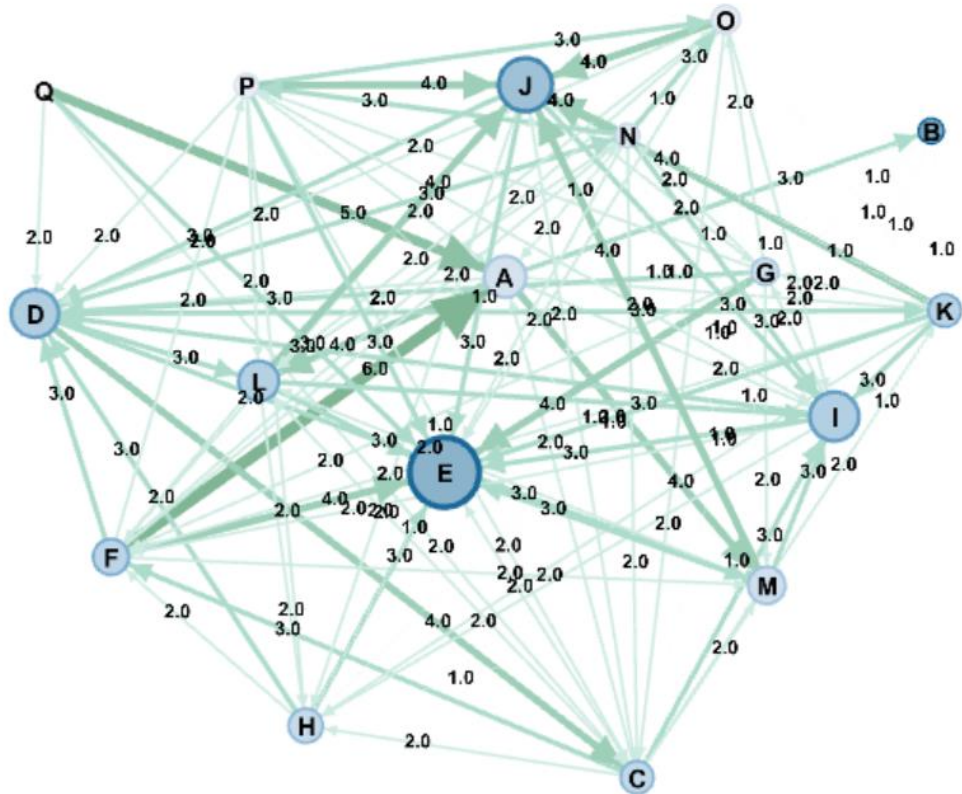
értékeltem ki. A következő alfejezetek bemutatják, hogyan alkalmazható a módszer egyéni és összesített eredmények kockázatértékelésére. Mindkét esetben a súlyozott be-fokszámot és a PageRank értéket használtam a rangsoroláshoz. A súlyozott be-fokszám megmutatja, hogy egy adott csomópontnak hány bemeneti éle van, és azok mekkora súllyal rendelkeznek [102]. A PageRank mutató ezen csomópontok hálózatban betöltött szerepét is figyelembe veszi [103]. A módszer bemutatásához véletlenszerűen generáltam az adatokat.

### 6.2.1 Egyéni kockázati hálózat

Az FMEA módszertant alkalmazó kockázatértékelés a legtöbb esetben csapatban történik, ahol különböző szakmai területek képviselői vesznek részt. A csoporton belüli értékelés hálózatokkal egyedileg és összesítve is modellezhető. A 6. ábra az egyéni értékelés modellezését mutatja be. Az ábrán a csúcsok a kockázatokat, a köztük lévő irányított élek pedig a preferenciális kapcsolatot jelölik. A csomópontok mérete a súlyozott be-fokszám eredményeit mutatja. Minél nagyobb a csomópont, annál kritikusabb a kockázat ebben a tekintetben. A csomópontok színe a PageRank mutató szerinti értékelést mutatja. Minél sötétebb a csomópont, annál nagyobb a kockázat (a hálózatban betöltött szerepe annál jelentősebb. Az éleken olyan súlyokat látunk, amelyek egy 1-től 7-ig terjedő skálából származnak. Az élek vonalvastagsága mutatja a preferencia mértékét (a súlyokat). A 12. táblázat egy példaskálát mutat be a kockázat előfordulásának páronkénti összehasonlítására.

### 12. Táblázat: Skála az előfordulás értékeléséhez

Érték	Előfordulás
0	Ugyanolyan gyakori
1	Kicsit gyakrabban
2	Mérsékelten gyakrabban
3	Gyakrabban
4	Erősen gyakoribb
5	Nagyon erősen gyakoribb
6	Rendkívül gyakoribb
7	Rendkívül gyakoribb (+).



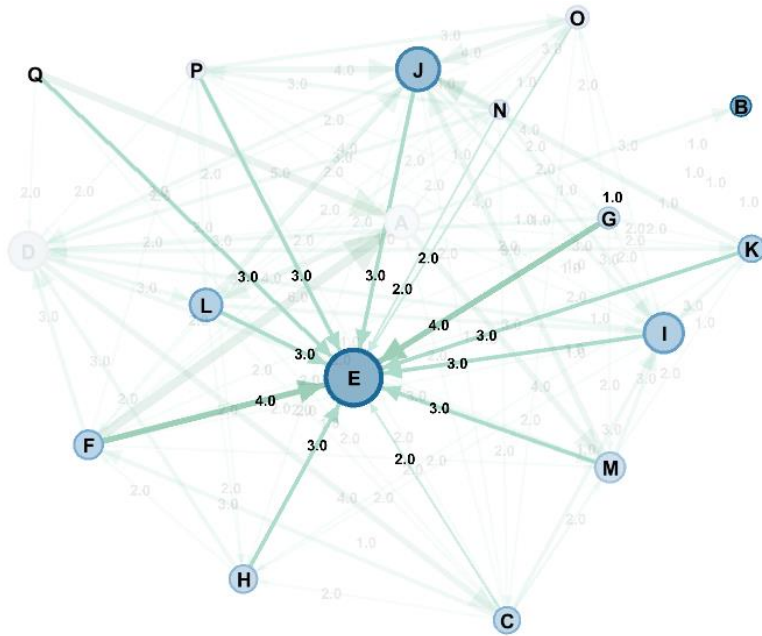
6. Ábra: Egyéni kockázati hálózat. A csomópontok mérete a súlyozott be-fokszám alapján mutatja az eredményeket, a csomópontok színe pedig a PageRank érték alapján végzett kockázatértékelés eredményeit.

A hálózati modellezés és kiértékelés eredményeit a 13. táblázat tartalmazza súlyozott be-fokszám és PageRank index szerint. Az eredményeket a kockázatok kritikussága szerint rangsoroltam. Látható, hogy a két értékelés alapján nem egyforma az eredmény. Az eredmények különbségét az adja, hogy a PageRank figyelembe veszi a szomszédos csomópontok hálózatban betöltött szerepét is.

**13. Táblázat: Az egyéni kockázati hálózati modell eredményei a súlyozott befokszám és PageRank érték alapján.**

Id	Súlyozott befokszám	Id	PageRank
E	38	B	0.124224
J	27	E	0.113282
I	24	J	0.092585
D	23	D	0.073775
A	19	I	0.072988
L	18	L	0.070678
M	16	K	0.065196
F	15	F	0.063325
H	14	C	0.058084
C	13	H	0.053769
K	13	M	0.044907
O	10	G	0.044183
G	9	A	0.040232
B	8	N	0.02964
N	7	O	0.023272
P	7	P	0.021036
Q	0	Q	0.008824

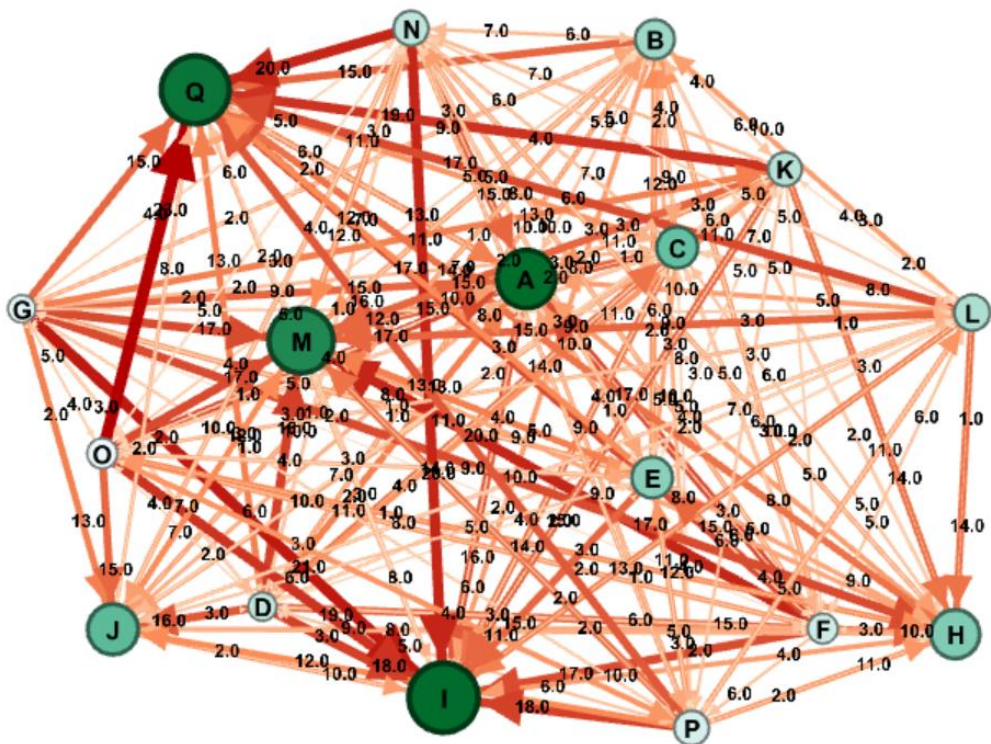
Az egyes csomópontok vizualizálása, kiemelése is elvégezhető annak érdekében, hogy az összekapcsolt éleket a súlyukkal együtt megmutassuk. Ennek eredménye a 7. ábrán található.



7. Ábra: A hálózatban lévő csúcsok kapcsolatának megjelenítése a preferencia súlyaival.

### 6.2.2 Összesített kockázati hálózat

Az összesített kockázati hálózatok felhasználhatók egy FMEA-csapat kockázatértékelési eredményeinek értékelésére. Ha az értékelést mindenki egyénileg végzi el, akkor annak összesített eredménye hálózatokkal modellezhető. A preferenciák ebben az esetben összegezve, súlyukkal együtt szerepelnek. Az értékelés során mindenki véleménye érvényesül, és nem meggyőzéssel jutnak az FMEA csoport tagjai közös konszenzusra. A 8. ábra a kockázatértékelés eredményeiből képzett összesített kockázati hálózatot mutatja. Az eredmények megjelenítése megegyezik az egyéni hálózatával.



8. Ábra: Összesített kritikussági hálózat. A csomópontok mérete a súlyozott fokon belüli értéket mutatja, a csomópontok színe pedig a PageRank érték alapján végzett kockázatértékelés eredményét.

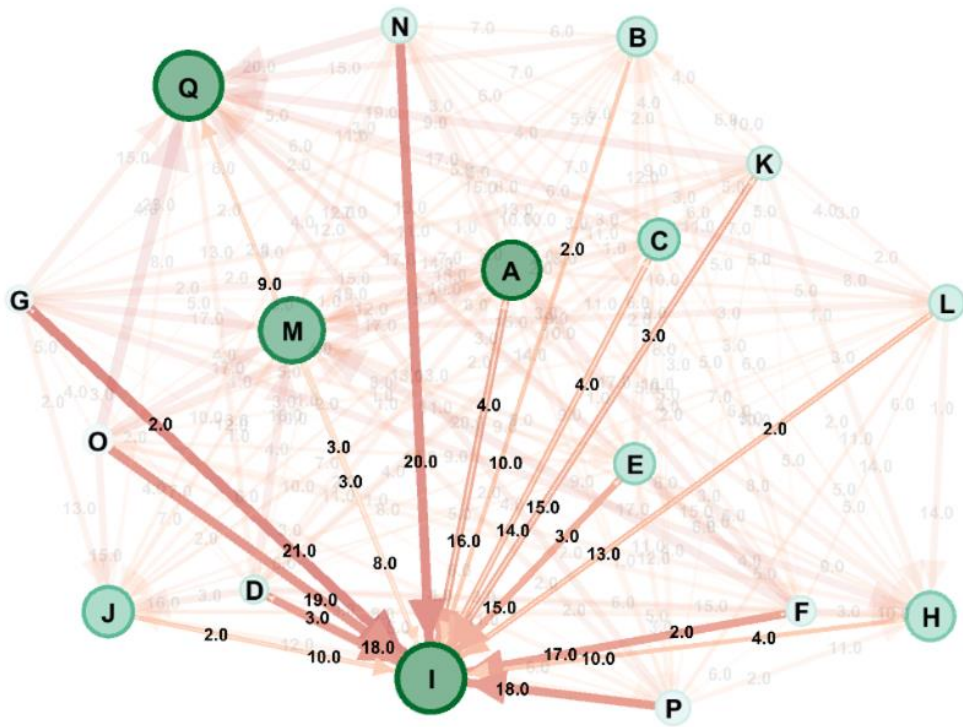


**14. Táblázat: Az aggregált kritikussági hálózati modell eredményei a súlyozott be-fokszám és PageRank érték alapján**

<b>Id</b>	<b>Súlyozott be-fokszám</b>	<b>Id</b>	<b>PageRank</b>
I	227	A	0.111017
Q	221	I	0.111016
M	205	Q	0.10653
A	176	M	0.09695
J	141	J	0.070793
H	134	C	0.067337
C	98	H	0.058812
E	97	E	0.055613
B	90	B	0.049083
L	74	L	0.043342
N	69	K	0.040657
P	69	N	0.03844
K	65	D	0.036829
O	48	F	0.032958
F	47	P	0.030556
D	40	G	0.026501
G	36	O	0.023568

A hálózati modellezés eredményeit a 14. táblázat tartalmazza súlyozott be-fokszám és PageRank index szerint. Az eredményeket a kockázatok kritikussága szerint rangsoroltam. Az értékelés eredménye ebben az esetben sem teljesen egyforma a már korábban kifejtett különbség miatt.

Az egyes csomópontok vizualizálása is lehetséges a hálózatokkal, hogy megmutassuk a kapcsolódó éleket súlyukkal. Ezen eredmények a 9. ábrán láthatók.



9. Ábra: A hálózatban lévő csúcsok kapcsolatának megjelenítése a preferencia összesített súlyaival.

### 6.3 Preferencia és következetesség értékelése

Ebben a részben egy lehetséges módszer kerül bemutatásra a termékfunkciók fontosságának kiszámítására és a válaszok konzisztenciájának hálózati elemzéssel történő értékelésére. A vevői igények fontosságának rangsorolása első lépésként a QFD módszer része, amelyre az AHP módszer alkalmazható. Mindkét módszer esetében általában páros összehasonlítást alkalmazó kérdőívvel mérik a vásárló véleményét. A páronkénti összehasonlításon alapuló kérdőív hálózatelemzés segítségével is értékelhető.

#### *Preferencia hálózat*

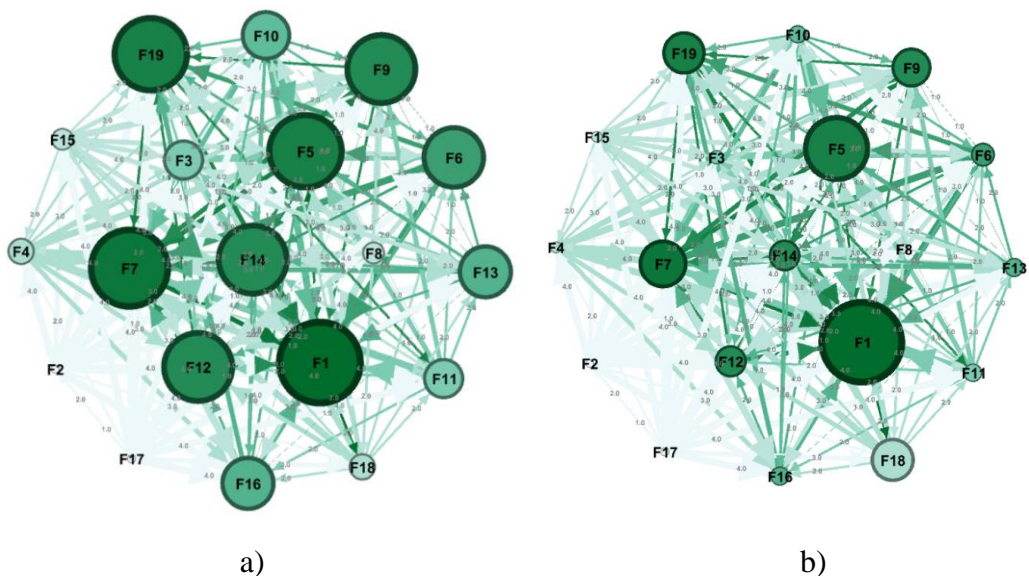
Az alább vizsgált preferenciahálózatban a csúcsok a vásárlói igényeket, az irányított élek pedig a preferenciákat jelentik. A preferencia súlya a kérdőívben is megkérdezhető és a hálózatban értékelhető, mint az AHP módszernél. Ezért a preferenciahálózatot ott irányítják és súlyozzák, ahol az összes csúcs között kapcsolat van, ami egy teljes gráfot eredményez. Az alábbi munkában is a be-fokszám és a PageRank mutatókkal mértem a preferenciát.

A példában páronkénti összehasonlítással 19 tényezőt ( $F_i$ ) értékeltem, az eredményeket véletlenszerűen generáltam, és minden tényezőt kétszer értékeltem. Az értékelésnél a preferencia súlyát is megadtam: 1 mint fontosabb és 2 mint sokkal fontosabb.

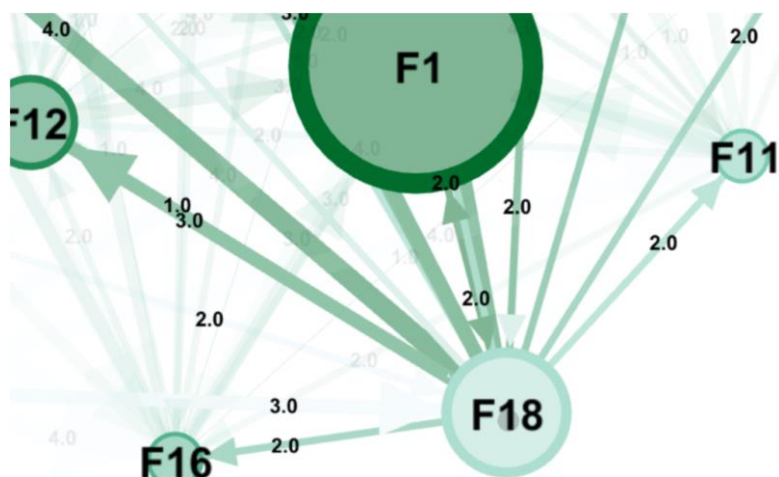
A be-fokszám és PageRank érték számításának eredményeit a 10. ábra mutatja. A szín mindkét esetben a csúcsok be-fokszámát jelöli (minél sötétebb a csúcs, annál

nagyobb a be-fokszám értéke), a csúcsok átmérője pedig az a) grafikonon a be-fokszám, b) grafikonon pedig a PageRank nagysága (minél nagyobb a csúcs, annál nagyobb a mutató nagysága). Az élek súlyát összegeztem, ha a preferenciák iránya azonos volt ugyanazon párosításnál. Inkonzisztens válasz esetén mindkét él mindkét irányban megjelenik és kiértékelésre került, ami a 11. ábrán látható. A PageRank értékeket az élek súlyának figyelembevételével számítottam ki. F1, F5, F7 és F19 a legnagyobb jelentőséggel bír a grafikonon a be-fokszám és a PageRank értékek alapján.

