



## **Műszaki megbízhatóság alapú ütemezési eljárás fejlesztése**

Egyetemi doktori (PhD) értekezés

Szerző neve: Pusztai László Péter

Témavezető neve: Dr. Budai István

DEBRECENI EGYETEM

Természettudományi és Informatikai Doktori Tanács

Informatikai Tudományok Doktori Iskola

Debrecen, 2022.

Ezen értekezést a Debreceni Egyetem Természettudományi és Informatikai Doktori Tanács **Informatikai Tudományok Doktori Iskola, Informatikai rendszerek és hálózatok ipari alkalmazásokkal programja** keretében készítettem a Debreceni Egyetem Műszaki Doktori (PhD) fokozatának elnyerése céljából.

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

Debrecen, 2022.12.09.

Pusztai László Péter

Tanúsítom, hogy **Pusztai László Péter** doktorjelölt **2017-2022.** között a fent megnevezett Doktori Iskola **Informatikai rendszerek és hálózatok ipari alkalmazásokkal** programjának keretében irányításommal végezte munkáját. Az értekezésben foglalt eredményekhez a jelölt önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult. Nyilatkozom továbbá arról, hogy a tézisekben leírt eredmények nem képezik más PhD disszertáció részét.

Az értekezés elfogadását javaslom.

Debrecen, 2022.12.09.

Dr. Budai István

# Megbízhatóság-alapú projektütemezési eljárás fejlesztése

Értekezés a doktori (Ph.D.) fokozat megszerzése érdekében  
az *Informatika* tudományágban

Írta: ***Pusztai László Péter, okleveles logisztikai menedzser***

Készült a Debreceni Egyetem *Informatikai Tudományok* Doktori Iskolája  
(*Informatikai rendszerek és hálózatok ipari alkalmazásokkal* programja) keretében

Témavezető: ***Dr. Budai István***

Az értekezés bírálói:

Dr. ....  
Dr. ....  
Dr. ....

A bírálóbizottság:

elnök: Dr. ....  
tagok: Dr. ....  
Dr. ....  
Dr. ....  
Dr. ....

Az értekezés védésének időpontja: 2023. ....

# Tartalomjegyzék

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Rövidítések jegyzéke .....                                               | II |
| 1. A kutatás tárgya .....                                                | 4  |
| 1.1. A kutatás aktualitása és jelentősége .....                          | 6  |
| 1.2. Kutatási irányok a projektgyártás kockázatértékelése területén..... | 8  |
| 2. Szakirodalmi áttekintés .....                                         | 10 |
| 2.1. Termelési rendszert befolyásoló tényezők.....                       | 10 |
| 2.2. Projektmenedzsment napjainkban .....                                | 11 |
| 2.3. Kockázatok kezelése projektgyártásban.....                          | 14 |
| 2.3.1. Projekt átfutási idő meghatározásának módszerei.....              | 15 |
| 2.3.2. Sztochasztikus módszerek .....                                    | 26 |
| 2.4. Minőség és megbízhatóság az iparban.....                            | 30 |
| 2.4.1. Megbízhatóság mutatószámai .....                                  | 32 |
| 2.5. Digitális gyártás és Ipar 4.0 .....                                 | 35 |
| 2.5.1. Manufacturing Execution System – MES .....                        | 37 |
| 3. Célkitűzéseim, téziseim.....                                          | 41 |
| 3.1. A kutatás során alkalmazott módszerek ismertetése.....              | 42 |
| 3.1.1. Analytic Hierarchy Process (AHP) .....                            | 43 |
| 3.1.2. Quality Function Deployment (QFD) .....                           | 45 |
| 3.2. A kutatás lépései .....                                             | 49 |
| 4. Kockázat-alapú projektütemezési eljárás meghatározása .....           | 51 |
| 4.1. Az új módszerrel szemben támasztott követelmények .....             | 52 |
| 4.2. Az irodalmi elemzés eredményei.....                                 | 53 |

|        |                                                       |     |
|--------|-------------------------------------------------------|-----|
| 5.     | A termelésütemezéshez használt modell bemutatás ..... | 58  |
| 5.1.   | Az ütemezési keretrendszer.....                       | 60  |
| 6.     | A módszer gyakorlati alkalmazásának bemutatása .....  | 63  |
| 6.1.   | Ütemezés egy gép esetén.....                          | 63  |
| 6.1.1. | Szimuláció futtatása.....                             | 65  |
| 6.1.2. | Szimulációs eredmények értékelése .....               | 69  |
| 6.2.   | Ütemezés több gép esetén .....                        | 75  |
| 6.2.1. | Szimulációk futtatása .....                           | 76  |
| 6.2.2. | Eredmények értékelése .....                           | 77  |
| 6.2.3. | A műhelyek ütemezése .....                            | 80  |
| 7.     | Új tudományos megállapításaim, Téziseim .....         | 86  |
| 8.     | Összefoglalás .....                                   | 90  |
| 9.     | Summary .....                                         | 93  |
| 10.    | Irodalomjegyzék .....                                 | 96  |
| 11.    | Publikációk az értekezés témakörében.....             | 106 |
| 12.    | Egyéb publikációk .....                               | 107 |
|        | Táblázatjegyzék.....                                  | 110 |
| 13.    | Ábrajegyzék .....                                     | 111 |
| 14.    | Függelék .....                                        | 112 |
|        | Köszönetnyilvánítás.....                              | 121 |

## RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE

| <b>Rövidítés</b> | <b>Angol jelentés</b>                           | <b>Magyar jelentés</b>                              |
|------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| AHP              | Analytic Hierarchy Process                      | Analitikus hierarchikus eljárás                     |
| CPM              | Critical Path Method                            | Kritikus út módszer                                 |
| DMC              | Data Matrix Code                                | Adatmátrix kód                                      |
| EPC              | Event-driven Process Chain diagram              | Eseményvezérelt folyamatlánc diagram                |
| eEPC             | Extended Event-driven Process Chain diagram     | Kiterjesztett eseményvezérelt folyamatlánc diagram. |
| FFCPM            | Fully Fuzzy Critical Path Method                | Teljesen Fuzzy kritikus út módszer                  |
| KPI              | Key Process Indicator                           | Fő teljesítménymutató                               |
| MTBF             | Mean time between failures                      | Két hiba között eltelt átlagos idő                  |
| MTTR             | Mean time to repair                             | Átlagos javítási idő                                |
| PERT             | Program Evaluation and Review Technique         | Programértékelő és programellenőrző módszer         |
| PLC              | Programmable logic controller                   | Programozható logikai vezérlő                       |
| PMBOK            | Project Management Body of Knowledge            | Projektmenedzsment útmutató                         |
| RBS              | Risk Breakdown Structure                        | Kockázatlebontható struktúra                        |
| RS               | Risk score                                      | Kockázati szám                                      |
| TCP / IP         | Transmission Control Protocol/Internet Protocol | Átviteli vezérlő protokoll/internet-protokoll       |
| TPT              | Total Process Time                              | Teljes átfutási idő                                 |

|         |                             |                           |
|---------|-----------------------------|---------------------------|
| TPS     | Toyota Production System    | Toyota termelési rendszer |
| TT      | Takt time                   | Ütemidő                   |
| QFD     | Quality Function Deployment | Minőségfunkció lebontása  |
| QR code | Quick Response code         | „Gyors válasz”-kód        |
| VBA     | Visual Basic Application    | VBA Programnyelv          |

## 1. A KUTATÁS TÁRGYA

Minden piacon jelenlévő vállalatot ugyanaz a cél vezérli: minél több profitot termelni. Ezt a célt csakis úgy tudják megvalósítani, ha a vevők igényeit, elvárásait teljes mértékben kiszolgálják [1]. Gubán [2] alapján a vállalat által nyújtott termékekkel vagy szolgáltatásokkal, összefoglalóan javakkal, szemben megfogalmazható elvárások rendre a termék valamely jellemzőjére (mennyiség, minőség), illetve a hozzájutás körülményeire (hely, idő, ár) vonatkozik, amelyet összefoglalóan a logisztika 5M-jének is neveznek. Ezen elvárásokat a vevők rendszerint ugyanakkora mértékben tartják fontosnak, esetenként pedig hajlandóak lemondani egy igényről egy másik elvárás javára: mint amikor egy másik kontinensen jelenlévő terméket vásárolnak meg a lokális piachoz képest alacsonyabb áron, vagy éppen felárat fizetnek a termékhez való azonnali hozzájutásához.

A globalizáció és a technikai, technológiai fejlődés hatására a vevői elvárások is változás alatt vannak: a középkorban céhszerű működés volt az egyetlen lehetőség – vagyis kis mennyiségben egyedi megrendelés készült, addig az ezt felváltó manufaktúris működés a standard, de magasabb darabszámban legyártott termékek felé orientálódott, és az ipari forradalmak is egyfajta katalizátorként működtek a gyártóvállalatok életében [3].

A vevői igények a különféle terméket gyártó vállalat piacon való jelenléte miatt átalakulóban vannak, és ismét előtérbe helyeződött az egyedi termékek gyártása, alacsony átfutási idő mellett, a termelést már-már projektszerűen kezelve. Ilyen gyártási környezet mellett nehéz egy előre elkészített forgatókönyv alapján dolgozni, folyamatos kihívás elé állítják a termelésütemezést irányító szakembereket. Az általuk ismert és használt termelés szabályozási és –szervezési módszerek átalakítását igénylik, új szempontok alapján, helyenként kibővítvé, máshol egyszerűsítve.