Az eredmények alapján a hálózat elemzés alkalmasnak bizonyul a preferencia súlyának meghatározására, mivel az két különböző hálózati mutató segítségével határozható meg.



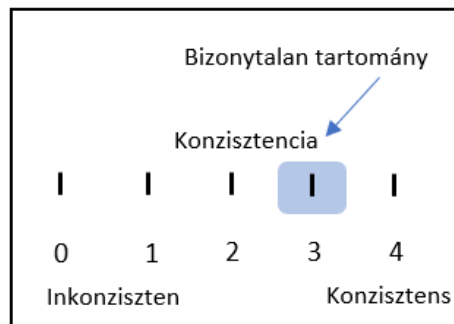
10. Ábra: a) preferenciahálózat a csúcsok be-fokszámának megjelenítésére és b) a csúcsok PageRank értékének megjelenítése. A csúcsok átmérője a be-fokszám és a PageRank értékeit tükrözi (minél nagyobb a mutató értéke, annál nagyobb a csúcs átmérője). A csúcsok színei mindkét esetben a be-fokszám nagyságát mutatják.



11. Ábra: A preferenciák típusai és súlyuk. A preferenciák súlyait összegezzük, ha a válaszok azonos párosítás esetén konzisztensek voltak. Ha a válaszok nem konzisztensek, az éleket a rendszer viszonzozza, és a súlyokat mindkét irányban kiértékeli. A színintenzitás a súly nagyságát mutatja. (A vizualizáció Gephiben készült.).

## 6.4 Konzisztencia értékelése

A konzisztencia általában három értékelési tényező esetén mérhető. Hálózati elemzéssel a konzisztenciaértékelés akár csak két tényezőre is alkalmazható, ha az összehasonlítást páronként végezzük, és kétszer értékelünk. A grafikonon a reciprok élek az inkonzisztens összehasonlításokat mutatják, ahogy az a 12. ábrán is látható.



12. Ábra: A lehetséges súlyok összege, figyelembe véve a preferenciák irányát.

Ha a példában szereplő válaszok bizonytalanságát a preferencia irányának figyelembevételével vizsgáljuk, akkor a következő eseteket kapjuk, ahol a mínusz (-) és plusz (+) jel jelzi a különböző irányokat. Ellentétes irány esetén az egyik él pozitív előjelet kap, ha nagyobb a súlya.

- Inkonzisztens válasz: A preferenciák iránya ellentétes, és a súlyok -2 és 2, vagy -1 és 1, ha az összegzett érték 0. A másik esetben a súlyok lehetnek -1 és 2, amikor a súlyok összege 1;
- Következetes válasz: A súlyok 2 vagy 1 kétszer ugyanabba az irányba mutatnak; ezért az összegzett értékek 4 vagy 2;
- Bizonytalan válasz a preferencia azonos irányával: A súlyok 1 és 2 azonos irányúak, a súlyok összege pedig 3.

A konzisztencia határa a grafikonon szereplő válaszok súlyának figyelembevétele nélkül a következő képlettel számítható ki:

$$C_l = 1 - (z_i/z_{max}) \cdot 100\% \quad (14)$$

ahol  $C_l$  jelenti a konzisztencia szintjét,  $z_i$  az inkonzisztens válaszok számát,  $z_{max}$  pedig a lehetséges inkonzisztens válaszok számát, ami az összehasonlítások számának a fele. Az inkonzisztens válaszokat a hálózat szeletelésével kizárhatjuk az értékelésből.

## 6.5 Eredmények

A hálózati modellezés eredményei azt mutatják, hogy a kockázatértékelés páronkénti összehasonlításának eredményének átalakítása új értékelési módot adhat. A súlyosság, az előfordulás és az észlelés értékek a súlyozott be-fokszám és a PageRank értékkel tovább értékelhetők. A hagyományos FMEA-ban a csapat közösen méri fel a kockázatokat, és megpróbál közös megegyezésre jutni. A kockázatok kritikusságáról azonban a csoporttagoknak eltérő véleménye és tapasztalata lehet, munkájuk területétől függően. A csapaton belüli meggyőzés kiküszöbölésére egyéni kritikussági hálózatok használhatók. Az aggregált kritikussági hálózattal a csapat teljes véleménye értékelhető, ahol mindenkinek az eredménye az egész részét képezi.

*A kutatás végén levonható az a következtetés, hogy a PC-FMEA vagy az alap páros összehasonlítás módszertana és a hálózat kutatás eszköztára együttesen új értékelési módszert ad a kockázatértékelés vagy a rangsorolás megvalósításához.*

A kockázatok egyenként és összesítve is értékelhetők, két mutató alapján. Ez a modellezés mindhárom értékelési tényező esetén (S,O,D) és akár további kockázati tényezőkre is alkalmazható. A két mutató közül az FMEA csoport választhat, hogy melyiket részesíti előnyben. Az értékelés nem időigényes, a páronkénti összehasonlítás és a hálózat kutatás alkalmazása csökkenti a szubjektivitást, hiszen az eredmények kevésbé manipulálhatók a résztvevők által, mint a hagyományos FMEA-nál, ahol az értékelés csoportosan történik. A módszer másik nagy előnye, hogy vizuálisan modellezhetővé teszi a kockázatok közötti kapcsolatot. Ami alátámaszthatja a kockázatok bemutatását és azok kapcsolatainak megértését. Továbbá a PageRank algoritmus figyelembe veszi a többi csomópont fontosságát; ezért a hálózatelemzés más megközelítést kínál az AHP és QFD módszerek prioritási módszerei helyett.

A kutatás második felében a hálózatokban bemutatásra került, hogy a konzisztencia értékelhető abban az esetben is hálózatokkal, ha az értékelést 2 tényezőre és nem 3-ra nézzük. Itt az értékelést a páros összehasonlítás során kétszer kell elvégezni.

*A kutatás eredményeképpen levonható a következtetés, hogy a hálózatokkal értékelhető az inkonzisztencia 2 tényezőre a kétirányú élek és a súlyok vizsgálatával. A konzisztencia szintje képlettel is megadható.*

## **7. A QFD módszertanban a műszaki paraméter fontosság értéke korrigálható a műszaki paraméter korrelációs hálózatban betöltött szerepével**

A digitális gyártás megjelenése és fejlődése megköveteli, hogy a tervezést és a gyártást támogató módszereket is hozzá kell igazítani ehhez az új rendszerhez. A vevői elégedettség elérése érdekében a tervezés és a gyártás területén minőségirányítási módszereket alkalmaznak a megfelelő termékminőség biztosítása érdekében. Ezeknek a módszereknek a digitális gyártásban alkalmazott eszközökre való átdolgozása új, eddig ismeretlen lehetőségeket nyithat meg. Az egyik gyakran használt minőségirányítási eszköz a Quality Function Deployment (QFD), amely segíthet a fejlesztési célok meghatározásában.

### **7.1 Célkitűzések, probléma megfogalmazása**

Jelen kutatás azt kívánja megvizsgálni, hogy milyen új alkalmazási eredmények érhetők el a hagyományos QFD hálózatokkal történő kiterjesztésével. A szakirodalmi kutatásom során több olyan problémát is feltártam, amelyre a hálózatkutatás módszertana megoldás lehet. Ilyen probléma, hogy a mátrixban a negatív értékeket a módszer nem tudja kezelni, illetve, hogy a végső értékelésbe a műszaki paraméterek közötti kapcsolatok nem kerülnek bele, pedig nagyon fontos részét képezik a fejlesztési irányok kijelölésének. A kutatás célja tehát az, hogy bebizonyítsam, a hálózat elemzéssel ezek a hiányosságok orvosolhatók, továbbá, hogy ha a QFD módszertan által kezelt adathalmazt komplex rendszerként tekintjük és hálózatokkal modellezzük, akkor további, új eredményeket kaphatunk. A javasolt módszert egy esettanulmányon keresztül vizsgáltam meg, amely a CNC gépek fejlesztési területeit vizsgálja. A CNC szerszámgépek autonóm működésük miatt fontos egységei azoknak a rugalmas termelési rendszereknek és gyártási struktúráknak, amelyek megfelelnek az Ipar 4.0 és a digitális gyártás követelményeinek. Emellett a megfelelő CNC gép kiválasztása nehéz, összetett és időigényes probléma az alternatívák széles skálája miatt.

### **7.2 Csomópontok közötti korreláció**

Ebben a részben a termék műszaki követelményei közötti összefüggések hálózati elemzéssel történő lehetséges értékelését mutatom be. A korreláció kiszámításához a QFD tetómátrix módszerét használtam. A vizsgálathoz létrehoztam egy korrelációs hálózatot.

A két műszaki követelmény közötti korreláció lehet negatív, pozitív vagy egyik sem, azaz nincs korreláció. A korrelációs hálózat tehát irányított, ahol az irány az egymásra gyakorolt hatást jelenti. A korreláció súlya is meghatározható.

Példámban a súly értéke -3 és 3 között lehet, ahol a 0 azt jelenti, hogy nincs összefüggés, hatás, a két szélsőérték pedig a legerősebb negatív, illetve pozitív korrelációt jelenti. 21,  $M_i$ -vel jelölt műszaki követelményt azonosítottam és értékeltem. A korrelációs kapcsolatokat véletlenszerűen generáltam. A 13. ábrán a színintenzitás a be-fokszám értékét, az átmérő pedig a ki-fokszám értékét mutatja. A hálózatból a következő mutatókat határoztam meg:

Negatív ki-fokszám: A műszaki követelmény megváltoztatása sok más műszaki követelményre negatív hatással van (a példában M1);

Pozitív ki-fokszám: A műszaki követelmény megváltoztatása számos más műszaki követelményre pozitív hatással van (a példában M2);

Negatív be-fokszám: Számos műszaki követelmény megváltoztatása negatív hatással van rá. Erre különösen akkor érdemes figyelni, ha a vizsgált műszaki paraméter egy fontos vevői igényt befolyásol (a példában M9);

Nagyon pozitív be-fokszám: Számos műszaki követelmény megváltoztatása pozitív hatással van rá (a példában M21);

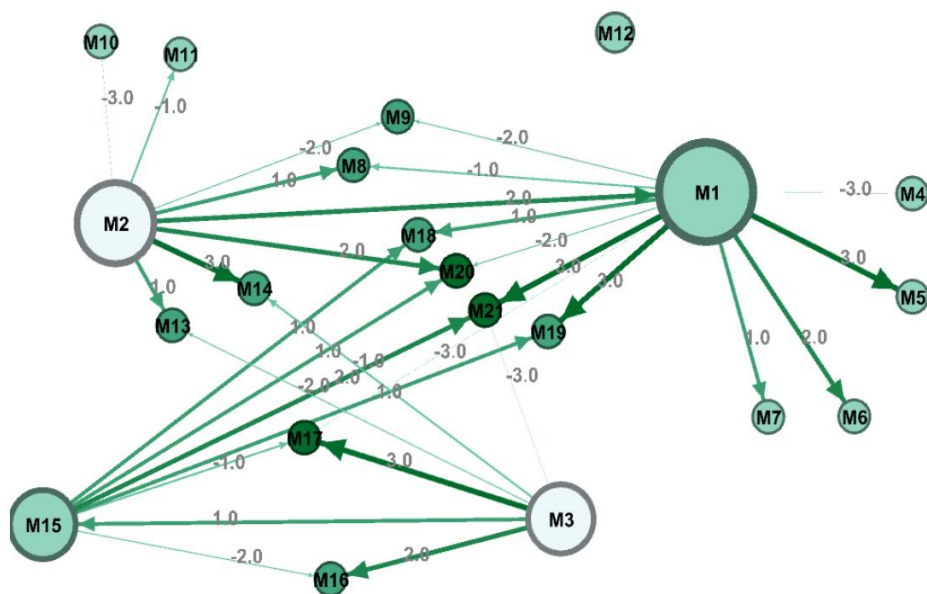
A legnagyobb befolyás a hálózatban: A csúcsnak van a legnagyobb ki-fokszáma a hálózatban (a példában M1);

Elszigetelt csúcs: Nincs korrelációja egyetlen másik csúccsal sem. Ez a műszaki követelmény önállóan módosítható anélkül, hogy hatással lenne más követelményekre (a példában M12);

Nulla be-fokszám: Más műszaki követelmény változása nem érinti (a példában M2, M3);

Nulla ki-fokszám: Nincs hatással semmilyen más műszaki követelményre (M(4-14) és M(16-21)).

Ezen tulajdonságok vizsgálatával támogatható a döntés, hogy melyik funkciót kell/lehet megváltoztatni. Ha egy műszaki követelmény változik, az negatívan befolyásolhatja azt a műszaki követelményt, amelyet a vevő szempontjából a legfontosabbnak tartanak. A hálózatelemzés alkalmasnak bizonyul a műszaki követelmények közötti összefüggések értékelésére és megjelenítésére.



13. Ábra: Műszaki követelmények korrelációs hálózata. A csúcs átmérője mutatja a ki-fokszám nagyságát, a csúcsok színe pedig a be-fokszám nagyságát. Minél nagyobb a csúcs, annál nagyobb a ki-fokszám értéke, minél sötétebb a csúcs, annál nagyobb a be-fokszám érték. Az élek súlya a hatás jelentőségét jelenti.

#### A vevői igények rangsorolása

A QFD további hálózat kutatással történő fejlesztéséhez létrehoztam egy újabb hálózatot, az alábbiak szerint. A kidolgozott módszerek és hálózatok egy valós esettanulmányon keresztül is bizonyításra kerültek. A QFD első lépése a vevői igények és azok fontossági fokának meghatározása. Ezt a rangsort kérdőívekkel vagy interjúkkal, páros összehasonlítással is el lehet végezni: ennek keretében a megrendelő egymáshoz viszonyítva értékeli a követelményeket. A páronkénti összehasonlítás eredménye könnyen értékelhető hálózatelemzés segítségével, ahogy az az előző fejezetekben már bemutatásra került. Az így létrejövő hálózat irányított, ami a preferenciák irányát mutatja. Lehetőség van a preferencia mértékének megadására is, és ebben az esetben az élek összevonásra kerülnek az értékelés során kapott súlyok összegével. A súlyozott preferenciahálózat  $P = \{V, E, W\}$ , ahol  $V$  a csúcsok halmaza,  $E$  az élek halmaza,  $W$  pedig az élek súlyainak gyűjteménye. A hálózatban az  $a_{ij}$  az  $i$  és a  $j$  csomópontok kapcsolatát jelöli, és minden  $(i, j)$  kapcsolatnak egyedi  $w_{ij}$  súlya van. A súlyozott be-fokszám  $w_1 D_j$  a 13. képletben bemutatásra került.

A vevői igények hálózaton belüli rangsorolásának másik módja a PageRank mutató használata, ahogy az előző fejezetekben az már bemutatásra került.

Amennyiben tehát a QFD első lépéseként a vevői igények felmérését páros összehasonlítással mérjük, akkor a kiértékelést elvégezhetjük a be-fokszám, illetve a PageRank mutató segítségével, valamint, ha a tényezőkre kétszer kérdezzük rá, akkor azok konzisztenciája is kiszűrhető.



### *Korrelációs mátrix*

A QFD második lépése annak a kérdésnek a megválaszolása, hogy hogyan lehet megfelelni az ügyfelek igényeinek. Ennek érdekében össze kell gyűjteni a termék műszaki paramétereit, és meg kell határozni azok lehetséges fejlesztési irányait. Ezen műszaki paraméterek kölcsönhatását a QFD módszertan is meghatározza. A korreláció meghatározásához egy -3-tól 3-ig terjedő skálát hoztam létre, ahol a negatív érték negatív, a pozitív érték pedig a pozitív korrelációt jelöli. Ahol nincs korreláció, ott nem jelenik meg érték, így a 0-t nem használtam erre a célra. A preferencia irányát + vagy - jelöli. Az értékeléshez tehát a fent leírt skálát használták a QFD értékeléséhez. A korrelációs mátrixból korrelációs hálózat hozható létre az előző fejezetben bemutatottak szerint. A hálózatban minden (i, j) kapcsolatnak egyedi súlya van:  $w_{ij}$ . A preferencia típusú élek irányítottak, és a korreláció irányát mutatják. Egy súlyozott korrelációs hálózat  $C = \{V, E, W\}$ , ahol  $V$  a csúcsok halmaza,  $E$  az élek halmaza,  $W$  pedig az él súlyainak halmaza.

### *Kapcsolati mátrix*

A műszaki követelmények és a vevői igények közötti kapcsolatot a kapcsolati mátrix határozza meg. Jelen kutatási körben a kapcsolat értékét egy 1-től 3-ig terjedő skálán becsültem meg, ahol az 1 a leggyengébb, a 3 a legerősebb kapcsolat. Ahol nincs kapcsolat, ott nem adtam meg értéket a 0 helyett. A kapcsolati háló élei irányítatlanok, ez azért van így, mert ebben az esetben csak a kapcsolat meglétét és erősségét kell jelezni, tehát ez egy irányítatlan hálózat. A hálózatban a csúcsok képviselik a vevői igényeket és a műszaki követelményeket. Egy súlyozott kapcsolati hálózat  $R = \{V_r, V_t, E, W\}$ , ahol  $V_r$  a vevői követelmények csomópontjainak halmaza,  $V_t$  a műszaki követelmények csomópontjainak halmaza,  $E$  az élek halmaza, és  $W$  az élek súlyainak halmaza.

### *A műszaki követelmény fontossági száma*

A QFD elemzés legfontosabb eredménye a műszaki követelmények súlyának meghatározása és a fejlesztési irány meghatározása. A hagyományos QFD elemzésben a műszaki követelmények súlyát a következő képlettel számítjuk ki:

$$W_j = \sum_{i=1}^n d_i \cdot r_{ij} \quad (15)$$

ahol  $n$  a vevői igények száma,  $W_j$  a  $j$ -edik műszaki követelmény súlya,  $d_i$  az  $i$ -edik vevői igény fontossági foka, és  $r_{ij}$  az  $i$ -edik vevői igény és a  $j$ -edik műszaki követelmény közötti kapcsolati együttható [51].

Hálózatkutatás esetén ez a képlet olyan további elemekkel bővíthető, amelyek nem részei a hagyományos QFD elemzésnek. A 15 egyenletben, a műszaki

követelmények közötti összefüggés nem jelenik meg. A műszaki paraméterek kölcsönhatása azonban jelentősen befolyásolhatja a fejlesztés sikerét. Emiatt a fontosság meghatározásakor figyelembe kell venni az összefüggés irányát és mértékét. Ezért a képletet kibővítettem a csomópont súlyozott ki- és be-fokszámával. A súlyozott ki- és be-fokszámok szerepet játszanak annak értékelésében, hogy egy adott paraméter mennyire jelentős, ugyanis a súlyozott ki-fokszám határozza meg, hogy a csomópontot mennyire befolyásolja a többi csomópont, a súlyozott be-fokszám pedig azt, hogy mennyire befolyásolhatja a többi csomópont. A súlyozott be-fokszám az érzékenységet, míg a súlyozott ki-fokszám a hálózat egy csomópontjának hatását mutatja. A súlyozott ki-és be-fokszám számításai az alábbi egyenletekben látható. A súlyozott be-fokszám számítása a 13. egyenletben található.

$$w_2D_j = \sum_{(v_j,v_i) \in E} w_{ji} \quad (16)$$

ahol  $w_2D_j$  a  $j$  paraméter súlyozott ki-fokszáma,  $w_{ji}$  pedig a kimenő éleinek súlyát jelenti.

$$w_1D_j^+ = \sum_{(v_j,v_i) \in E} w_{ji}^+ \quad (17)$$

ahol  $w_1D_j^+$  a  $j$  paraméter pozitív súlyozott be-fokszáma,  $w_{ji}^+$  pedig a bemenőéleinek pozitív súlya.

$$w_1D_j^- = \sum_{(v_j,v_i) \in E} w_{ji}^- \quad (18)$$

ahol  $w_1D_j^-$  a  $j$  paraméter negatív súlyozott be-fokszáma,  $w_{ji}^-$  pedig a bemenő éleinek negatív súlya.

$$w_2D_j^+ = \sum_{(v_j,v_i) \in E} w_{ji}^+ \quad (19)$$

ahol  $w_2D_j^+$  a  $j$  paraméter pozitív súlyozott ki-fokszáma,  $w_{ji}^+$  pedig a kimenő éleinek pozitív súlyozása.

$$w_2D_j^- = \sum_{(v_j,v_i) \in E} w_{ji}^- \quad (20)$$

ahol  $w_2D_j^-$  a  $j$  paraméter negatív súlyozott ki-fokszáma, és  $w_{ji}^-$  a kimenő éleinek negatív súlya.

A csomópont **szignifikanciája** a korrelációs hálózatban a műszaki követelmények súlyaiból és a ki- és be-fokszámok abszolút értékéből számítható ki. Abszolút

értékre azért van szükség, mert az élek nagysága nem tűnik el az összeadás során. A többi képletben erre a célra minden negatív súlyozott fok abszolút értékben van meghatározva. A szignifikancia érték mutatja meg a csomópont integrált szerepét a korrelációs hálózatban és a kapcsolódó ügyféligények fontosságát: minél nagyobb ez a szám, annál nagyobb a jelentősége. Egy műszaki követelmény szignifikanciájának számítása az alábbi egyenletben látható.

$$S_j = W_j \cdot w_1 D_j^+ \cdot w_2 D_j^+ \cdot |w_1 D_j^-| \cdot |w_2 D_j^-| \quad (21)$$

ahol  $S_j$  a j-edik műszaki követelmény szignifikanciáját jelenti,  $W_j$  a j-edik műszaki követelmény súlya,  $w_1 D_j^+$  és  $w_2 D_j^+$  a j-edik műszaki követelmény pozitív súlyozott be- és ki-fokszámai,  $w_1 D_j^-$  és  $w_2 D_j^-$  pedig a negatív súlyozott ki és be-fokszámai abszolút értékében. A kapott érték azonban nem jelzi, hogy az érték szignifikanciája pozitív vagy negatív hatással bír-e. Ezért érdemes ezt az értéket szétválasztani akár pozitív, akár negatív kapcsolatokra. A következő két egyenlet bemutatja, hogyan számítható ki egy csomópont pozitív és negatív szignifikanciája.

$$S_j^+ = W_j \cdot w_1 D_j^+ \cdot w_2 D_j^+ \quad (22)$$

ahol  $S_j^+$  a j-edik technikai követelmény pozitív jelentőségét jelenti, és a képletek tagjait ugyanazon logika szerint neveztem el, mint a szignifikancia esetében. Másrésztől,

$$S_j^- = W_j \cdot |w_1 D_j^-| \cdot |w_2 D_j^-| \quad (23)$$

ahol  $S_j^-$  a j-edik technikai követelmény negatív jelentőségét jelenti, és a képletek tagjait ugyanazon logika szerint neveztem el, mint a szignifikancia esetében. A két szignifikanciaérték összehasonlításával megállapíthatjuk, hogy a pozitív vagy a negatív kapcsolódás szignifikánsabb a hálózat egy csomópontjára vonatkozóan.

Emellett ezekben az esetekben is kimutatható, hogy a ki-vagy a be-fokszám értékek nagyobbak. Ennek kiszámításához a kutatás során meghatároztam az érzékenységet és a befolyást.

Az **érzékenység** azt mutatja meg, hogy egy csomópontra hogyan hatnak más csomópontok, a befolyásérték pedig azt, hogy egy csomópont milyen mértékben befolyásolja a többi csomópontot. Az alábbi egyenletből látható, hogy egy korrelációs hálózatban hogyan határozható meg egy csomópont érzékenysége.

$$Se_j = W_j \cdot |w_1 D_j| \quad (24)$$

ahol  $Se_j$  a j-edik műszaki követelmény érzékenységét jelenti,  $W_j$  a j-edik műszaki követelmény súlya,  $w_1 D_j$  pedig a j-edik műszaki követelmény súlyozott be-

fokszáma a korrelációs mátrixban. Minél nagyobb a súlyozott be-fok, annál érzékenyebb egy csomópont.

Az érzékenység a pozitív és negatív bejövő kapcsolatok esetében is megadható,

$$Se_j^+ = W_j \cdot w_1 D_j^+ \quad (25)$$

ahol  $Se_j^+$  a j-edik technikai követelmény pozitív érzékenységét jelenti, és a képletek tagjait ugyanazon logika szerint neveztem el, mint az érzékenységnél. Másrésztől,

$$Se_j^- = W_j \cdot |w_1 D_j^-| \quad (26)$$

ahol  $Se_j^-$  a j-edik technikai követelmény negatív érzékenységét jelenti, és a képletek tagjait ugyanazon logika szerint neveztem el, mint az érzékenységnél. A negatív érzékenység azért kiemelten fontos, mert a fejlesztésben ez az érték azt jelzi, hogy egy paraméter milyen erősen függ a többitől negatív értelemben.

Egy paraméter megváltoztatásának hatása szintén számszerűsíthető. Minél nagyobb egy csomópont befolyása, annál nagyobb hatással lesz a többi csomópontokra. Egy csúcs **befolyása** egy korrelációs mátrixban az egyenlet segítségével számítható ki az alábbiak szerint:

$$I_j = W_j \cdot |w_2 D_j| \quad (27)$$

ahol  $I_j$  a j-edik műszaki követelmény befolyását jelenti,  $W_j$  a j-edik műszaki követelmény súlya,  $w_2 D_j$  pedig a j-edik műszaki követelmény súlyozott ki-fokszáma a korrelációs mátrixban.

Ebben az esetben lényegesen számít, hogy a hatás mértéke pozitív vagy negatív. Ezért a pozitív és negatív hatásérték képletét az alábbiak szerint határoztam meg:

$$I_j^+ = W_j \cdot w_2 D_j^+ \quad (28)$$

ahol  $I_j^+$  a j-edik technikai követelmény pozitív befolyását jelenti, és a képletek tagjait ugyanazon logika szerint neveztem el, mint a befolyásnál. Ugyanakkor,

$$I_j^- = W_j \cdot |w_2 D_j^-| \quad (29)$$

ahol  $I_j^-$  a j-edik technikai követelmény negatív befolyását jelenti, és a képletek tagjait ugyanazon logika szerint neveztem el, mint a befolyásnál.

Összességében minél nagyobb a negatív hatás, annál több beállítást lehet rosszul módosítani a csomópontok helytelen megváltoztatásával. Ezért a technikai követelmény megváltoztatása előtt érdemes ebből a szempontból is megvizsgálni a befolyás értékét.

### 7.3 Esettanulmány

A fent ismertetett javasolt módszer hatékonyságának igazolására megvizsgáltam a CNC gépekkel és a kapcsolódó műszaki paraméterekkel kapcsolatos vásárlói elvárásokat. Kérdőív segítségével a vevői igényeket a különböző ügyfelekre kiterjedő páros összehasonlítás segítségével értékeltem. A vevői követelményeket, és szimbólumaikat a 15. táblázat tartalmazza az áttekinthetőbb hálózatabbrázolás érdekében. A CNC gépek műszaki paramétereit és jeleit a 16. táblázat tartalmazza.

#### 15. Táblázat: CNC gépekkel kapcsolatos vevői igények

Vevői követelmények	
Produktivitás	A
A fő egységek megbízhatósága	B
Munkaterület mérete	C
Szerszámtár mérete	D
Technológiai egyetemesség	E
Kimenetek	F
Elérhető méretpontosság	G
A megmunkálható anyagok sokfélesége	H
Ergonómia	I
Könnyű karbantartás	J
A munkadarabok és szerszámok egyszerű mérése	K
A fő egységek biztonsága	L
Az üzemeltető személyzet biztonsága	M
Ár	N
Felületi minőség	O

## 16. Táblázat: CNC gépekhez tartozó műszaki követelmények

Műszaki paraméterek	
A teljesítményt szervomotor biztosítja	a
Gyors pozicionálási sebesség	b
Interpolációs sebesség	c
Ütés a szerszám befogása miatt	d
Munkadarab mérési ideje	e
A szerszámparaméter mérésének ideje	f
A fő egység élettartama	g
Mozgástartomány az adott tengely mentén	h
A szerszámtárba behelyezhető szerszámok száma	i
Szerszámtárba helyezhető legnagyobb burkolatméretekkel rendelkező szerszám	j
A rendelkezésre álló technológiák száma	k
A rendelkezésre álló kimeneti portok száma	l
Motor felbontás	m
Kilométerszámláló rendszer felbontása	n
A gép vibrációja és merevsége	o
Karbantartási idő	p
A rendszeres karbantartás gyakorisága	q
A bevonóanyag minősége	r
A szerelhető munkadarab maximális súlya	s
CNC szerszámgép terület	t
Monitoring rendszer alkalmazott	v

### 7.3.1 Vevői követelmények súlya

A vevői elvárásokra vonatkozó kérdőívet hálózatkutatás segítségével értékeltem ki, és az eredmény alapján számítottam ki a fontosságot. A vevői igények fontosságát a hálózatban lévő csúcs súlyozott be-fokszám és PageRank értékével határoztam meg. A műszaki paraméterek súlyát az egyenlet segítségével számítottam ki, amelyet a hagyományos QFD módszerben használnak. A súlyozott be-fokszám

szerinti eredményeket, a kapcsolati mátrixot és a technikai paraméterek súlyozását a 14. táblázat tartalmazza. Munkám során a már korábban bemutatott 1-2-3 skálával dolgoztam, de bármilyen más skála is alkalmazható az értékelés során. A követelmények közötti kapcsolatot 1-től 3-ig terjedő tartományban határoztam meg. Ha nincs kapcsolat, akkor a 17. és 18. táblázatban a táblázat erre vonatkozó része üres.

**17. Táblázat: Vevői igények fontossági értékei súlyozott be-fokszám értékek alapján, kapcsolati mátrix eredményei és műszaki paraméterek súlya a súlyozott be-fokszám alapján. A követelmények közötti kapcsolat 1-3-ig terjednek, ahol üres a cella, ott nincs kapcsolat.**

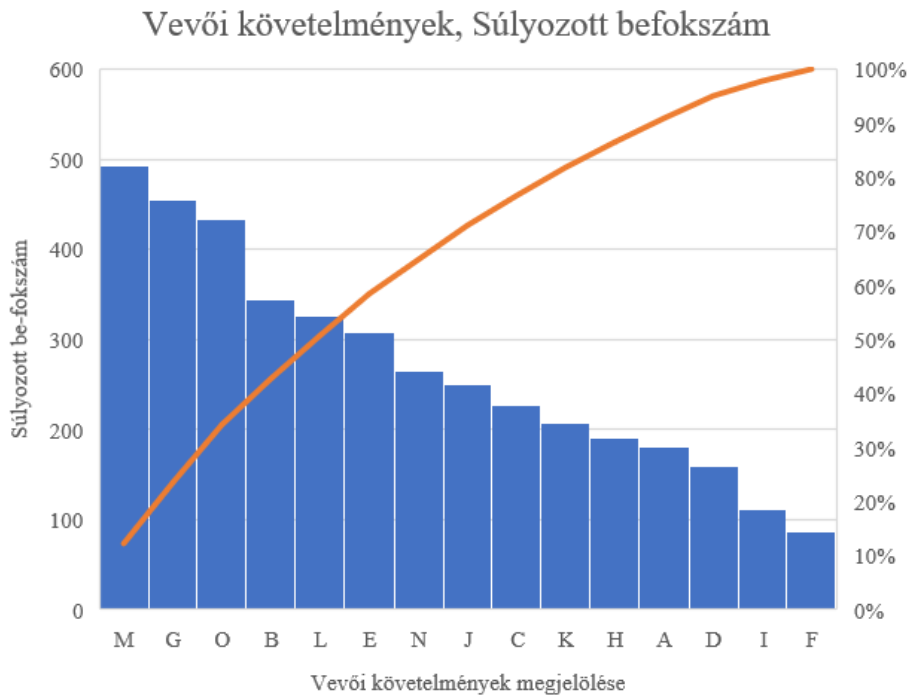
weighted in-degree	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	v
A 181	3	3	3	2	2	2	1	1	2	3					2	1	1				3
B 345							3								1	2	3				1
C 227					2	1		3	1		1					1			2	3	
D 160	2			1		2			3	3	1					1				1	
E 308	1							1	1	2	3					2	1				2
F 87												3									
G 456			1	3									3	3	2						
H 191	2								1	1									2		
I 112								2	1							2		3	1	2	1
J 251							2	2	1	1						3					
K 208		1		2	3	3		2	1	1											
L 327		2		1																	3
M 493		1																			2
N 265	3	1	1	1			3	3	2	1	3	1	2	1	2			2	1	3	2
O 434			2	3									1	1	3						
$W_i$	2348	2163	2132	4200	1440	1533	2513	3107	2669	2554	2106	526	2332	2067	3451	2851	1524	2345	1213	1860	4113

A PageRank eredmények, a kapcsolati mátrix és a technikai paraméterek súlyozása az 18. táblázatban látható.

**18. Táblázat Vevői igények fontossági értékei PageRank értékek alapján, kapcsolati mátrix eredményei és műszaki paraméterek súlya a PageRank eredmények alapján. A követelmények közötti kapcsolat 1-3-ig terjednek, ahol üres a cella, ott nincs kapcsolat.**

PageRank	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	v
A 0.049446	3	3	3	2	2	2	1	1	2	3					2	1	1				3
B 0.081431							3								1	2	3				1
C 0.057611					2	1		3	1		1					1			2	3	
D 0.039977	2			1		2			3	3	1					1				1	
E 0.066781	1							1	1	2	3					2	1				2
F 0.025376												3									
G 0.110861			1	3									3	3	2						
H 0.043937	2								1	1									2		
I 0.033433								2	1							2		3	1	2	1
J 0.056073							2	2	1	1						3					
K 0.048064		1		2	3	3		2	1	1											3
L 0.084286		2		1																	
M 0.133865		1																			2
N 0.071557	3	1	1	1			3	3	2	1	3	1	2	1	2			3	1	3	2
O 0.097303			2	3									1	1	3						
$W_i$	0.598	0.57	0.525	1.015	0.358	0.381	0.621	0.779	0.668	0.622	0.513	0.148	0.573	0.501	0.837	0.679	0.361	0.645	0.308	0.494	1.061

A súlyozott be-fokszám rangsorát és a PageRank szerinti értékeket a 14. és 15. ábra mutatja.



14. Ábra: A vevői igények súlyozott be-fokszámokénti Pareto elemzése.



15. Ábra: A vevői igények PageRank számának Pareto elemzése.

A diagramok alapján megállapítható, hogy a két számítás rangsorában nem látszik számottevő különbség. A vevői igények B, L, N, E, C, J, A és K rangsorolásában kis különbség mutatkozik. Az első három legfontosabb követelmény, azaz M, G és O sorrendje megegyezik.

### 7.3.2 Korrelációs mátrix

A -3, -2 és 2, 3 műszaki paraméterek közötti összefüggést, valamint a kapcsolatok irányát a 19. táblázatban szereplő korrelációs mátrixban határoztam meg. Az 1 és -1 értékeket elhagytam, így a későbbi számításoknál, ahol a szignifikancia, az érzékenység és a befolyás értékek vannak meghatározva, ezek az értékek üres



cellákként jelennek meg. Az értékeket azért hagytam el, mert a végső értékelésben nem játszanak szerepet. A +,- értékek a fejlesztés irányait jelölik.

**19. Táblázat: Korrelációs mátrix, ami tartalmazza a műszaki követelmények közötti korrelációt.**

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	v
a	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	+
b	2																				
c	2																				
d	-2	-3	-2																		
e		3																			
f		3																			
g				2																	
h																					
i																					
j	2								2												
k										2											
l											2										
m												2									
n															3						
o	-2	-2	-2	2						-2	-2			2							
p										-2	-2	-2									
q				2			3									3					
r																					
s	2																				
t										-3	-2	-2									-2
v												-2									

A hagyományos QFD-ben ez a korrelációs elemzés nem része a fontossági súly kiszámításának.

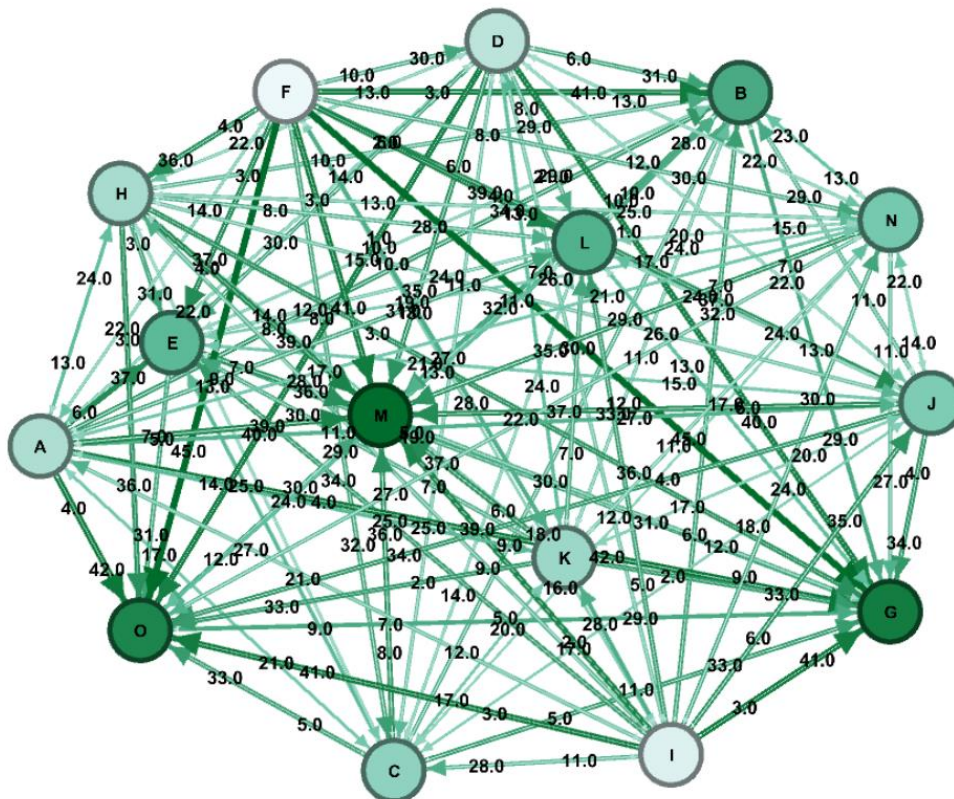
#### 7.4 Az eredmények kiértékelése hálózatokkal

A következőkben az esettanulmányon keresztül bemutatom, hogyan lehet a hálózatkutatót az eddig bemutatott QFD módszertan eredményeinek kiterjesztéseként alkalmazni.