A fentebb említett tényezőkön kívül olyan megatrendek is jelen vannak a piacokon, amelyek az üzleti terveik folyamatos finomhangolására készítetik a vállalatokat: ilyen többek között a digitalizáció valamint szervitizáció [4]. A digitalizáció



paradigmaváltó mivolta megkérdőjelezhetetlen, hiszen az adat-alapú döntéshozatal, valamint a gépekkel való és a gépek közötti kommunikáció támogatja a rugalmas gyártást. Segítségével előrejelezhetővé és ütemezhetővé válik a karbantartás, valamint a termékek minőségellenőrzése is magasabb szintre lép a szolgáltatott adatok alapján [5] [6]. Ennek eredményeként az erőforrások hatékonyabb felhasználása is összemérhetővé válik. Szervitizáció pedig a fogyasztóval történő szorosabb kapcsolatot jelenti, amely közös termék vagy technológiai fejlesztésben nyilvánul meg [4], amely elengedhetetlen egyedi termék gyártása során. A projektszerű gyártás rendszerint olyan termékekre irányul, amelyeknek értéke és ára magas, gyártása hosszú átfutási idővel bír [7]. A hosszú átfutási idő nem jelenti azt, hogy a vevőnek nem fontos a szállítási határidő, inkább azt, hogy a termék észlelt minőségbeli „javulásának” - vagyis hogy egyedileg összeállított terméket kaphat - elérése érdekében kevésbé lesz fontos a döntése során [7]. Az ilyen típusú termékeket gyártó vállalatoknak pedig – részint a sok hasonló berendezkedésű versenytárs miatt – minden egyes szempontot ugyanakkora fontossággal kell kezelni.

Az újfajta felfogás eredményeként nagy figyelmet kap az erőforrások optimális kihasználása és irányítása, ugyanis ezeknek döntő szerepe van a vállalati hatékonyságban. Polónyi [8] alapján a termelés és szolgáltatásnyújtás folyamatának 2 terület együttes hatékony működésében ragadható meg:

- 1) Transzformációs folyamat tervezése:

*Létesítményekkel kapcsolatos tervezés (elhelyezkedés, felszereltség, technológia, gépi és humánkapacitás, normák kialakítása) [8].*

- 2) Áramlási folyamatok irányítása (a tervezés során kialakított rendszer működtetése):

*Termék iránti igény meghatározása, gépi és humánerőforrás szervezése, alapanyag biztosítása, mindennapi termelésütemezés [8].*

A kutatásom során az áramlási folyamatok irányításával foglalkozom, ezen belül a vállalatnak ismert minőségi és mennyiségi igény mellett jelentkező, mindennapi ütemezéssel kapcsolatos kihívások és nehézségek kerülnek fókuszba.

### 1.1. A kutatás aktualitása és jelentősége

Minden vállalatnak elsődleges célja a profitszerzés, ennek pedig egyik visszafogó tényezője a gyártás során felismert bizonytalanságok és az előre nem ismert kockázatok. Ezek a tényezők a gyártás egészét meghatározzák, a vállalat első kapcsolódási pontjától, a beszerzéstől a végéig, egészen az elosztásig jelen vannak. A kockázatok és a bizonytalanság ronthatja a gyártandó termék minőségét, veszélyeztetheti a termék szállítási határidejét, amely rendszerint a gyártási költség megnövekedésével jár, ütemezési és kapacitásproblémákat von maga után [9]. Ezért – amennyire lehet – mindent meg kell tenni annak érdekében, hogy a gyártás teljes átfutási ideje kockázatokkal és bizonytalanságokkal terheltlen is megfelelő bizonyossággal előrejelezhető legyen, ennek megfelelően a végrehajtási fázisban hatékonyabb és rugalmasabb döntéshozatali eljárást biztosítva [9].

A jelenleg széleskörben alkalmazott kritikus út módszer (Critical Path Method - CPM és programértékelő és programellenőrző módszer (Project Evaluation and Review Technique – PERT) elemzések képesek a fent említett problémára megoldást nyújtani, azonban hatáskörük és megoldási, horizontjuk limitált, megbízhatóságuk pedig az eljárások miatt nem minden esetben kielégítő [10], [11]. A CPM és PERT módszerek legfőbb hiányosságai:

- A kritikus út módszer egy probléma determinisztikus leírását és annak megoldását jelenti. A sztochasztikus kritikus-út módszerek rendszerint csupán a tevékenységidők statisztikai valószínűségén alapuló leképezését jelenti.
- Rugalmatlan módszer, amely egy teljes átfutási időt, illetve ehhez az időhöz tartozó kritikus utat ad vissza eredményül, amely hatással lehet a kockázatelemzésbe bevont tevékenységek és erőforrások körébe.

- A módszer nem veszi figyelembe az idő előrehaladtát, és az ezzel együtt jelentkező problémák valószínűségének növekedését.
- A módszerek nem veszik figyelembe a folyamatos üzemelés mellett bekövetkező gépekkel vagy egyéb erőforrásokkal kapcsolatos kockázatokat és bizonytalanságokat.
- A PERT-elemzés kapcsán számos cikk bírálta az alkalmazott béta-eloszlás használhatóságát.
- A módszerek egy-egy projektre fókuszálnak, a vállalat által párhuzamosan futtatott egyéb termelési folyamatok nincsenek bemutatva, értékelve a modellezés, optimalizáció során.