##### 7.4.1 A vevői követelmények rangsorolása

A fent használt két hálózati paraméter, azaz a súlyozott be-fokszám és a PageRank újszerű megközelítést jelent a szubjektív értékítéletek páronkénti összehasonlításra alapuló elemzéséhez, ahogy az az előző fejezetekben bebizonyításra került.

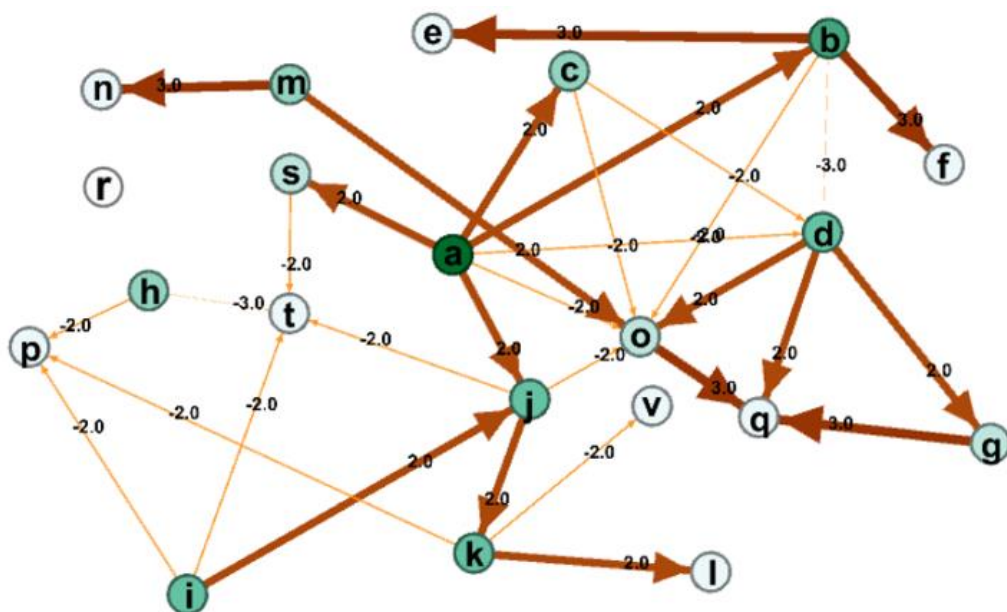
A kapcsolatok megjelenítésén keresztül láthatók a csomópontok közötti összsúlyok. A 16. ábra egyrészt a súlyozott be-fokszám értékek alapján mutatja be a csomópontok fontosságát, másrészt a vásárlói igények és az élek összesített súlya közötti preferencia összefüggéseket is megjeleníti. Minél sötétebb a csomópont színe, annál fontosabb a követelmény. Az élek színei jelzik a preferencia erősségét: minél sötétebb a szín, annál erősebb a kapcsolat.



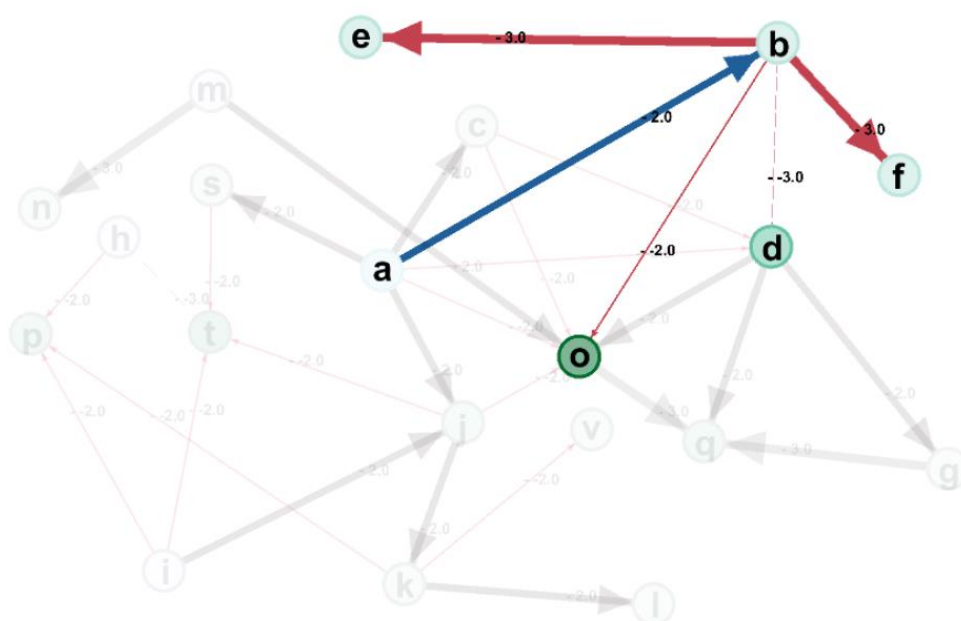
16. Ábra: Csúcsok jelentősége a súlyozott be-fokszám szerint.

#### 7.4.2 Korrelációs mátrix

A műszaki követelmények közötti összefüggések hálózatok segítségével is ábrázolhatók. A 17. ábrán a ki-fokszám értékelés látható a műszaki követelmények közötti korrelációs összefüggésekkel. Az élek értéke a kapcsolatok súlyát jelzi. A hálózatból jól látható, hogy számos műszaki paraméter alig érintett, mint például az „f” és az „e”. Az élek színe a negatív korreláció erősségét mutatja. Minél sötétebb a szín, annál erősebb a korreláció. A csomópontok színe azt is mutatja, hogy mennyire befolyásolják a paramétereket. A nagy ki-fokszám értékű paraméterek, mint például a „b” és „a”, nagyon erős hatást gyakorolnak több paraméterre. Továbbá a hálózatban nemcsak a párosított kapcsolatok, hanem egyéb hálózati tulajdonságok is láthatók. Az „r” technikai követelmény egy elszigetelt csúcs, mivel nincs kapcsolata. A hálózatban hatás-láncok is vizsgálhatók, amelyek értékelési hibákat is feltárhatnak. Például az „i” a „j”-t, a „j” pedig a „k”-t érinti, és ez feltételezi, hogy az „i” és a „k” között is kapcsolatnak kell lennie. A hálózatban inkonzisztens körök is lehetnek: inkonzisztens korrelációt mutatnak, ha  $n \geq 3$ . Erre azonban nem található példa a hálózatban. A hálózat egy csomópontjának kimenő és bejövő élei is jól láthatóak, amint a 18. ábrán látható. A kék nyilak a bejövő kapcsolatokat, a piros nyilak pedig a kimenő kapcsolatokat jelzik. És a páronkénti kapcsolatokon kívül más hálózati tulajdonságok is megjeleníthetők a grafikon segítségével, az alábbiak szerint.



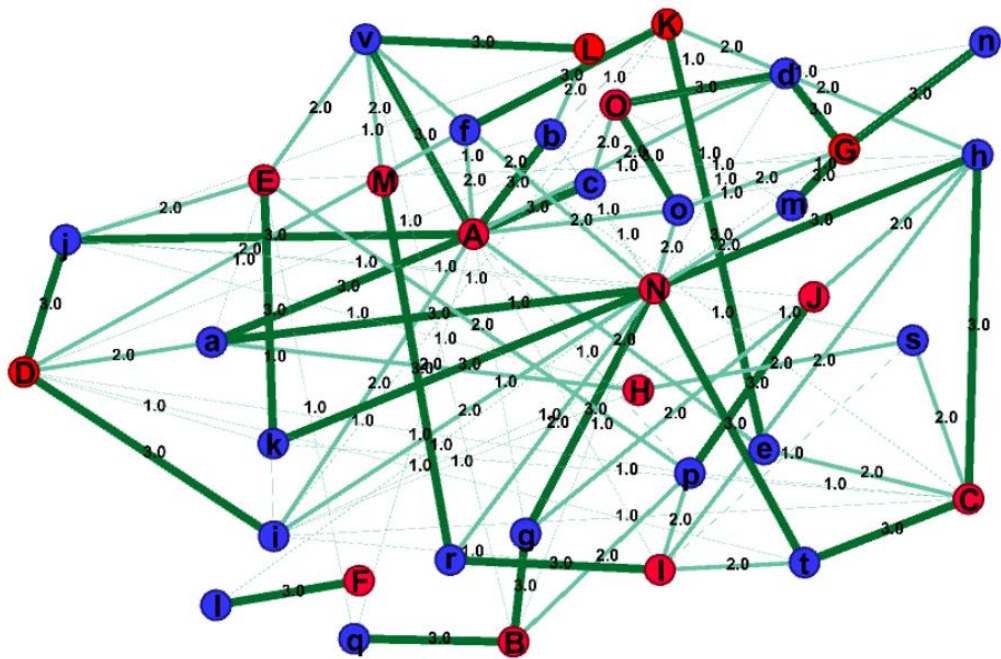
17. Ábra: Korrelációs kapcsolat a műszaki paraméterek között.



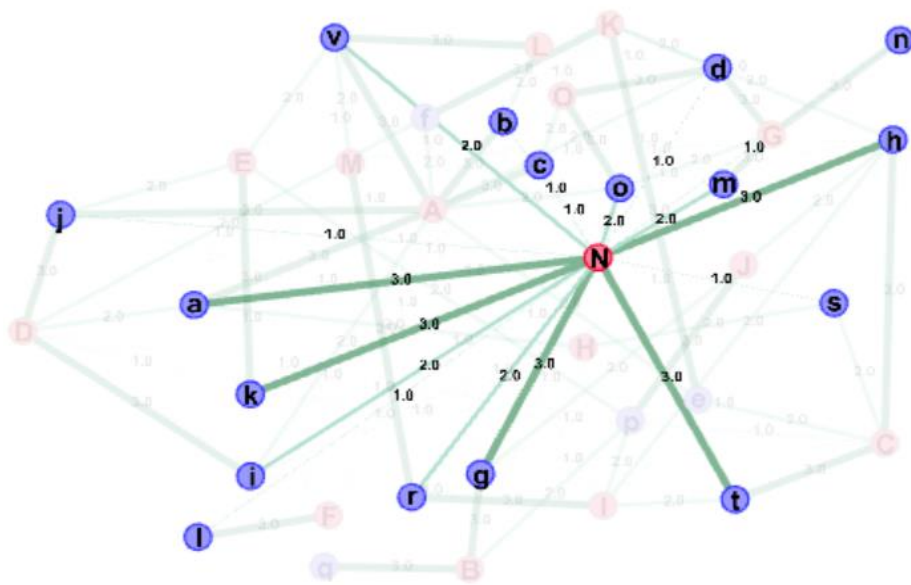
18. Ábra: A hálózati modellezés megkönnyíti a kimenő és bejövő kapcsolatokat csomópontjainak bemutatását.

#### 7.4.3 Kapcsolati mátrix

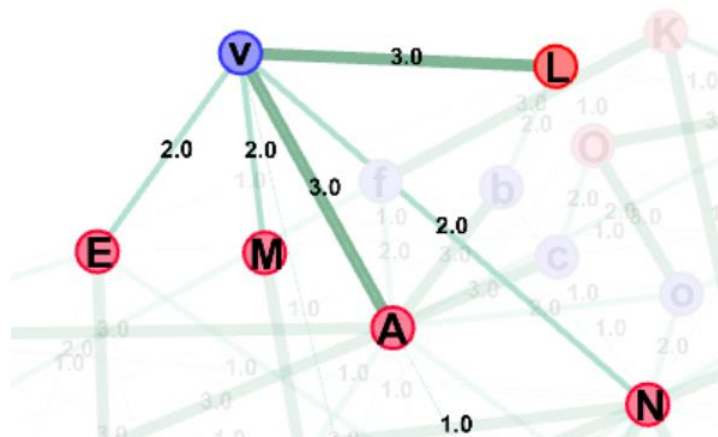
A QFD kiértékelés kapcsolati mátrixa hálózat formájában is ábrázolható. Ebben az esetben a hálózat irányítatlansága miatt a csomópontok súlyozott fokszáma a súlyozott kapcsolatok számát, az élek színintenzitása pedig a súlyok nagyságát mutatja a 19. ábrán látható módon. Ha egy műszaki paraméternek nincs kapcsolata, akkor ezt a QFD módszertanban egy üres oszlop jelöli. A műszaki paraméterekkel nem érintett ügyféligények között nincs él, ezért nem részei a hálózatnak, így a QFD-ben üres sorokként jelennek meg. Az alábbi ábrákon minden követelménynek van legalább egy kapcsolata, ezért az alábbi ábrák nem jelenítenek meg ilyen üres sorokat. Ahogy a 20. és 21. ábrán is látható, a hálózat egy csomópontjának kiválasztásával, például 'N', azonosítani tudjuk az adott csomópont kapcsolatait.



19. Ábra: Kapcsolati mátrix hálózatként ábrázolva: piros csomópontok jelzik az ügyfelek igényeit; A kék csomópontok a műszaki követelményeket mutatják.



20. Ábra: „N” csomópont kapcsolatai.



21. Ábra: A műszaki követelményt képviselő „v” csomópont kapcsolatai.

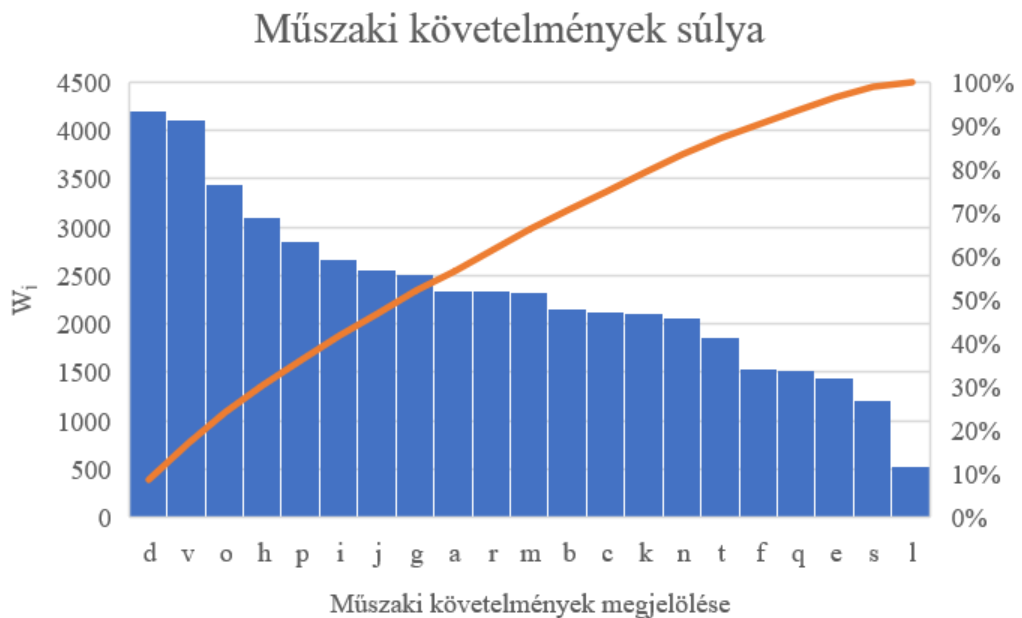
#### 7.4.4 A műszaki követelmények szerepe a hálózatban

A korábbi, 7.2 alfejezetben részletezett egyenletekből kiszámított eredményeket a 20. táblázat tartalmazza. A táblázat tartalmazza a műszaki követelmények jelentőségét, a pozitív és negatív hatások értelmezésére vonatkozó érzékenységi és befolyásolási értékeket, valamint a QFD módszer képlete alapján számított műszaki követelmények súlyait. Emellett a PageRank és be-fokszám segítségével számított hagyományos fontossági szám összes referenciaértéke is megjelenik a 19. táblázatban.

20. Táblázat A műszaki követelmények súlyai a korábban bemutatott képletek alapján.

ld	$W_j$ (súlyozott be- fokszám)	$W_j$ (PageRank)	$S_j^+$ (súlyozott be- fokszám)	$S_j^-$ (súlyozott be- fokszám)	$S_j^+$ (PageRank)	$S_j^-$ (PageRank)	$Se_j^+$ (súlyozott be- fokszám)	$Se_j^-$ (súlyozott be- fokszám)	$Se_j^+$ (PageRank)	$Se_j^-$ (PageRank)	$I_j^+$ (súlyozott be- fokszám)	$I_j^-$ (súlyozott be- fokszám)	$I_j^+$ (PageRank)	$I_j^-$ (PageRank)
a	2348	0.597618	18784	9392	4.780944	2.390472	2348	2348	0.597618	0.597618	18784	9392	4.780944	2.390472
b	2163	0.570396	25956	10815	6.844752	2.85198	4326	2163	1.140792	0.570396	12978	10815	3.422376	2.85198
c	2132	0.525362	4264	8528	1.050724	2.101448	4264	2132	1.050724	0.525362	2132	8528	0.525362	2.101448
d	4200	1.015332	25200	29400	6.091992	7.107324	4200	29400	1.015332	7.107324	25200	4200	6.091992	1.015332
e	1440	0.358306	4320	1440	1.074918	0.358306	4320	1440	1.074918	0.358306	1440	1440	0.358306	0.358306
f	1533	0.380649	4599	1533	1.141947	0.380649	4599	1533	1.141947	0.380649	1533	1533	0.380649	0.380649
g	2513	0.620556	15078	2513	3.723336	0.620556	5026	2513	1.241112	0.620556	7539	2513	1.861668	0.620556
h	3107	0.778871	3107	15535	0.778871	3.894355	3107	3107	0.778871	0.778871	3107	15535	0.778871	3.894355
i	2669	0.667836	5338	10676	1.335672	2.671344	2669	2669	0.667836	0.667836	5338	10676	1.335672	2.671344
j	2554	0.621462	20432	10216	4.971696	2.485848	10216	2554	2.485848	0.621462	5108	10216	1.242924	2.485848
k	2106	0.512602	8424	8424	2.050408	2.050408	4212	2106	1.025204	0.512602	4212	8424	1.025204	2.050408
l	526	0.147685	1052	526	0.29537	0.147685	1052	526	0.29537	0.147685	526	526	0.147685	0.147685
m	2332	0.573	11660	2332	2.865	0.573	2332	2332	0.573	0.573	11660	2332	2.865	0.573
n	2067	0.501443	6201	2067	1.504329	0.501443	6201	2067	1.504329	0.501443	2067	2067	0.501443	0.501443
o	3451	0.837068	41412	27608	10.044816	6.696544	13804	27608	3.348272	6.696544	10353	3451	2.511204	0.837068
p	2851	0.678543	22808	17106	5.428344	4.071258	22808	17106	5.428344	4.071258	2851	2851	0.678543	0.678543
q	1524	0.36052	1524	1524	0.36052	0.36052	1524	1524	0.36052	0.36052	1524	1524	0.36052	0.36052
r	2345	0.645008	2345	2345	0.645008	0.645008	2345	2345	0.645008	0.645008	2345	2345	0.645008	0.645008
s	1213	0.308086	2426	2426	0.616172	0.616172	2426	1213	0.616172	0.308086	1213	2426	0.308086	0.616172
t	1860	0.494347	1860	16740	0.494347	4.449123	1860	16740	0.494347	4.449123	1860	1860	0.494347	0.494347
v	4113	1.060466	4113	8226	1.060466	2.120932	4113	8226	1.060466	2.120932	4113	4113	1.060466	1.060466

A következőkben az eredményeket rangsoroltam: minden esetben a súlyozott befokszám értékek segítségével számított értékeket mutatom be. A műszaki követelmények súlyait a 22. ábra mutatja.



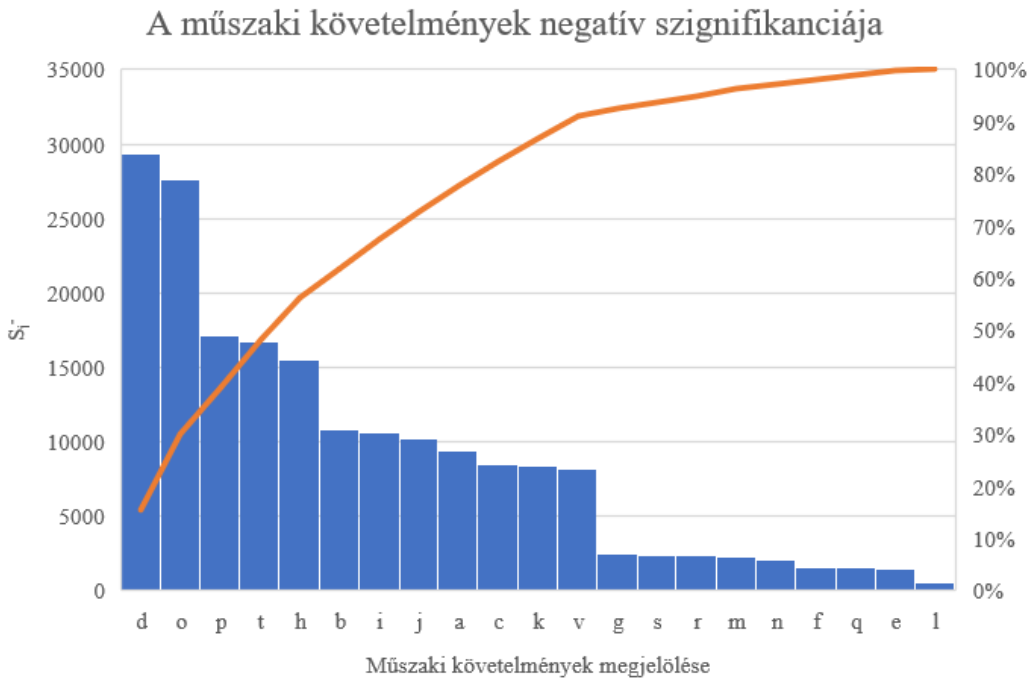
22. Ábra: A műszaki követelmények súlyainak Pareto elemzése a hagyományos QFD módszer képlete alapján.

A QFD analízis eredményei alapján a legnagyobb súllyal bíró paraméterek a 'd', 'v' és 'o'. Ezek az értékek azonban nem tartalmazzák a műszaki követelmények korrelációs összefüggéseit. Emiatt az eredményekből nem derül ki, hogy ezek a paraméterek milyen változásokat okoznak. A műszaki követelmények pozitív jelentőségét viszont a 23. ábra mutatja.



23. Ábra: A műszaki követelmények pozitív szignifikanciájának Pareto elemzése.

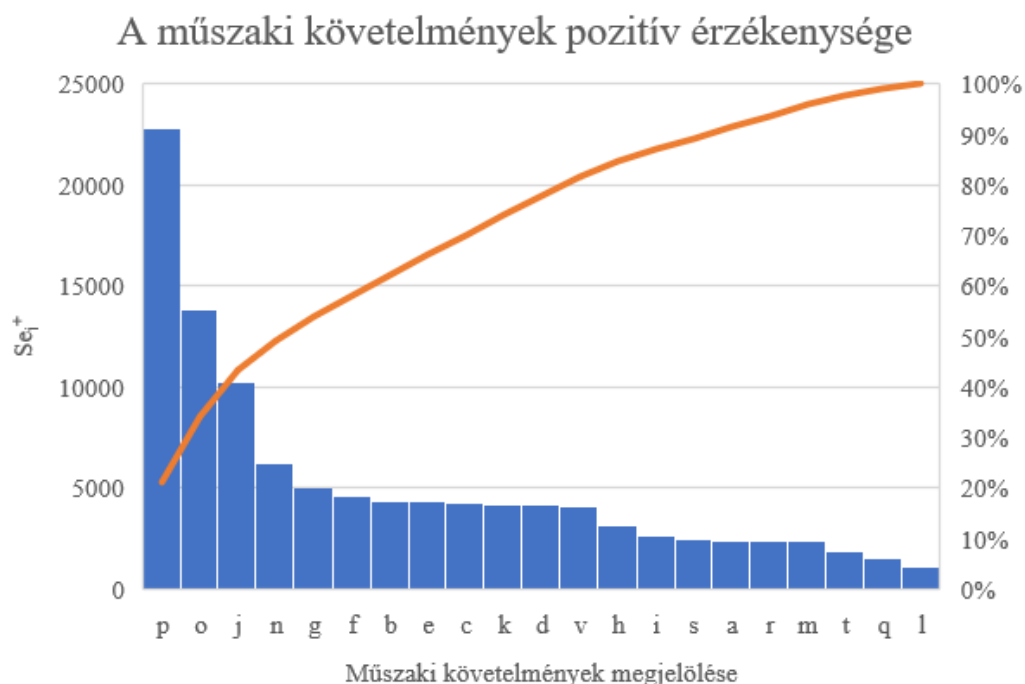
A műszaki követelmények pozitív szignifikancia-elemzése szerint a hálózatban az „o”, „b” és „d” paramétereknek van a legnagyobb jelentősége. Ezeket a paramétereket javítani érdemes, mert ezeknek a paramétereknek a javítása más paraméterek értékeit is javítja, így a termék összességében jobb minőségű lesz. A követelmények negatív jelentőségét és azok Pareto elemzését a 24. ábra mutatja.



24. Ábra: A műszaki követelmények negatív jelentőségének Pareto elemzése.

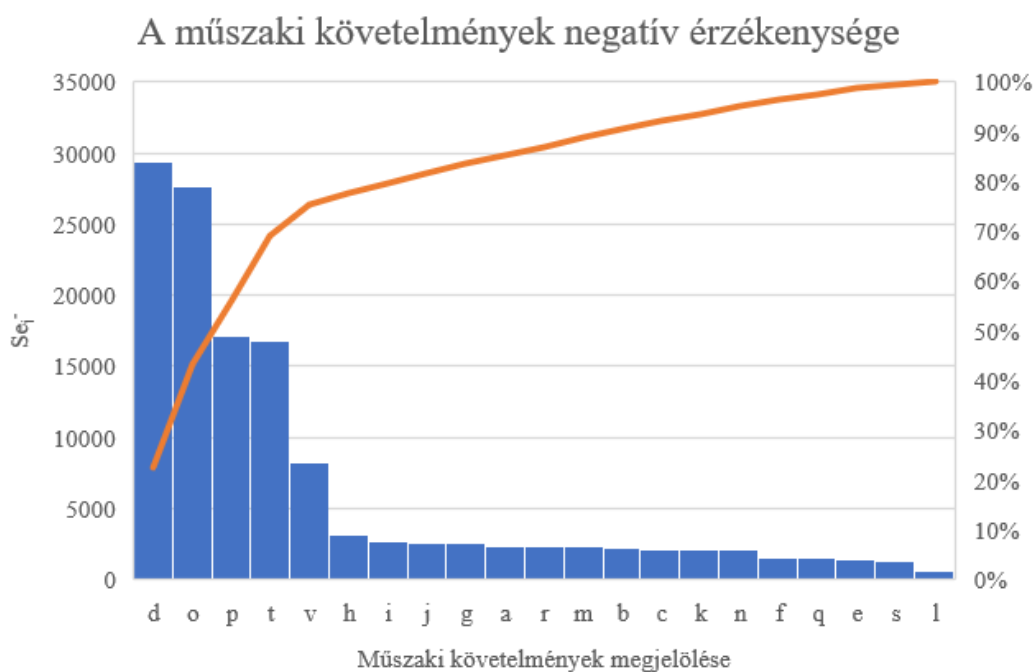
A 'd', 'o' és 'p' paramétereknek van a legnagyobb negatív jelentősége, ami a szerszám befogásának, a gép vibrációjának és merevségének, valamint a karbantartási időnek köszönhető. Valójában az első kettő már az előző értékelésben is megjelent a legjelentősebb pozitív paraméterként. Ha összehasonlítjuk a diagramon látható adatokat, megállapíthatjuk, hogy a géprezgés és a merevség pozitív jelentősége nagyobb, mint a negatívé. A szerszám befogás miatti ütés negatív jelentősége valamivel nagyobb, mint annak pozitív jelentősége. Emiatt ezeknek a paramétereknek a fejlesztését nagyon körültekintően kell végezni, és ezzel kapcsolatban a következőket is fel kell mérni: mely csomópontokat rontja el a fejlesztés, mely vásárlói elvárásokhoz kapcsolódik az adott fejlesztés, és mennyi fontosak ezek az ügyfelek igényei szempontjából. A következtetésekre vonatkozó információk a fent leírt kapcsolati és korrelációs mátrixokból nyerhetők. A 25. ábra a műszaki paraméterek pozitív érzékenységének Pareto-analízisét mutatja be.





25. Ábra: A műszaki követelmények pozitív érzékenységének Pareto elemzése.

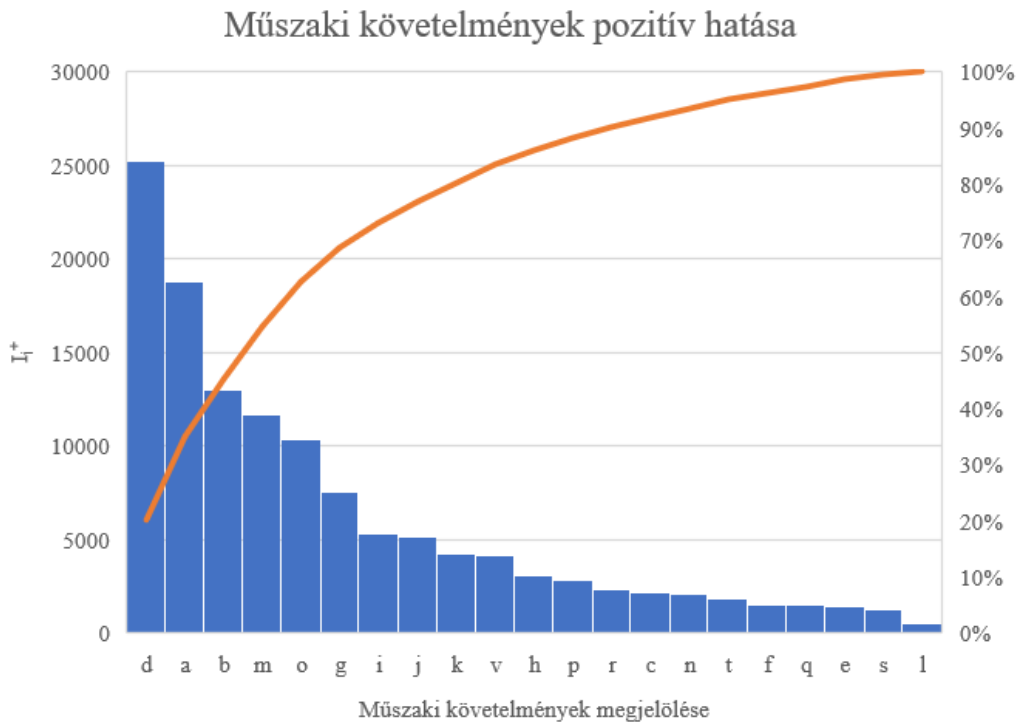
A „d”, „v” és „o” paraméterek a legpozitívabb érzékenységgel rendelkeznek. Ezeket a paramétereket pozitívan befolyásolják más paraméterek változásai. A csomópontok egyik előnyös tulajdonsága a nagy pozitív érzékenysége, ami azt jelenti, hogy nem fog könnyen tönkremenni. Másrészt az érzékenységvizsgálat másik része a negatív bejövő kapcsolatok vizsgálatára vonatkozik. A negatív érzékenység Pareto-analízise a 26. ábrán látható.



26. Ábra: A műszaki követelmények negatív érzékenységének Pareto elemzése.

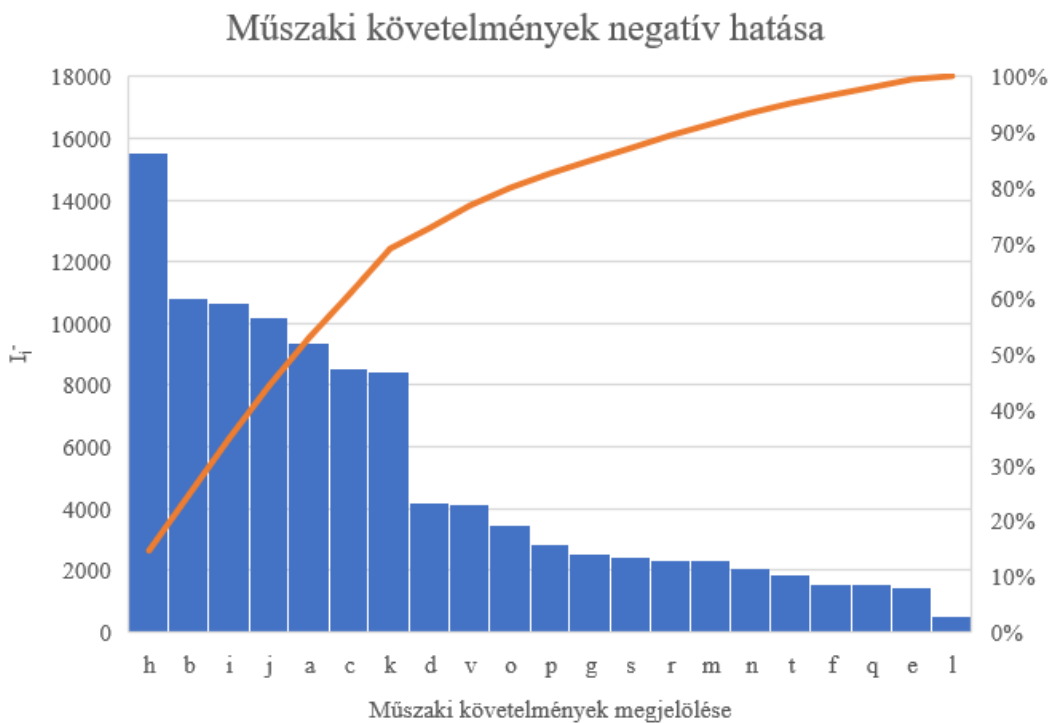
A „d”, „o” és „p” paraméterek a legnagyobb negatív érzékenységgel rendelkeznek. Ezt a szerszám befogása, a gép vibrációja és merevsége, valamint a karbantartási idő okozza. Az ütési paraméterek negatív érzékenysége a szerszám befogásából és a gép vibrációjából eredően kisebb, mint a pozitív érzékenységük. Ennek kapcsán

érdeemes megvizsgálni, hogy ezek a paraméterek mely vevői igényeket érintik, mert könnyen veszélyeztethetik a vevői igények teljesítését és a vevői elégedettséget. A műszaki paraméterek pozitív hatását a 27. ábra mutatja.



27. Ábra: A műszaki követelmények pozitív hatásának Pareto elemzése.

A legnagyobb pozitív hatású paraméterek a 'd', 'a' és 'b'. Ha ezeket a paramétereket javítjuk, akkor több más paraméterre is pozitív hatással lesznek. Valójában ezeknek a paramétereknek a kialakítása jótékony hatással lehet az egész termék minőségére. A műszaki követelmények negatív hatásának Pareto-elemzése a 28. ábrán látható.



28. Ábra: A műszaki követelmények negatív hatásának Pareto elemzése.

A 'h', 'b' és 'i' paraméterek a legnagyobb negatív hatásértékekhez tartoznak, és magukban foglalják az adott tengely mentén történő mozgást, a gyors pozicionálási sebességet és a szerszámtárba behelyezhető szerszámok számát. Ezeknek a paramétereknek a megváltoztatása nem javasolt, mert a változtatások sok más paramétert hátrányosan érintenek. A szerszámbefogás, a géprezgés, a merevség és az alkalmazott ellenőrző rendszer több esetben is fontos követelménynek bizonyult, de a paraméterek kisebb negatív hatást mutatnak. Ezért fejlesztésükre csak további vizsgálat után kerülhet sor.

## 7.5 Eredmények

A kidolgozott új módszer alátámasztotta azt a hipotézisemet, hogy a QFD módszertan eszköztára hálózatkutatással bővíthető, mivel számos új egyenlet került kialakításra, amelyek további elemzési lehetőségeket biztosítanak. Ezek az eredmények jobban alátámaszthatják a fejlesztéseket. Tizenhárom új képletet fejlesztettem ki különböző szempontok szerint, például, hogy mennyire jelentős egy műszaki paraméter attól függően, hogy a többi paraméter mennyire befolyásolja. A kidolgozott módszertan a hagyományos QFD-hez hasonlóan bármely fejlesztési területre alkalmazható, azonban a hálózatkutatás bevezetésével jobban összekapcsolható az Ipar 4.0 és a Minőség 4.0 fejlesztésekkel, hiszen nagyobb adathalmaz feldolgozása is lehetséges.

Összefoglalva, a jelen fejezetben bemutatott módszertan első lépése a vevői igények jelentőségének felmérése volt, amelyhez preferenciahálózatot hoztam létre. A preferenciahálózatból az ügyfelek igényeit két tényező alapján rangsoroltam: PageRank és súlyozott be-fokszám. A hálózatkutatás segítségével a nagyszámú kérdőívből kinyert adatok könnyen kiértékelhetők és hálózat formájában vizuálisan is megjeleníthetők. A hálózat megjeleníti a kapcsolatokat is, ami megkönnyíti az ilyen kapcsolatok megértését. A jelen fejezet keretein belül bemutatott kutatásban a PageRank értékének és a súlyozott be-fokszámnak a használatával, valamint a vizualizációs lehetőségekkel új módszert kínál a kérdőívek értékelésére. Ezen túlmenően a műszaki követelmények is kiértékelhetők a hálózattal. Ezért a műszaki követelmények hálózati értékelése jelentős szerepet tölt be a további következtetések megfogalmazásában. A hagyományos QFD módszertan nem használja fel a korrelációs hálózatból származó adatokat. Ez azonban a hálózatkutatással többféleképpen is lehetséges. A javasolt módszerrel a műszaki követelmények új értékelését hoztam létre. Az új módszerrel összhangban a paraméterek kiválasztása nem kizárólag a kapcsolati mátrix fontossága vagy a vevői igények alapján történik. Továbbá a vizualizáció révén a korrelációs hálózat és a kapcsolati háló segíthet feltárni és megvizsgálni a

csomópontok közötti kapcsolatokat. Mindemellett a hálózatokkal a negatív kapcsolatok is értékelhetők.

*A kutatás után tehát levonható az a következtetés, hogy a QFD módszertan eszköztára a hálózatkutatással kiterjeszhető.*

- 1. Bebizonyítottam, hogy a szignifikancia megadásával a QFD módszertanban a műszaki paraméter fontosság értéke korrigálható a műszaki paraméter korrelációs hálózatban betöltött szerepével.*
- 2. Bebizonyítottam, hogy a hálózat elemzés és modellezés használatával értékelhető, hogy egy műszaki paraméter változtatása hogyan befolyásolja a többi műszaki paraméter értékét.*
- 3. Bebizonyítottam, hogy a hálózat elemzés és modellezés használatával értékelhető, hogy egy műszaki paraméter értékét hogyan befolyásolja a többi műszaki paraméter változtatása.*

## **8. FMEA módszertan kiterjesztése hálózatokkal**

Felismerve a kockázatértékelés fontosságát és a hálózatok kutatás nagyarányú ipari elterjedését, új megközelítést dolgoztam ki a kockázatértékelést tekintve.