A termelési rendszerek a technológiai fejlődésnek, valamint a folyamatos fejlesztés (Continuous Improvement – CI) megközelítésnek köszönhetően ugrásszerű javulást tudnak elérni, ha ezen módszereket megfelelően használják. Az Ipar 4.0 elképzelésének megfelelően precízen gyártó gépek képesek információt szolgáltatni nemcsak a termékről, hanem saját magukról is, amelynek következtében a gyártásban bekövetkező jelentéktelennek tűnő változás is nyomkövethetővé válik a termék teljes életútja mellett [12].

Ez a módszer néhány iparágban alapelvárássá vált, számos tanulmány született autó- [13], gyógyszeripari- [14] valamint ételnyomkövetés témájában [15]. Az adatoknak köszönhetően a gyártással kapcsolatos időadatok is könnyen elemezhetővé válnak, mint ahogy Itskovich [16] cikkében is látható. Matematikai modellek segítségével leírhatóvá és előrejelezhetővé válnak a tevékenységidők. Ennek eredményeként bármilyen tetszőleges tevékenységidő leírható mielőtt még a konkrét gyártás elindult volna. Erre példa a lean menedzsmentben használt mozdulatelemzés kiegészítve egy matematikai modellel, mint például korreláció vagy regresszióvizsgálat [17]. A gyártóberendezések a - gyártás körülményeinek folyamatos közzététele miatt – termék minőségi paramétereit figyelve a termék megbízhatóság is pontosabb alapokok nyugodhat, trendeket, valamint egyéb mintázatokat fedezhetünk fel a gépek állapotának változásában [18] [19].

Az Ipar 4.0-val rendszerint a tömegtermelés és célgépek használatával említik elsősorban, továbbá számos kutatás, iparban használt szoftver is azt célozza meg, hogy hogyan lehet adatot gyűjteni olyan környezetben, ahol a gépek nem képesek kommunikációra, illetve ahol a termelési folyamatlépések nagy részét vagy egészét ember végzi gépi segítséggel [20] [21]. Ilyen körülmények közötti adatelemzésről is készült tanulmány, így kijelenthető, hogy az adat-alapú folyamat elemzés már ilyen területeken sem jelent technológiai kihívást.

## 1.2. Kutatási irányok a projektgyártás kockázatértékelése területén

A projektmenedzsment, mint ahogy a jellemzőit ismerteti a PMBOK Guide [7] is, egy általában nagy költséggel, hosszú átfutási idővel rendelkező termelési tevékenységre jön létre, így ennek folytán a kockázatok és a bizonytalanságok felmérése, kontrollja is a kiemelt célok közé tartozik. Az útmutató alapján viszont elmondható, hogy a kockázatmenedzsment leginkább kvalitatív, vagyis minőségi módszereket foglal magába [7]. Az említett módszerek közös jellemzője, hogy a gyártási folyamat minden tevékenységét elemzik, várakozásoknak megfelelően kockázatokat és bizonytalansági tényezőket sorolnak fel, ezeket értékelik, továbbá intézkedéseket hoznak a potenciális hibaokok bekövetkezési valószínűségének csökkentésére [22], [23].

Az egyik vállalati gyakorlatban használt, és szabványok által elfogadott módszer az úgynevezett hibamód- és hatáselemzés, amely a kockázatokat 3 szempont szerint értékeli egy 1-10-ig terjedő skálán: súlyosság (S), előfordulási valószínűség (O) valamint detektálhatóság (D). A módszer úgy teszi összehasonlíthatóvá a feltárt hibamódokat, hogy a szempontra adott értékeléseket összeszorozza, így egy kockázati számot (Risk Priority Number – RPN) állít elő. Tanulmányok alapján kijelenthető, hogy a módszer fejlesztése folyamatos, próbálják minél adatalapúvá tenni annak érdekében, hogy többek között projektütemezési eljárásba illesszék [9], [24].

A PMBOK Guide ajánlása alapján egy egyszerűbb módszer alkalmazása is kielégítheti a projektmenedzsmenttel foglalkozókat: ennek a módszernek az úgynevezett kockázati-mátrixnak neveznek [7]. Az értékelési folyamat – hasonlóan az FMEA-hoz több szempont alapján történik, és a hibák két szempontú értékelésével egy kockázati szám kerül kiszámításra. A módszerek előnye, hogy könnyen elkészíthetők, viszont az értékelést végzők kockázattűrő-képességétől teljesen más értékek születhetnek, amelyek torzíthatják a kockázatok megítélését, így az azokra hozott akciókat vagy elkerülő megoldásokat is [7]. Matematikai optimalizációs modellek kiegészítéseként is szolgálhatnak a fent említett módszerek, például a fuzzy-logika implementációja is kiemelt terület a projektmenedzsmentben, mint például Pusztai et al. [25] cikkében. Ebben a művben az egyes tevékenységidők valószínűségét tagsági függvényként adták meg, valamint [26] tanulmányában „teljesen fuzzy” kritikus út (Fully Fuzzy Critical Path – FFCP) módszert mutattak be, illetve [27] cikkében következtethető, hogy a PERT módszer javításán is dolgoztak a fuzzy-logika segítségével.