### **8.1 Probléma megfogalmazása**

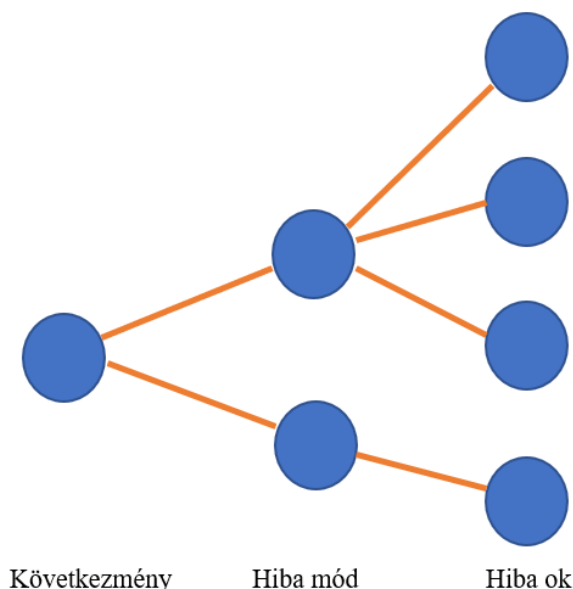
A hagyományos kockázatértékelés a kockázatokat csak a hiba okok oldaláról közelíti meg. Az előfordulási és észlelhetőségi elemzést csak a hiba okokra végzi el. Hipotézisem, hogy a hagyományos FMEA módszertannal ellentétben az előfordulási gyakoriságot és a fellelhetőséget nemcsak az okok, hanem a hatások szintjén is értékelhetjük. Mindezt a hálózatok kutatási módszertan eszköztárával egészítettem ki. Az új módszertan egy valós iparági példán keresztül érvényesül, amely egy csavarhúzóállomás kockázatértékelése. A kockázatértékelés egy gépi FMEA, amely megvizsgálja a mechanikai meghibásodás lehetőségét és annak a kezelőre gyakorolt hatásait. A módszer fejlesztésénél szintén szempont volt, hogy az ipari gyakorlatban könnyen alkalmazható módszert hozzak létre.

Az FMEA a meghibásodási háló tetején értékeli a súlyosságot, ahol a hatások kerülnek elhelyezésre. Az előfordulási és észlelési értékeket sorra a kiváltó okoknál értékelik, a legalacsonyabb szinten. Ilyenkor egyáltalán nem értékelik a hatásoknál ezeket a tényezőket, hogy milyen gyakran fordulnak elő, mennyire észlelhetők. A hibamódokat egyáltalán nem értékelik, és az okok súlyosságát sem. A kockázatok közötti kapcsolat tehát nem kerül értékelés alá a módszer szerint.

Hipotézisem, hogy a hatás bekövetkezésének valószínűsége abból származtatható, hogy az azt kiváltó események milyen gyakorisággal fordulnak elő és milyen eséllyel észlelhetők. Egy hatásnak több módja és több oka is lehet. Ezzel a jelenlegi FMEA módszertan értékelési skálája kiterjeszhető lehet. A hálózatok kutatás alkalmazásával nagyobb adathalmazt is fel tudunk dolgozni.

### **8.2 Az új RPN érték kiszámítása**

Az új megközelítésű fontosságértékelés lényege, hogy ne csak a hatás súlyosságát vizsgáljuk, hanem azt is, hogy mi előzi meg annak bekövetkezését. Nemcsak az számít, hogy milyen súlyos a hatás, amikor bekövetkezik, hanem az is, hogy milyen valószínűséggel fordul elő. Ennek meghatározásához meg kell vizsgálnunk, hogy hány gyökér oknak van hatása a hálózatban, és mekkora az esélye annak, hogy észreveszik vagy előfordulnak. A 29. ábra a hatás észlelési valószínűségét mutatja egy hibahálóban, amely egy következményből indul ki és az okokban végződik.



29. Ábra A meghibásodási háló tartalmazza az alábbi szinteket: következmény, hiba mód, hiba ok. [forrás: saját munka]

Az alábbiakban bemutatásra kerülnek azok az egyenletek, amelyekkel egy következmény bekövetkezésének valószínűsége, és észlelésének valószínűsége értékelhető.

$$C_o = \sum_{i=1}^n O_i, \quad (30)$$

ahol  $C_o$  egy következmény bekövetkezésének valószínűsége, és  $O_i$  az  $i$ -edik meghibásodási csomópont előfordulásának valószínűsége.

$$C_D = \sum_{i=1}^n D_i, \quad (31)$$

ahol  $C_D$  egy hatás észlelésének valószínűsége,  $D_i$  az  $i$ -edik meghibásodási csomópont észlelésének valószínűsége. A  $C_o$  és  $C_D$  értékeket a súlyozott befokszám alapján számítottam ki. Minél később vesszünk észre egy problémát a folyamat során, annál súlyosabbak a hatások, ezért súlyozásra van szükség.

$$IC = C_s \cdot C_o \cdot C_D, \quad (32)$$

ahol az  $IC$  a hatás fontosságát, a  $C_s$  a hatás súlyosságát, a  $C_o$  a hatás bekövetkezésének valószínűségét, a  $C_D$  pedig a hatás észlelésének valószínűségét jelenti. A súlyosságot az alap FMEA módszerhez hasonlóan kell meghatározni. A hatás fontossága azt jelenti, hogy a következmény mennyire súlyos az ügyfélre nézve.

### 8.3 Esettanulmány

A módszert egy csavarozóállomás gyártósor már általam elkészített FMEA-jára alkalmaztam. A hálózatokat a kockázatértékelés eredményeiből építettem fel, a

következményekre a kockázati tényezőket a már bemutatott képletek alapján számítottuk ki. Ebben a fejezetben a kidolgozott módszer alkalmazási lehetőségeit mutatom be.

Az alkalmazási példa egy olyan gyártósorra vonatkozik, amelyen autóülésvázat gyártanak. A kockázatértékelés itt arra irányult, hogy a gyártósor megfelel-e a vele szemben támasztott követelményeknek baleset-megelőzési, termékvédelmi és ergonómiai szempontból. 40 funkcióhoz 46 következményt, 41 hibamódot és 40 hibaokot határoztam meg. Természetesen ezek között lehetnek átfedések, ugyanazok a hibák több hibamódot és hatásért is felelősek. Ennek eredményeként 16 különböző hatást, 34 különböző hibamódot és 6 különböző hibaokot határoztak meg. A 16 különböző hatást a 21. táblázat tartalmazza.

**21. Táblázat: A csavarozóállomás meghibásodásának 16 következményének leírása.**

<b>ID</b>	<b>A hatás leírása</b>
C1	A kezelő megsérül forgalom közben
C2	A kezelő hosszú távon megsérül
C3	A feladat elvégzéséhez szükséges idő hosszú
C4	A berendezés kialakítása megnehezíti a kezelő munkáját
C5	Nem megfelelő karbantartás
C6	A kezelő nem látja megfelelően a vizuális egységen megjelenő információkat
C7	A vezeték elszakad
C8	Csavarozási hiba
C9	A csavarozás nem indul el
C10	A szállítószalag nem tudja szállítani a terméket
C11	Csökkent koncentrációs képesség
C12	Halláskárosodás
C13	Áramütés éri a kezelőt
C14	A berendezés sérült
C15	A kezelő égési sérüléseket szenved
C16	A kezelő megsérül munka közben

A kiértékelés után a hatások észlelhetőségének értékeit a 22. táblázat, a hatások előfordulási értékeit a 23. táblázat, a hatások súlyossági értékeit a 24. táblázat, a hatások fontosságát a 25. táblázat tartalmazza.

22. Táblázat A következmények észlelése ( $C_D$ ) a korábbi események száma és észlelési értékei alapján.

<b>ID</b>	<b><math>C_D</math></b>
C1	17
C2	38
C3	3
C4	38
C5	3
C6	29
C7	4
C8	4
C9	10
C10	8
C11	6
C12	7
C13	4
C14	2
C15	3
C16	26

23. Táblázat A következmények előfordulása ( $C_O$ ) az előző esemény száma és előfordulási értéke alapján.

<b>ID</b>	<b><math>C_O</math></b>
C2	42
C4	42
C6	41
C16	41
C1	23
C10	9
C9	8
C15	7
C3	6
C13	6
C14	5
C5	4
C7	4
C8	4
C11	4
C12	4



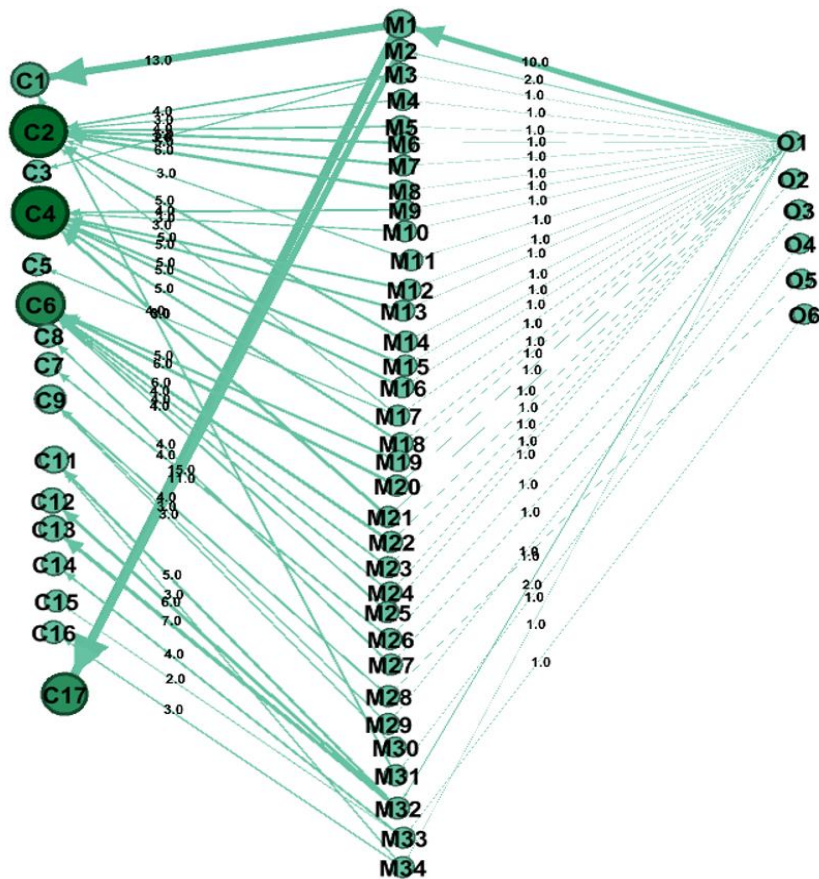
**24. Táblázat A következmények súlyossága ( $C_s$ ) a korábbi események száma és előfordulási értékei alapján.**

<b>ID</b>	<b><math>C_s</math></b>
C13	10
C1	9
C2	9
C12	9
C15	9
C16	9
C1	9
C5	7
C11	7
C14	7
C6	6
C10	6
C3	5
C4	5
C7	4
C8	4
C9	3

**25. Táblázat A következmények jelentősége (IC)**

<b>ID</b>	<b>IC</b>
C2	14364
C16	9594
C4	7980
C6	7134
C1	3519
C10	432
C12	252
C9	240
C13	240
C15	189
C11	168
C3	90
C5	84
C14	70
C7	64
C8	64

A 30. ábra az eredményekből kialakított hálózatot mutatja. Minél nagyobb a kockázat mértéke, annál nagyobb a csomópont, és minél nagyobb az O és D mutató értéke, annál nagyobb az élek mérete.



30. Ábra: Az észlelési hibahálózat az, ahol a hatások, módok, okok és ezek összefüggései láthatók.

A következmények fontossága alapján úgy tűnik, hogy a C2 következmény volt a legjelentősebb az értékelés során.

Mi ebben az esetben a következmény jelentősége?

- Sok esemény lehet felelős a bekövetkezéséért.
- A megelőző eseményeket valószínűleg nehéz észlelni.
- Megelőző események bekövetkezése várható.

Az eredmények rangsorolása alapján a példában ez egy olyan rendszer, ahol nagy az esély arra, hogy hosszú távon megsérül a kezelő. Ez önmagában is nagy kockázat 9-es súlyossági értékkel. Az FMEA kiegészítése ezzel a módszerrel tehát lehetőséget ad nemcsak a kiküszöbölendő okok vizsgálatára az RPN szám vagy AP alapján, hanem a kockázati hálózat vizsgálatára is, hogy megismerjük a rendszer legfontosabb következményeit. A kockázat okainak csökkentése vagy megszüntetése után célszerű újra elvégezni a számítást és feltérképezni a hatásokat. A hagyományos FMEA módszertan kiegészítése ezzel a számítással segít felmérni, hogy a kockázatok összefüggései alapján melyik hatás a legvalószínűbb. Ez lehetővé teszi rendszerünk egy másik szempontjának figyelembevételét, miközben csökkenti a költségeket. Látjuk, hogy az ilyen szintű kockázateértékelés elvégzése teljesebb képet ad a rendszer kockázatainak jövőbeli viselkedéséről.

## 8.4 Eredmények

Jelen kutatási eredményekkel a már használt FMEA módszertan eszköztárát kívántam bővíteni. A kutatás után elmondható, hogy az új megközelítéssel nemcsak a kockázatok okait, hanem a következmények összefüggéseit és jelentőségét is vizsgálhatjuk. Ezzel a módszerrel a kockázatok kapcsolati hálójának nem csak az egyik oldalát értékeltem. Az értékelés után nemcsak azt tudjuk megmondani, hogy melyek azok az okok, amelyekkel először foglalkozni kell, hanem azt is, hogy milyen következmények várhatók először, és milyen jelentőséggel. A kockázat ismeretében látható, hogy annak bekövetkezése személyi sérülést vagy a termék, szolgáltatás károsodását okozza-e. Érdeemes megvizsgálni ennek a következmény kockázatnak a kapcsolatait a hálózatban, és a legnagyobb kockázattal rendelkezőkkel foglalkozni. A végső fontossági szám (IC) azt tartalmazza, hogy hány megelőző esemény van, milyen gyakran fordulnak elő, és milyen könnyen észlelhetők. A következmény súlyossága továbbá meghatározza annak fontosságát is. A jelen módszertan előnye, hogy az AP vagy RPN szám mellett még egy tényezőt ad az értékeléshez.

*A kutatás során tehát igazoltam, hogy egy következmény jelentősége meghatározható az öt megelőző események előfordulási lehetőségeinek, észlelési valószínűségének és súlyosságának megadásával és a hálózatkutatás mutatóinak alkalmazásával.*

## 9. A doktori értekezés tézisei

**1. tézis:** Az FMEA értékelés során használt skála minőségi kialakítása befolyásolhatja az értékelés pontosságát.

A kutatás során megvizsgálásra került, hogy az FMEA értékelés során használt skála minőségi kialakítása befolyásolja az értékelés bizonytalanságát. Az értékelés bizonytalanságát három skálán keresztül, egy leíró, egy százalékos és egy páros összehasonlításon alapuló skálán értékelték az értékelésben résztvevők. A tézis bebizonyítása ezen három skálán való értékelés alapján történt. Amennyiben a vizsgálatunk során az értékelést végzők személye is megváltozik, a kijelentés olyan értékelések esetében igaz, ahol az értékelést végző csapat tudása, jártassága az adott témában közel azonos, elkerülve a tudásbéli különbségekből adódó bizonytalanságot. U2

**2. tézis:** A páros összehasonlítással végzett elemzések modellezhető hálózatokkal. A válaszadók konzisztenciája meghatározható hálózati mutatókkal kettő csomópont esetében is, ha az értékelést kétszer végezték el.

A kutatás során bebizonyításra került, hogy a páros összehasonlítással végezhető elemzések modellezhető hálózatokkal. Ez a megállapítás bármely páros összehasonlítással végzett értékelésre igaz. A modellezés kiterjed az eredmények hálózatos vizualizálására a csomópontok különböző értékei (be-fokszám, PageRank) és az élek súlya és iránya szerint.

Továbbá bebizonyításra került, hogy amennyiben a páros összehasonlítással végzett elemzéseket hálózatokkal modellezzük, értékelhetjük a konzisztencia szintet kettő értékelési tényező esetén is. Ez a megállapítás szintén igaz bármely páros összehasonlítással végzett értékelésre 2 csomópont esetében. U3, U4

**3. tézis:** Páros összehasonlításon alapuló értékelés és a hálózatelemzés használatával a QFD módszertan kiterjeszhető. A QFD módszertanban a műszaki paraméter fontosság értéke korrigálható a műszaki paraméter korrelációs hálózatban betöltött szerepével (szignifikancia). U1

*Bebizonyításra került, hogy ha a vevői követelmény értékelést páros összehasonlítással végezzük, illetve a QFD módszertan további részeit, mint kapcsolati és tetőmátrixot is hálózatokkal modellezzük, a módszertan újabb eredményekkel kiterjeszhető. A szignifikancia értékével megadható, hogy egy műszaki paraméter mennyire jelentős, mely magába foglalja annak a műszaki paraméterek kapcsolatát leíró hálózatban betöltött szerepét is. A szignifikancia a QFD módszertan fontossági képletének egy kibővített változataként alkalmazható.*

**4. tézis:** Hálózat elemzés és modellezés használatával megadható, hogy egy műszaki paraméter változtatása hogyan befolyásolja a többi műszaki paraméter értékét (befolyás).

Ha a QFD módszer tetőmátrixában lévő műszaki paraméterek közötti kapcsolatot hálózattal modellezzük, megadhatjuk, hogy egy műszaki paraméter változtatása hogyan befolyásolja a többi műszaki paraméter értékét. Ez a „befolyás” számítás nemcsak a QFD módszertan keretein belül, hanem anélkül is alkalmazható bármely műszaki paraméter csoport hatás-változását leíró adathalmazra. U1

**5. tézis:** Hálózat elemzés és modellezés használatával megadható, hogy egy műszaki paraméter értékét hogyan befolyásolja a többi műszaki paraméter változtatása (érzékenység).

Ha a QFD módszer tetőmátrixában lévő műszaki paraméterek közötti kapcsolatot hálózattal modellezzük, megadhatjuk, hogy egy műszaki paraméterre pozitívan vagy negatívan hat más műszaki paraméterek változása. Ez az „érzékenység” számítás nemcsak a QFD módszertan keretein belül, hanem anélkül is alkalmazható bármely műszaki paraméter csoport hatás-változását leíró adathalmazra. U1

**6. tézis:** Egy következmény jelentősége meghatározható az őt megelőző események előfordulási valószínűségeinek, észlelési valószínűségének és súlyosságának megadásával és hálózatelemzés mutatóinak alkalmazásával.

Az FMEA módszertanban a következmények jelentősége megadható a hálózati indikátorok használatával, felhasználva a három értékelési alaptényezőt, mint súlyosság, bekövetkezés valószínűsége, észlelés valószínűsége. A bizonyítás az FMEA módszertan egy kiterjesztett értékeléseként alkalmazható. Alkalmazási területe szerint tehát minden olyan kockázatértékelés részét képezheti, ahol az FMEA módszertannal végzünk kockázatértékelést. U5

## 10. Theses of the doctoral dissertation

**Thesis 1:** The quality design of the scale used during the FMEA assessment can affect the accuracy of the assessment.

During the research, it was examined whether the quality design of the scale used during the FMEA evaluation affects the uncertainty of the evaluation. The participants in the evaluation evaluated the uncertainty of the evaluation using three scales, a descriptive scale, a percentage scale, and a pairwise comparison scale. The thesis was proved based on the evaluation of these three scales. If the person performing the evaluation also changes during our investigation, the statement is true for evaluations where the knowledge and skills of the team performing the evaluation are almost the same in the given topic, avoiding uncertainty arising from differences in knowledge. U2

**Thesis 2:** Pairwise comparison analyses can be modeled with networks. The consistency of the respondents can be determined with network indicators for two nodes as well if the evaluation was carried out twice.