## 2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A munkám bemutatása során az irodalomkutatással kezdtem, amelyet kritikusan elemzek, továbbá a jelenleg használt módszertani fejlesztésre irányuló munkám megalapozását ebben a fejezetben mutatom be.

### 2.1. Termelési rendszert befolyásoló tényezők

A vállalatok elsődleges célja, hogy bevételt és nem utolsó sorban profitot termeljen. Ez akkor érhető el, ha a vállalat által gyártott termék vagy nyújtott szolgáltatás a lehető legmagasabb szinten kiszolgálja a vevői elvárásokat, igényeket, mindezt a lehető legalacsonyabb költségek mellett. Ha a vevő úgy érzi, hogy a termékért vagy a szolgáltatásért kifizetett összeg megfelel az általa észlelt minőségnek, akkor a vevő elégedett lesz [28].

A gyártási szerkezet kiválasztása jelentős hatással van a vállalati értékteremtő folyamatokra, vagyis a vevő által észlelt termék- és/vagy szolgáltatás minőségére, illetve a folyamatok költségére is. A gyártási rendszer kijelölésében Demeter et al. [29] szerint az alábbi tényezők játszanak szerepet:

- Termék jellege: a vevő által vásárolt termékek tömegszerűségét foglalja magában, azaz a vevő által igényelt és a piac által kínált termékek mennyire bírnak egyedi vagy eltérő jellemzőkkel. Ebben a kategóriában két végletet neveznek meg a szerzők: standard vagy egyedi. Előbbi esetben gyártási helyszíntől, vállalattól függetlenül azonos termékeket készítenek magas darabszámmal, míg egyedi termékek korlátozott darabszámmal készülnek, a vevői elvárások teljes figyelembevételével.
- Termelési technológia: A gyártáshoz szükséges technológia – és ezen keresztül a gyártóberendezések bonyolultságát és alkalmazhatóságának körét jelenti. A termék alapvetően meghatározza, hogy milyen gépeket kell beszerezni – azonos termékek magas volumenű készítése során olyan célgépekkel folyik a termelés, amely csak adott feladatra készítenek el, míg alacsony volumenű gyártás esetén előfordulhatnak többcélú

gépek is, amelyek több feladat ellátására képesek, vagy a folyamat több pontján lehetséges őket használni.

- Szaktudás hozzáférhetősége: Abban az esetben, ha a teljes folyamatban részt kell venni, felügyelni kell, akkor a szaktudás is speciális lesz, ennek megfelelően többbe kerül, mint egy-egy folyamatlépésért felelős személy. Utóbbinak mind a betanítása, mind a pótlása kevesebb időbe telik, illetve ennek megfelelően alacsonyabb bért kaphat a munkavállaló, mint képzettebb, több folyamatlépést elvégző társa.

Az első kettő jellemző rendszerint a termék tulajdonságából fakad, utóbbi inkább a gyártási struktúra kiválasztásának következtében dől el. A két jellemző által meghatározható termék-folyamat mátrixban a főbb tevékenységtípusok a következők [29]:

- Projektgyártás: Egyedi termékgyártás többfunkciós eszközökkel, speciális szakképzettséggel történik, a termelési és a fogyasztási helyszín nem különül el egymástól (pl. házépítés). A vevő hajlandó várni a termék elkészültéért és nagyobb árat is fizetni.
- Sorozatgyártás: Néhány elemében eltérő alacsony volumenű, ritkán ismétlődő termékek, speciális gépekkel, így ennek megfelelően korlátozott rugalmasság a termék sokszínűségét tekintve.
- Tömeggyártás: Teljesen azonos termékek, nagy mennyiségben, megállás vagy átállás nélküli gyártása, kihasználva a méretgazdaságosság elvét. A munkaerő egy tevékenység ellátására kapacitált.

A piachoz és a vevői igényekhez nemcsak a gyártási struktúrát, hanem a beszerzést, készletezést, valamint az értékesítést is illeszteni szükséges a legnagyobb vevői elégedettségért, valamint a legkisebb gyártási költségért.

## 2.2. Projektmenedzsment napjainkban

Termékgyártással foglalkozó vállalat sikerességét meghatározó egyik fontos tényező a vevői igényekhez továbbá a technológia és a termék jellegéhez igazodó

gyártási struktúra alkalmazása. Abban az esetben, amikor a vevő egy olyan terméket vár el, amelynek kiemelkedően magas a testreszabási foka, így ennek megfelelően a létrehozott termék funkciójában azonos lehet más termékkel, de egyéb jellemzőiben teljesen különböző produktum készül, egyedi termék gyártásáról beszélünk. A vevői elvárások magas foka a testreszabás mértékében jelentősen meg tudja növelni a termék gyártásának a költségét [7]. Ez megjelenik a termék vételárában, továbbá a termék még nem ismert paramétereire nehezen tud előrejelzést készíteni a vállalat, így a gyártási idő is meghosszabbodik, mivel a pontos vevői igény és a termék készhez vétele között eltelt átfutási idő hosszú lehet. A helyzet további tulajdonsága, hogy projektgyártással készült termékek rendkívül erőforrás-igényesek, speciális ismereteket követelnek [30]. E jellemzőket magába foglaló rendszert projektnak, ennek szabályozásával megbízott területet projektmenedzsmentnek nevez a szakirodalom [29], [7].

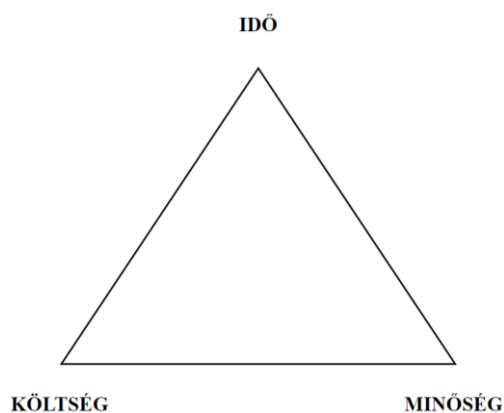
Az ISO 21502:2020 szabvány szerint a projekt egy „átmeneti erőfeszítés egy vagy több meghatározott cél elérése érdekében”. Az átmeneti erőfeszítés a fogalomban azt jelöli, hogy egy pontosan meghatározott tevékenység ellátására készült el, a folyamat nem ismétlődik, vagy ismétlődése korlátozott, valamint a rendszer időintervallummal rendelkezik, vagyis pontos kezdési és befejezési idővel behatárolt. A „meghatározott cél” komponens egy gyártási tevékenységre levetítve a termék elkészítését jelenti, mely szigorú idő-költség-minőség kritériumnak kell, hogy megfeleljen [31].

Az idő, a költség és a minőség minden projekt esetében kulcsfontosságú tényező, viszont a projekt jellegétől és a vállalat tevékenységétől függ, hogy milyen a prioritási sorrendjük. E tényezők képezik a projekt korlátait, amelyek az esetek többségében végesen állnak rendelkezésre, valamint egy-egy tényező módosítása hatással lehet a másik két elemre is. Ennek eredményeképpen rövidebb idő vagy alacsonyabb ráfordítás negatívan befolyásolhatja a minőséget [32]. A minőség változatlansága mellett várható esetleges költségnövekedés vagy a határidő



túllépése, melyek csökkenthetik szubjektív korlátként a vevői elégedettséget. További korlátozó tényező a hatókör, amely esetében adottak, hogy milyen feladatokat kell ellátni. Ez determinálja az időtényezőt is, azonban a tevékenység során alkalmazandó minőségirányítási előírások, szabványok, amelyek garantálják a termék minőségét tovább tudják fokozni a költségeket. E feltételeket külső hatások is befolyásolják, amelyek a fent említett idő-költség-minőség háromszöget szintén kibillenthetik az egyensúlyi állapotból, ám a felmerülő negatív hatásokat megfelelő tervezéssel lehet csökkenteni vagy kivédeni a rendelkezésre álló kapacitások függvényében [7], [33].

A projektmenedzser célja, hogy az esetlegesen felmerülő hatásokat kiiktassa vagy mérsékelje, melyek potenciálisan megzavarják vagy gátolják a projekt kivitelezését. A feladatok, folyamatok és a közreműködők koordinálása egyfajta kockázatmenedzsment is, hiszen az együttműködőknek úgy kell elérni a céljukat, hogy minimalizálják a veszteségeiket, legyen az időbeli, költségbeli vagy minőségbeli. Ehhez a tervezéstől a megvalósításig fel kell térképezni a potenciális veszélyforrásokat, amelyek lehetnek pénzügyi, külső, emberi erőforráshoz kötődő vagy tevékenységből fakadó kockázatok. A befolyásoló tényezők súlya, hatása a teljes folyamat során változhat, ezért szükséges a folyamatos monitorozásuk, illetve az esetleges hatásuk értékelése is, vagyis fel kell tárni, hogy a projektmunkatársak milyen lehetséges kockázati eseményekkel állnak szemben, és ezek kezelésére milyen beavatkozásokra van szükség [33].



1. ábra: Projektháromszög, [34]

A kockázatelemzéskor fel kell mérni, hogy, mekkora a valószínűsége, hogy be fog következni a negatív esemény, annak mekkora hatása van a teljes projekt megvalósulását tekintve, illetve a menedzsment milyen eszköztárral rendelkezik a beavatkozáshoz. A megfelelő tervezés keretében a fent említett háromszöghöz kötődő paramétereket szükséges használni, ezzel csökkenthető a folyamat során a veszteség, valamint kisebb valószínűséggel kell módosítani a projektterven [7].