In the course of the research, it was proven that the analyzes that can be performed with pairwise comparisons can be modeled with networks. This statement is true for any pairwise evaluation. The modeling covers the network visualization of the results according to the different values of the nodes (in-degree number, PageRank) and the weight and direction of the edges.

Furthermore, it has been proven that if the analyses performed with pairwise comparisons are modeled with networks, we can evaluate the level of consistency even in the case of two evaluation factors. This finding is also true for any pairwise comparison evaluation for 2 nodes. U3, U4

**Thesis 3:** The QFD methodology can be extended by using evaluation based on pairwise comparisons and network analysis. In the QFD methodology, the importance value of the technical parameter can be corrected by the role of the technical parameter in the correlation network (significance).

It has been proven that if the evaluation of customer requirements is carried out by pairwise comparisons, and other parts of the QFD methodology, such as the connection and roof matrix, are modeled with networks, the methodology can be extended with new results. The value of significance can be used to specify how significant a technical parameter is, which also includes its role in the network describing the relationship between technical parameters. Significance can be used as an extended version of the importance formula of the QFD methodology. U1

**Thesis 4:** Using network analysis and modeling, it is possible to specify how changing a technical parameter affects the value of other technical parameters (influence).

If the connection between the technical parameters in the roof matrix of the QFD method is modeled with a network, we can specify how a change in one technical parameter affects the value of other technical parameters. This "influence" calculation can be applied not only within the framework of the QFD methodology but also without it, to a data set describing the effect change of any group of technical parameters. U1

**Thesis 5:** Using network analysis and modeling, it is possible to specify how the value of a technical parameter is affected by changes in other technical parameters (sensitivity).

If the connection between the technical parameters in the roof matrix of the QFD method is modeled with a network, we can specify how a change in other technical parameters affects one technical parameter. This "sensitivity" calculation can be applied not only within the framework of the QFD methodology but also without it, to a data set describing the effect change of any group of technical parameters. U1

**Thesis 6:** The importance of an effect can be determined by specifying the occurrence probabilities, detection probabilities, and severity of the events preceding it and by applying network analysis indicators.

In the FMEA methodology, the significance of the effects can be specified using network indicators, using the three basic evaluation factors, such as severity, probability of occurrence, and probability of detection. The proof can be used as an extended evaluation of the FMEA methodology. According to its field of application, it can therefore be part of any risk assessment where we perform a risk assessment using the FMEA methodology. U5

## 11. Összefoglalás

Doktori kutatásom alapját az iparban gyakran használt minőségügyi módszerek fejlesztése adta. A fejlesztéshez a legtöbb esetben a hálózat kutatás eszköztárát használtam. A kutatás során a legfőbb cél az volt, hogy olyan módszereket hozzak létre, amelyek az ipari használatba könnyen integrálhatók, könnyen alkalmazhatók, és jól illeszkednek a folyamatosan fejlődő digitális környezethez.

Személyes tapasztalattól motiválva egyik kutatási célom volt, hogy bebizonyítsam, a kockázatértékelés során használt értékelési skálák minőségi kialakítása befolyásolja az értékelés bizonytalanságát. A bizonyításhoz az FMEA módszertant egy mérőrendszernek tekintettem, és 3 különböző skálán (nyelvi, százalékos, páros összehasonlításra alapuló) értékeltettem ki a kockázatokat. Az értékelés során változott a kitöltő személye és a skála. Mindkét mérőrendszerbeli változás esetén 1-2 skála értékbeli szóráskülönbséget tapasztaltam, illetve több kiugró eltérést. A kísérlet során tehát alátámasztásra került, hogy a skálák kialakítása befolyásolja az értékelés bizonytalanságát.

A kutatásom másik iránya annak bebizonyítására irányult, hogy a páros összehasonlítással végzett értékelések modellezhetők hálózatokkal. Továbbá, hogyha ugyanazon értékelést kétszer végezzük el, akkor a hálózatok segítségével lehetőségünk van a konzisztencia értékelésére kettő tényező esetén is. A kutatás során egy páros összehasonlítással végzett kockázatértékelés került hálózatokkal modellezésre és kiértékelésre. Lehetőségünk van egyéni hálózatokat létrehozni, ahol egyénenként értékeljük a kitöltők eredményeit, illetve összesített hálózatokat, ahol egy munkacsoport egyénenkénti eredményeit tudjuk összevonni. A kutatás során bebizonyítottam, hogy a hálózat kutatás eszköztárával a páros összehasonlítással végzett értékelések modellezhetők és kettő új hálózati mutatóval értékelhetők, mint a be-fokszám és a PageRank. Az egyéni és a csoportos hálózatokkal pedig a csoporton belüli szubjektivitás és meggyőzés lehetőségét is tudjuk csökkenteni. A konzisztencia elemzés értékelésének lehetősége kettő tényezőre szintén bebizonyításra került. A kétirányú élek és inkonzisztens összesített élsúlyok alapján kiszűrhetők a bizonytalan értékelések az eredményekből.

A páros összehasonlítás értékelését hálózatokkal folytatva a QFD módszertan fejlesztését tűztem ki célul. Kutatásom során bebizonyítottam, hogy a QFD módszertan modellezhető hálózatokkal és a hálózat kutatás eszköztárával annak eredménye kiterjeszthető. Megoldást adva a QFD egyik legnagyobb hiányosságára, hogy a tetőmátrixban lévő műszaki paraméterek közötti korreláció nem vesz így részt a végső értékelésben annak ellenére, hogy annak a fejlesztési irányok



kijelölésében nagy szerepe van. A munkám során 3 csoportba sorolható több új egyenletet hoztam létre, melyek nagy mértékben támogatják a fejlesztési irányok meghatározását. A szignifikancia létrehozásával kiterjesztésre került a műszaki paraméterek szerepe a módszertanban, így már azok részt vesznek a végső értékelésben. Az érzékenységgel megadásra került, hogy egy műszaki paraméter mennyire befolyásolható a többi paraméter által és milyen mértékben, a befolyás pedig meghatározza, hogy egy csomópont mennyire és milyen mértékben van hatással a többi paraméterre. Ezen eredmények kiszámításával sokkal pontosabb képet kapunk a rendszerről, amit vizsgálni szeretnénk, így megalapozottabb fejlesztési döntést tudunk hozni. Mindemellett bemutatásra került, hogy a hálózatokban lévő csomópontok és azok kapcsolatai is jól vizualizálhatók hálózatokkal.

A hálózat kutatás eszköztárával egy új megközelítésű FMEA-t is létrehoztam, mely a hagyományos FMEA-t egészíti ki az értékelést tekintve. Meghatároztam, hogy ha a kockázatokat, azok ok-okozati összefüggéseit hálózatokkal modellezzük, meghatározható a kockázati következmények jelentősége a hálózatban. Így nemcsak a gyökérok megszüntetésére fókuszálhatunk, hanem azt is figyelembe tudjuk venni az értékelés és döntéshozatal során, hogy a hatásláncolatban mekkora esélye van annak, hogy egy következmény bekövetkezik, észleljük, hozzáátéve annak súlyosságát.

## **12. A témában található fejlesztési lehetőségek**

A FMEA módszertani skálákkal kapcsolatos további fejlesztési irányba lehet egy olyan tanulmány létrehozása, amely megalapozottan javaslatot tesz különböző skálák különböző területeken történő alkalmazására a három értékelési faktor tekintetében. Ezzel egy olyan ajánlás jöhetne létre, amely útmutatóként szolgálhat az FMEA módszert használni készülő csoportok számára. A megismételhetőségi és reprodukálhatósági vizsgálatot is érdemes még egy alkalommal elvégezni megvizsgálva, hogy másodjára is hasonló eredményt ad-e az értékelés.

A kettő értékelési tényezőre számított konzisztencia eredmény alapján további kutatási terület lehet az inkonzisztens válaszok kivonása az értékelésből. Ennek a lépésnek a bemutatása, hogy a hálózatokból hogyan vehetők ki ezek az értékelések.

A hálózatokkal modellezett módszerek esetében további fejlesztési terület lehet nem csak a ki és be-fokszám, illetve a PageRank, hanem más hálózati mutatók alkalmazása is. Annak megvizsgálása is a cél, hogy adnak-e hozzá új eredményeket az alap módszertanhoz. A nem teljesen kitöltött páros összehasonlítással végzett értékelések modellezése és értékelése, valamint a ki nem töltött válaszok becslése hálózatokkal szintén további fejlesztési terület lehet.

Az NB-QFD további kutatási területe lehet a piaci felmérés bevonása a hálózatos elemzésbe.

Érdemes lenne azt is megvizsgálni, hogy más minőségügyi módszerek hogyan fejleszthetők hálózatokkal a Minőség 4.0 környezetébe való könnyebb integrálás érdekében.

### **13. Köszönetnyilvánítás**

A doktori kutatásaim során sok segítséget és támogatást kaptam, amit szeretnék mindenkinek megköszönni!

Szeretném megköszönni a segítséget a konzulenseimnek, nevezetesen Dr. Abonyi János professzor, Dr. Gyurika István tanszékvezető és Dr. Csiszér Tamás docens Uraknak.

Szeretném megköszönni minden résztvevőnek, akik a kutatásaim során az adatgyűjtésben segítettek.

Végül, de nem utolsósorban szeretném megköszönni a rengeteg támogatást, biztatást, mellettem állást a családomnak. Köszönöm a férjemnek, aki a PhD kezdete óta töretlenül támogatja munkámat és ambíciómat, hogy megszerezsem a PhD fokozatot. Köszönöm anyukámnak, hogy mindig emlékeztetett arra, hogy miért is kezdtem bele 4,5 éve a doktori képzésbe. Köszönöm a barátaimnak, akik mindvégig mellettem álltak, és meghallgattak, amikor szükségem volt rá.

## **Az értekezés témájában megjelent publikációk**

**U1:** Kulcsár, E., Gyurika, I. G., & Csiszér, T. (2022). Network-Based–Quality Function Deployment (NB-QFD): The combination of traditional QFD with network science approach and techniques. *Computers in Industry*, 136, 103592.

**U2:** Kulcsár, E., Gyurika, I. G., & Csiszér, T. (2021, October). Increasing the Reliability of FMEA Evaluation by Modifying Rating Scales and Applying Pairwise Comparison Method. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1190, No. 1, p. 012003). IOP Publishing.

**U3:** Kulcsár, E., Gyurika, I. G., & Csiszér, T. (2020). Application of network science to extend the AHP and QFD methods. In *Proc. 6th World Congress Mech. Chem. Mat. Eng.* Paper No. ICMIE 137

**U4:** Ungvári, E., & Gyurika, I. G. (2022). Evaluation of PC-FMEA Using Network Analysis. *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, 50(2), 61-64.

**U5:** Ungvári, E., Gyurika, I. G., & Csiszér, T. (2023). Evaluation of the failure effects of a screwing station using a new approached FMEA. *MethodsX*, 102278.

## Irodalomjegyzék

- [1] Pauer, G., Krizsik, N., Szigeti, S., & Hamza, Z. (2021, November). Identification And Analysis Of Potential Risk Factors Influencing The Road Safety Level At Designated Pedestrian Crossings. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1202, No. 1, p. 012032). IOP Publishing.
- [2] Saaty, T. (1972). An eigenvalue allocation model for prioritization and planning. In Working paper, Energy Management and Policy Center: University of Pennsylvania.
- [3] Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234-281.
- [4] Brunelli, M. (2014). *Introduction to the analytic hierarchy process*. Springer.
- [5] Saaty, T. L. (1990). Eigenvector and logarithmic least squares. *European journal of operational research*, 48(1), 156-160.
- [6] Alonso, J. A., & Lamata, M. T. (2006). Consistency in the analytic hierarchy process: a new approach. *International journal of uncertainty, fuzziness and knowledge-based systems*, 14(04), 445-459.
- [7] Stamatis, D. H. (2003). *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*. Quality Press.
- [8] Sharma, K. D., & Srivastava, S. (2018). Failure mode and effect analysis (FMEA) implementation: a literature review. *J Adv Res Aeronaut Space Sci*, 5, 1-17.
- [9] Ambekar, S. B., Edlabadkar, A., & Shrouty, V. (2013). A review: implementation of failure mode and effect analysis. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 2(8), 37-41.
- [10] McDermott, R. E., Mikulak, R. J., & Beauregard, M. R. (2009). *FMEA*. New York: Taylor & Francis Group.
- [11] Spreafico, C., Russo, D., & Rizzi, C. (2017). A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents. *computer science review*, 25, 19-28.
- [12] Banghart, M., Babski-Reeves, K., Bian, L., & Strawderman, L. (2018). Subjectivity in failure mode effects analysis (fmea) severity classification within a reliability centered maintenance (rcm) context. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 5(1), 2.
- [13] Kahneman, D. (2010). A korlátozott racionalitás feltérképezése az intuitív döntések és válaszok szempontjából II. *Köz-gazdaság-Review of Economic Theory and Policy*, 5(1), 101-121.
- [14] Rosita, K. K. M., & Rada, M. V. (2021, April). Equipment Reliability Optimization Using Predictive Reliability Centered Maintenance. In 2021 IEEE 8th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA) (pp. 348-354). IEEE.
- [15] Gauthier, F., Chinniah, Y., Burlet-Vienney, D., Aucourt, B., & Larouche, S. (2018). Risk assessment in safety of machinery: Impact of construction flaws in risk estimation parameters. *Safety science*, 109, 421-433.
- [16] Compare, M., Zio, E., Moroni, E. L. I. S. A., Portinari, G., & Zanini, T. (2018). Development of a methodology for systematic analysis of risk reduction by protective measures in tyre production machinery. *Safety science*, 110, 13-28.
- [17] Huck, T. P., Münch, N., Hornung, L., Ledermann, C., & Wurll, C. (2021). Risk assessment tools for industrial human-robot collaboration: Novel approaches and practical needs. *Safety Science*, 141, 105288.

- [18] Gauthier, F., Chinniah, Y., Abdul-Nour, G., Jocelyn, S., Aucourt, B., Bordeleau, G., & Mosbah, A. B. (2021). Practices and needs of machinery designers and manufacturers in safety of machinery: An exploratory study in the province of Quebec, Canada. *Safety Science*, 133, 105011.
- [19] Abdullah, I., Mahmood, W. H. W., Fauadi, M. H. F. M., & Ab Rahman, M. N. (2018) FMEA and Reliability Analysis of Critical Equipment Machinery in the Malaysian Palm Oil Mill. *Proceedings of Innovative Research and Industrial Dialogue'18*, 112-113
- [20] Zagidullin, R., Antipov, D., Dmitriev, A., & Zezin, N. (2021, May). Development of a methodology for eliminating failures of an FDM 3D printer using a "failure tree" and FMEA analysis. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1925, No. 1, p. 012085). IOP Publishing.
- [21] Harpster, R., & Rama, S. (2018, January). Risk Based PLM for Tooling and Machinery Design and Manufacturing. In *2018 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)* (pp. 1-6). IEEE.
- [22] Oldenhof, M. T., et al. "Consistency of FMEA used in the validation of analytical procedures." *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis* 54.3 (2011): 592-595.
- [23] Subriadi, A. P., & Najwa, N. F. (2020). The consistency analysis of failure mode and effect analysis (FMEA) in information technology risk assessment. *Heliyon*, 6(1), e03161.
- [24] Liang, D., Li, F., & Xu, Z. (2021). A group-based FMEA approach with dynamic heterogeneous social network consensus reaching model for uncertain reliability assessment. *Journal of the Operational Research Society*, 74, 33-47.
- [25] Sagnak, M., Kazancoglu, Y., Ozkan Ozen, Y. D., & Garza-Reyes, J. A. (2020). Decision-making for risk evaluation: integration of prospect theory with failure modes and effects analysis (FMEA). *International Journal of Quality & Reliability Management*, 37(6/7), 939-956.
- [26] Sarkar, D. (2015). Application of fuzzy failure mode effect analysis and expected value method for project risk analysis of elevated corridor metro rail projects. *International Journal of Decision Sciences, Risk and Management*, 6(1), 34-62.
- [27] Ookalkar, A. D., Joshi, A. G., & Ookalkar, D. S. (2009). Quality improvement in haemodialysis process using FMEA. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 26(8), 817-830.
- [28] Xiao, N., Huang, H. Z., Li, Y., He, L., & Jin, T. (2011). Multiple failure modes analysis and weighted risk priority number evaluation in FMEA. *Engineering Failure Analysis*, 18(4), 1162-1170.
- [29] Wang, Z., Gao, J. M., Wang, R. X., Chen, K., Gao, Z. Y., & Zheng, W. (2017). Failure mode and effects analysis by using the house of reliability-based rough VIKOR approach. *IEEE Transactions on Reliability*, 67(1), 230-248.
- [30] Stamatis, D. H. (2019). *Risk management using failure mode and effect analysis (FMEA)*. Quality Press.
- [31] Petrescu, L., Petrescu, M. C., Cazacu, E., & Ionita, V. (2021, March). Risk Priority Number vs Action Priority in Electrical Systems. In *2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)* (pp. 1-6). IEEE.
- [32] M. Banghart, et al. "Subjectivity in Failure Mode Effects Analysis (FMEA) Severity Classification within a Reliability Centered Maintenance (RCM) Context." *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace* 5.(1), article 2, 2018.