### 2.3. Kockázatok kezelése projektgyártásban

A projektkockázat-menedzsment legfőbb célja, hogy segítse a vállalatot a projektcélok elérésében. A kockázatok, bizonytalanságok felmérése, listakészítés minden projektrésztvevő feladata, mely magába foglalja a problémák karakteristikájának leírását, valamint forrásának bemutatását, illetve ezen problémák lehetséges hatását. Ezen információk alapján a kockázatok prioritizálhatóvá, kategorizálhatóvá válnak, amely megkönnyíti a további szervezést és kockázatmenedzsmentet. Az azonosítást követően a felmért negatív kockázatok csökkentését célzó intézkedések megalkotása következik. A projekt teljes életciklusában figyelemmel kell követni és szükség szerint frissíteni kell ezt az adatbázist a jelenlegi és a következő projektek sikerességének biztosítása érdekében [7], [35].

A hatékony kockázatmenedzsment érdekében a kockázatok azonosításán felül érdemes kategorizálni a lehetséges veszélyforrásokat, a kategóriáknak megfelelő, felelős csapatot alkotni, akkor szakértőhöz kerülhet a kockázatelemzés, így az a kockázatra adott reakciók is szakszerűbbek [35]. A kockázatok értékelése az úgynevezett RBS (Risk Breakdown Structure - kockázatlebontási struktúra) feladata, melyben több szinten keresztül, hierarchikusan jeleníti meg a problémákat. A nullás szinten található az összes projektkockázat, az első szinten a főkategóriák: műszaki kockázat, menedzsment-kockázat, üzleti kockázat, valamint külső kockázat. A második szinten pedig az alkategóriák kibontása történik meg az 1. táblázat alapján:

1. táblázat: Kockázatlanbontási struktúra (RBS), [7]

| 0. RBS-szint                     | 1. RBS-szint         | 2. RBS-szint                                                          |
|----------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| A projektkockázat összes forrása | Műszaki kockázat     | Pl.: Műszaki folyamatok, technológia, műszaki interfészek.            |
|                                  | Menedzsment kockázat | Pl.: Projektmenedzsment, Szervezet, erőforrások, kommunikáció.        |
|                                  | Üzleti kockázat      | Pl.: Szerződéses feltételek, beszállítók és eladók, vevői stabilitás. |
|                                  | Külső kockázat       | Jogalkotás, versenytársak, szabályozások, devizaárfolyamok.           |

Az RBS-nek, mint módszernek nincsen priorizáló szerepe, így a sorrend nem tükrözi a különböző kockázatok fontosságát, ugyanis a sorrend projektről-projektre változik [7].

A kockázatelemzéshez számos módszer szolgálhat bemenetként, a teljesség igénye nélkül: Kiváltó ok elemzés (RCA - Root Cause Analysis) [36], Feltételezések és korlátok elemzése (Assumption & constraint analysis), SWOT- és PESTEL-elemzések (SWOT-analysis, PESTEL-analysis) [37] [38].

Ezek közül a módszerek közül viszont néhány a projektet, vagy a csapatot értékeli, konkrétan a kivitelezéssel kapcsolatos módszer a kiváltó ok elemzés lehet [39].

### 2.3.1. Projekt átfutási idő meghatározásának módszerei

A következő fejezetben bemutatom a gyakorlatban használt főbb projektgyártással kapcsolatos módszertanokat, azok céljaival, valamint hátrányaival együtt.

#### 2.3.1.1. Folyamatmodellezés

A folyamatmodellezés egy olyan - rendszerint - csoportos tevékenység, amely komplex rendszerek működésének, annak lépéssorozatának vizuális leírására szolgál. Az elkészült produktum alkalmas folyamatfejlesztés elősegítésére, viszont szolgálhat automatizáció alapjaként is. Folyamatfejlesztés esetén a jelenállapot vagy jövőállapot leírására használható, mely megfelelő alkalmazás esetén konzisztenciát hoz a folyamatba, a standardtól való eltérést pedig kiemeli, vagyis transzparensabb üzleti folyamatot eredményez. A modell használatával minden egyes folyamatban szereplő megismeri a feladatát, mind pedig a teljes folyamatot, vagyis, hogy adott tevékenység hogy járul hozzá a teljes eredményhez.

A modell részletessége, valamint az alkalmazott módszertan függ a feladat céljától, a rendszer komplexitásától, illetve a résztvevők tudásszintjétől is. Az üzleti, valamint tudományos életben használt módszerek elemkészletükben és logikájukban is eltérnek, így a meghatározott módszertanok akár külön-külön más eredményt szolgáltathatnak.