- [33] S.J. Rhee, and I. Kosuke. "Life cost-based FMEA incorporating data uncertainty." ASME 2002 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2002. Volume 3: 7th Design for Manufacturing Conference, pp. 309-318.
- [34] D.C. Aguiar, H. J. C. Souza, and V. A. Salomon. "AHP Application to Evaluate Scoring Criteria for Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)." *International Journal of Analytic Hierarchy Process* 2, 3-13, 2010.
- [35] M. T. Oldenhof, et al. "Consistency of FMEA used in the validation of analytical procedures." *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis* 54.3, 592-595, 2011.
- [36] Jin, G., Meng, Q., & Feng, W. (2022). Optimization of logistics system with fuzzy FMEA-AHP methodology. *Processes*, 10(10), 1973.
- [37] Jin, G., Meng, Q., & Feng, W. (2022, September). Logistics System Risk Analysis Using FMEA-AHP Methodology: during and after the COVID-19 pandemic. In *Proceedings of the 8th International Conference on Industrial and Business Engineering* (pp. 436-442).
- [38] Hanifi, M., Chibane, H., Houssin, R., Cavallucci, D., & Abdellatif, M. (2022). Prioritizing the initial problem choice in the inventive design process: Proposal of an FMEA-AHP-based method. *Manuscript*
- [39] Kulcsár, E., Csiszér, T., & Abonyi, J. (2020). Pairwise comparison based failure mode and effects analysis (FMEA). *MethodsX*, 7, 101007.
- [40] H. Urdhwareshe, "Validating measurement system using measurement systems analysis (MSA)." *Quality World*, 41-47, 2006
- [41] Ch. Dubois, and P. Courtois. "Choice of parameters for an R&R study and its impact on the measurement capability." *19th International Congress of Metrology (CIM2019)*. EDP Sciences, 2019. article 12001
- [42] Wrzochal, M., & Adamczak, S. (2019). Application of a Gage R&R study in evaluation of rolling bearing measurement system accuracy. *Transportation Research Procedia*, 40, 934-939.
- [43] Shirodkar, A., & Rane, S. (2021). Evaluation of coordinate measuring machine using gage repeatability & reproducibility. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 12(1), 84-90.
- [44] Burke, E., Kloeber Jr., J.M., Deckro, R.F., 2002. Using and abusing QFD scores. *Qual. Eng.* 15 (1), 9–21.
- [45] Lee, C.K., Ru, C.T.Y., Yeung, C.L., Choy, K.L., Ip, W.H., 2015. Analyze the healthcare service requirement using fuzzy QFD. *Comput. Ind.* 74, 1–15.
- [46] Ko, W.C., 2015. Construction of house of quality for new product planning: a 2-tuple fuzzy linguistic approach. *Comput. Ind.* 73, 117–127.
- [47] Shin, J.S., Kim, K.J., 2000. Effect and choice of the weighting scale in QFD. *Qual. Eng.* 12 (3), 347–356.
- [48] Revelle, J. B., Moran, J. W., & Cox, C. A. (1998). *The QFD handbook*. John Wiley & Sons.
- [49] Crowe, T. J., & Cheng, C. C. (1996). Using quality function deployment in manufacturing strategic planning. *International Journal of Operations & Production Management*. 16 (4), 35-38.
- [50] Wolniak, R. (2018). The use of QFD method advantages and limitation. *Production Engineering Archives*, 18, 14-17.
- [51] Van De Poel, I. (2007). Methodological problems in QFD and directions for future development. *Research in Engineering Design*, 18(1), 21-36.

- [52] Ginting, R., & Ishak, A. (2020). An Integrated of AHP–QFD Methodology For Product Design: A Review. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, 8(1). 69- 78.
- [53] Rajesh, G., and P. Malliga. (2013) “Supplier selection based on AHP QFD methodology.” *Procedia Engineering* 64, pp. 1283-1292.
- [54] Khan, Sharfuddin Ahmed, Fikri Dweiri, and Vipul Jain. “Integrating analytical hierarchy process and quality function deployment in automotive supplier selection.” *International Journal of Business Excellence* 9.2, 2016, pp. 156-177.
- [55] Ucler, Caglar. (2017) “Brainstorming the cryoplane layout by using the iterative AHP-QFD-AHP approach.” *Aviation* 21.2, pp. 55-63.
- [56] Gupta, Alok Kumar, and Bharat A. Modi. (2018) “Selection of sustainable technology for VOC abatement in an industry: an integrated AHP–QFD approach.” *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A* 99.3, pp. 565-578.
- [57] Elahi, F., Ahmed, S., Haque, M., and Chowdhury, N. (2016) “An Empirical Investigation into Physician Preferences in Drug Prescription: An Integrated Methodology of AHP and QFD.” *International Journal of Marketing Studies* 8.5, pp. 81-89.
- [58] Sivasamy, K., Arumugam, C., Devadasan, S. R., Murugesh, R., and Thilak, V. M. M. “Advanced models of quality function deployment: a literature review.” *Quality & quantity* 50.3, 2016, pp. 1399-1414.
- [59] Wu, W. Y., Qomariyah, A., Sa, N. T. T., & Liao, Y. (2018). The integration between service value and service recovery in the hospitality industry: An application of QFD and ANP. *International Journal of Hospitality Management*, 75, 48-57.
- [60] Bottani, E., Centobelli, P., Murino, T., & Shekarian, E. (2018). A QFD-ANP method for supplier selection with benefits, opportunities, costs and risks considerations. *International journal of information technology & decision making*, 17(03), 911-939.
- [61] Tavana, M., Yazdani, M., & Di Caprio, D. (2017). An application of an integrated ANP–QFD framework for sustainable supplier selection. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 20(3), 254-275.
- [62] Ishak, A., Ginting, R., Suwandira, B., & Malik, A. F. (2020, December). Integration of kano model and quality function deployment (QFD) to improve product quality: a literature review. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1003, No. 1, p. 012025). IOP Publishing.
- [63] Haber, N., Fargnoli, M., & Sakao, T. (2020). Integrating QFD for product-service systems with the Kano model and fuzzy AHP. *Total Quality Management & Business Excellence*, 31(9-10), 929-954.
- [64] Klochkov, Y., Gazizulina, A., & Ostapenko, M. (2019, October). Development of QFD methodology. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 618, No. 1, p. 012083). IOP Publishing.
- [65] Gündoğdu, F. K., & Kahraman, C. (2020). A novel spherical fuzzy QFD method and its application to the linear delta robot technology development. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 87, 103348.
- [66] Kayapınar, S., & Erginel, N. (2019). Designing the airport service with fuzzy QFD based on SERVQUAL integrated with a fuzzy multi-objective decision model. *Total Quality Management & Business Excellence*, 30(13-14), 1429-1448.



- [67] Prasad, K., & Chakraborty, S. (2015). Development of a QFD-based expert system for CNC turning centre selection. *Journal of Industrial Engineering International*, 11, 575-594.
- [68] Sun, S. (2023). The availability improvement of CNC machine tool based on DEMATEL–ISM–QFD integration method. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1-9.
- [69] Barabási, A.L., 2013. Network science. *Philos. Trans. R Soc. A Math., Phys. Eng. Sci.* 371 (1987), 20120375.
- [70] Csiszér, T., 2017. A hálózatszemlélet alkalmazási lehetőségei a minőségügyben. GlobeEdit.
- [71] Newman, M. (2018). *Networks*. Oxford university press.
- [72] Barabási, Albert-László. *Network science*. Cambridge university press, 2016.
- [73] Page, L., Brin, S., Motwani, R., and Winograd, T. “The pagerank citation ranking: Bringing order to the web.” Stanford InfoLab, 1999.
- [74] Csiszér, T., Koczor, Z., Abonyi, J., & Bejő, L. (2014) *Book of theses*.
- [75] Bencherif, F., Mouss, L.H., 2020. Complex network to enhance characterization analysis in modelling product development process. *Afr. J. Sci. Technol. Innov. Dev.* 12 (7), 797–811.
- [76] Wang, X., Wang, Y., Liu, A., 2020b. Determining customer-focused product features through social network analysis. *Procedia CIRP* 91, 704–709.
- [77] Gu, J., Liu, C., Fu, S., Mao, E., Pang, C., 2020. A priority index based method for identifying influential design factors in product service-oriented designs. *J. Intell. Fuzzy Syst.* 38 (3), 3267-3284
- [78] Abbas, M. , Inayat, I. , Jan, N. , Saadatmand, M. , Enoiu, E.P. , Sundmark, D. , MBRP: Model-Based Requirements Prioritization Using PageRank Algorithm. In 2019 26th Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC) (pp. 31–38). IEEE.
- [79] Wang, M., Chen, W., Huang, Y., Contractor, N.S., Fu, Y., 2016. Modeling customer preferences using multidimensional network analysis in engineering design. *Design Science*. 2, e11
- [80] Scherrer, M., Deflorin, P., 2017. Linking QFD and the manufacturing network strategy. *Int. J. Oper. Prod. Manag.* 37 (2), 226-255.
- [81] Duru, O., Huang, S.T., Bulut, E., Yoshida, S., 2013. Multi-layer quality function deployment (QFD) approach for improving the compromised quality satisfaction under the agency problem: A 3D QFD design for the asset selection problem in the shipping industry. *Qual. Quant.* 47 (4), 2259–2280.
- [82] Bulut, Emrah, Duru, Okan, Huang, Sheng Teng, (2018). A multidimensional QFD design for the service quality assessment of Kansai International Airport, Japan. *Total Qual. Manag. Bus. Excell.* 29 (1–2), 202–224.
- [83] Huang, S.T., Su, I. (2017). Applying Multilayer QFD to Assess Quality of Short Sea Shipping: An Empirical Study on Maritime Express Service between Taiwan and Mainland China , In *International Forum on Shipping, Ports and Airports (IFSPA) 2017: Innovative Transport Logistics in Shaping the Future of Supply Chains* Hong Kong Polytechnic University. pp 207-221
- [84] Huang, S.T., Chang, K.Y., Su, I., Chiou, A.S., Chen, Y.C., 2020. Service quality assessment of free trade port zone using multilayer quality

- function deployment: an empirical study in Taiwan. *J. Mar. Sci. Technol.* 28 (1), 1.
- [85] Abonyi, J., & Czvetkó, T. (2022). Hypergraph and network flow-based quality function deployment. *Heliyon*, 8(12), e12263.
- [86] Fujimoto, K., Oyama, A., Fujii, K., Iizuka, N., & Okita, K. (2008, January). Visualization and verification method for failure network analysis of space launch vehicles. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 43277, pp. 977-982).
- [87] Worlitz, J., Haschke, D., Peplowsky, M., Peplowsky, I. S., & Woll, I. R. (2017). FMEA Software comparison. In *20th QMOD Conference on Quality and Service Sciences*, Helsingør (Denmark), 2017.
- [88] Ongkowijoyo, C., & Doloi, H. (2017). Determining critical infrastructure risks using social network analysis. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*. 8 (1), 5-26
- [89] Liu, M., Xu, L., & Liao, P. C. (2021). Character-based hazard warning mechanics: A network of networks approach. *Advanced Engineering Informatics*, 47, 101240.
- [90] Chen, Y., Zhen, Z., Yu, H., & Xu, J. (2017). Application of fault tree analysis and fuzzy neural networks to fault diagnosis in the internet of things (IoT) for aquaculture. *Sensors*, 17(1), 153.
- [91] Ruilin, Z., & Lowndes, I. S. (2010). The application of a coupled artificial neural network and fault tree analysis model to predict coal and gas outbursts. *International Journal of Coal Geology*, 84(2), 141-152.
- [92] Yucesan, M., Gul, M., & Celik, E. (2021). A holistic FMEA approach by fuzzy-based Bayesian network and best-worst method. *Complex & Intelligent Systems*, 7(3), 1547-1564.
- [93] Zhang, Z. X., Yang, L., Cao, Y. N., & Xu, Y. W. (2022). An improved FMEA method based on ANP with probabilistic linguistic term sets. *International Journal of Fuzzy Systems*, 24(6), 2905-2930.
- [94] Barsalou, M. (2023). Root Cause Analysis in Quality 4.0: A Scoping Review of Current State and Perspectives. *TEM Journal*, 12(1), 73-79.
- [95] Mtotywa, M. M. (2022). Developing a Quality 4.0 Maturity Index for Improved Business Operational Efficiency and Performance. *Quality Innovation Prosperity*, 26(2), 101-127.
- [96] Dror, S. (2022). QFD for selecting key success factors in the implementation of quality 4.0. *Quality and Reliability Engineering International*, 38(6), 3216-3232.
- [97] Sony, M., Antony, J., & Douglas, J. A. (2020). Essential ingredients for the implementation of Quality 4.0: a narrative review of literature and future directions for research. *The TQM Journal*. 32 (4), 779-793.
- [98] Zonnenshain, A., & Kenett, R. S. (2020). Quality 4.0—the challenging future of quality engineering. *Quality Engineering*, 32(4), 614-626.
- [99] Doaly, C. O., Sriwana, I. K., & Salomon, L. (2020, July). Analysis the measurement quality system of clearance tappet using measurement system analysis on motorcycle manufacturing company. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 852, No. 1, p. 012124). IOP Publishing.
- [100] Zhou, Z., Xie, S. S., & Chen, D. (2011). *Fundamentals of digital manufacturing science*. Springer Science & Business Media
- [101] Ren, B., Li, H., Shi, J., Liu, Y., & Qi, Y. (2022). Identifying the key sectors and paths of the embodied energy in BRICS nations: A weighted multilayer network approach. *Energy*, 239, 122091.

- [102] Li, M., Du, W., Nian, F., 2014. An adaptive particle swarm optimization algorithm based on directed weighted complex network. *Math. Probl. Eng.* 2014. ID 434972
- [103] Bianchini, M., Gori, M., Scarselli, F., 2005. Inside pagerank. *ACM Trans. Internet Technol.* 5 (1), 92–128.

## Táblázatok jegyzéke

1. Táblázat: AHP skála a páros összehasonlításos értékeléshez [3] .....	12
2. Táblázat: FMEA módszertan hiányosságai .....	17
3. Táblázat: Skála a páros összehasonlításra alapuló FMEA értékeléshez [39] ..	19
4. Táblázat: A preferencia hálózatban az élek tulajdonságai [74] .....	24
5. Táblázat: A kockázatértékeléshez használt előfordulási valószínűséget megadó skálák. ....	34
6. Táblázat: Azonosított kockázatok az értékeléshez és azok azonosító számai. .	34
7. Táblázat: A kockázatértékelés eredménye három skálával, P százalékos skála, L nyelvi skála és PW páronkénti összehasonlítási módszerrel. A zöld cellák ugyanazt az előfordulási eredményt jelölik különböző skálákra adott értékelésekben. ....	35
8. Táblázat: A szórások átlagos és medián értékei. ....	36
9. Táblázat: Az egyes skálákra adott eredmények közötti skála érték különbség	40
10. Táblázat: A mérések inkonzisztenciája a hat válaszadó esetében. ....	41
11. Táblázat: A válaszadó véleménye a skálákról és a páronkénti összehasonlítás módszeréről.....	41
12. Táblázat: Skála az előfordulás értékeléséhez.....	45
13. Táblázat: Az egyéni kockázati hálózati modell eredményei a súlyozott befokszám és PageRank érték alapján. ....	47
14. Táblázat: Az aggregált kritikussági hálózati modell eredményei a súlyozott befokszám és PageRank érték alapján.....	49
15. Táblázat: CNC gépekkel kapcsolatos vevői igények.....	61
16. Táblázat: CNC gépekhez tartozó műszaki követelmények .....	62
17. Táblázat: Vevői igények fontossági értékei súlyozott befokszám értékek alapján, kapcsolati mátrix eredményei és műszaki paraméterek súlya a súlyozott befokszám alapján. A követelmények közötti kapcsolat 1-3-ig terjednek, ahol üres a cella, ott nincs kapcsolat. ....	63
18. Táblázat Vevői igények fontossági értékei PageRank értékek alapján, kapcsolati mátrix eredményei és műszaki paraméterek súlya a PageRank eredmények alapján. A követelmények közötti kapcsolat 1-3-ig terjednek, ahol üres a cella, ott nincs kapcsolat. ....	63
19. Táblázat: Korrelációs mátrix, ami tartalmazza a műszaki követelmények közötti korrelációt. ....	65
20. Táblázat A műszaki követelmények súlyai a korábban bemutatott képletek alapján.....	70
21. Táblázat: A csavarozóállomás meghibásodásának 16 következményének leírása. ....	79

22. Táblázat A következmények észlelése ( $C_D$ ) a korábbi események száma és észlelési értékei alapján. ....	80
23. Táblázat A következmények előfordulása ( $C_O$ ) az előző esemény száma és előfordulási értéke alapján. ....	80
24. Táblázat A következmények súlyossága ( $C_S$ ) a korábbi események száma és előfordulási értékei alapján. ....	81
25. Táblázat A következmények jelentősége (IC) .....	81

## Ábrajegyzék

1. Ábra: Minőség háza [forrás: saját munka].....	21
2. Ábra: A Gephi programban a hálózatok szerkesztéséhez használt nézet. ....	30
3. Ábra: A hálózatból kinyerhető adatok táblázatos nézete a Gephi programban (0.9.2-es verzió). ....	31
4. Ábra: Az előfordulási értékek szórásának megoszlása a három skála esetén...	36
5. Ábra: A három skála előfordulási értékeinek megoszlása és az azonos skálán adott eredmények szórása .....	38
6. Ábra: Egyéni kockázati hálózat. A csomópontok mérete a súlyozott be-fokszám alapján mutatja az eredményeket, a csomópontok színe pedig a PageRank érték alapján végzett kockázatértékelés eredményeit. ....	46
7. Ábra: A hálózatban lévő csúcsok kapcsolatának megjelenítése a preferencia súlyaival. ....	48
8. Ábra: Összesített kritikussági hálózat. A csomópontok mérete a súlyozott fokon belüli értéket mutatja, a csomópontok színe pedig a PageRank érték alapján végzett kockázatértékelés eredményét. ....	48
9. Ábra: A hálózatban lévő csúcsok kapcsolatának megjelenítése a preferencia összesített súlyaival.....	50
10. Ábra: a) preferenciahálózat a csúcsok be-fokszámának megjelenítésére és b) a csúcsok PageRank értékének megjelenítése. A csúcsok átmérője a be-fokszám és a PageRank értékeit tükrözi (minél nagyobb a mutató értéke, annál nagyobb a csúcs átmérője). A csúcsok színei mindkét esetben a be-fokszám nagyságát mutatják.	51
11. Ábra: A preferenciák típusai és súlyuk. A preferenciák súlyait összegezzük, ha a válaszok azonos párosítás esetén konzisztensek voltak. Ha a válaszok nem konzisztensek, az éleket a rendszer viszonozza, és a súlyokat mindkét irányban kiértékeli. A színintenzitás a súly nagyságát mutatja. (A vizualizáció Gephiben készült.).....	51
12. Ábra: A lehetséges súlyok összege, figyelembe véve a preferenciák irányát.	52
13. Ábra: Műszaki követelmények korrelációs hálózata. A csúcs átmérője mutatja a ki-fokszám nagyságát, a csúcsok színe pedig a be-fokszám nagyságát. Minél nagyobb a csúcs, annál nagyobb a ki-fokszám értéke, minél sötétebb a csúcs, annál nagyobb a be-fokszám érték. Az élek súlya a hatás jelentőségét jelenti. ....	56
14. Ábra: A vevői igények súlyozott be-fokszámokénti Pareto elemzése.....	64
15. Ábra: A vevői igények PageRank számának Pareto elemzése. ....	64
16. Ábra: Csúcsok jelentősége a súlyozott be-fokszám szerint. ....	66
17. Ábra: Korrelációs kapcsolat a műszaki paraméterek között.....	67
18. Ábra: A hálózati modellezés megkönnyíti a kimenő és bejövő kapcsolatok csomópontjainak bemutatását. ....	67

19. Ábra: Kapcsolati mátrix hálózatként ábrázolva: piros csomópontok jelzik az ügyfelek igényeit; A kék csomópontok a műszaki követelményeket mutatják. ...	68
20. Ábra: „N” csomópont kapcsolatai. ....	68
21. Ábra: A műszaki követelményt képviselő „v” csomópont kapcsolatai. ....	68
22. Ábra: A műszaki követelmények súlyainak Pareto elemzése a hagyományos QFD módszer képlete alapján. ....	71
23. Ábra: A műszaki követelmények pozitív szignifikanciájának Pareto elemzése. ....	71
24. Ábra: A műszaki követelmények negatív jelentőségének Pareto elemzése. ..	72
25. Ábra: A műszaki követelmények pozitív érzékenységének Pareto elemzése.	73
26. Ábra: A műszaki követelmények negatív érzékenységének Pareto elemzése. ....	73
27. Ábra: A műszaki követelmények pozitív hatásának Pareto elemzése. ....	74
28. Ábra: A műszaki követelmények negatív hatásának Pareto elemzése. ....	74
29. Ábra A meghibásodási háló tartalmazza az alábbi szinteket: következmény, hiba mód, hiba ok. [forrás: saját munka] .....	78
30. Ábra: Az észlelési hibahálózat az, ahol a hatások, módok, okok és ezek összefüggései láthatók. ....	82