Az átfutási idővel számoló módszerek bemenetei rendszerint az alábbi elemeket foglalják magukban:

- Tevékenységek listája,
- Tevékenységek átfutási ideje (ciklusidő),
- A tevékenységek közötti logikai kapcsolat, amelyek megegyeznek a matematikai logikában használt logikai operátorokkal (és, vagy, kizáró vagy).

A folyamatmodellezés segítségével a folyamatban jelenlévő potenciális kockázatok is ábrázolhatók, új tevékenység, vagy meghosszabbított tevékenységidők formájában, esetleg plusz erőforrások hozzárendelésével.

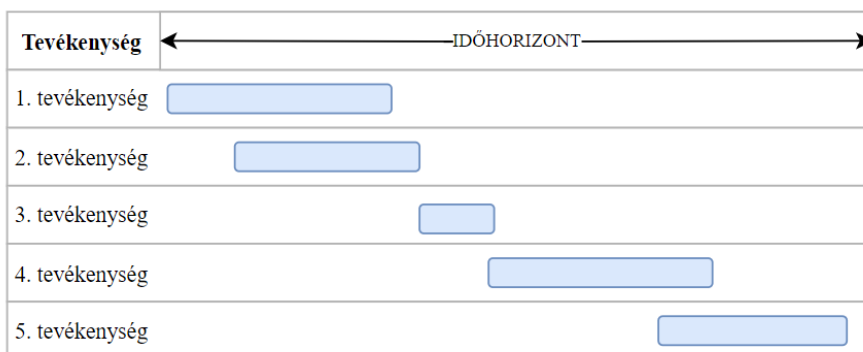
A gyakorlatban alkalmazott módszertanok skálája igen széles, viszont folyamat-szimulációra már limitáltabb kör áll rendelkezésre, többek között:

- Gantt-diagram, amely a projektmenedzsmentben alkalmazott vizuális módszertan,

- Eseményvezérelt folyamatlánc diagram (EPC), amely az egyik legelterjedtebb ábrázolási módszertan üzleti berkekben,
- Hálózati diagram, amely irányított gráf segítségével írja le egy projekt tevékenységeinek hálózatát,
- Petri-háló, amely ugyancsak gráfelméleti megvalósítás, amely nem csak üzleti folyamat megvalósítására szolgál.

#### Gantt-diagram:

A Gantt-diagram egy 20. század közepén megalkotott grafikus módszer tevékenységek egymásra épülésének bemutatására, valamint a teljes projektátviteli idő kiszámolására. A módszer a folyamatlépéseket külön sorokba rendezi, a tevékenységek által elfoglalt időtávot pedig egy idővonalon helyezi el, amely a felbontástól valamint a projekt nagyságától függően jelenthet órákat, napokat, heteket. A berajzolt sávok jelentik a tevékenység elvégzéséhez szükséges időt, amit a teljes projektre értelmezve, láthatóvá válnak a tevékenységek közötti függőségek [33], mint ahogy az a 2. ábrán látható:



2. ábra: Gantt-diagram, [34]

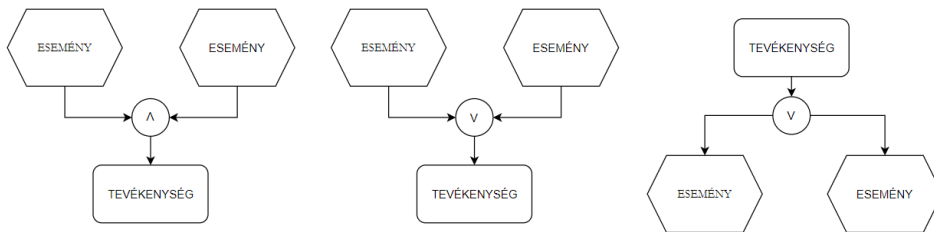
Az egyszerű az elkészítési módja, valamint a könnyű átláthatóság mellett a módszernek számos hátránya ismert:

1. A módszer nem szolgáltat megfelelő információt a tartalékidőről: A használata során nem tűnik ki egyértelműen a projekt teljes tartalékideje, valamint a diagram nem szolgáltat számszerű információt a szabad tartalékidőről. Ezzel a tervezési fázist hátráltatja, hiszen így nem végezhető el teljeskörűen az erőforrások allokálása.
2. Tevékenységek mennyiségi korlátja: Mint ahogy azt számos folyamatábrázolási technika utasításában megtalálható, a folyamatot a lehetőség szerinti legkevesebb komponensszámmal kell leírni. Az alacsonyabb felbontással egyidejűleg előfordulhat az a forgatókönyv, hogy amikor komplex projektet írunk le, információvesztés történik, és a döntéshozatal megalapozottsága megkérdőjelezhetővé válik [40].

### Eseményvezérelt folyamatlánc-diagram (EPC)

Az eseményvezérelt folyamatlánc-diagram egy üzleti életben használt módszertan, amelynek elemei eseményekből, tevékenységekből, valamint ezeket összekötő logikai elemekből állnak. A koncepció lényege, hogy minden tevékenység kivált a folyamat vagy rendszer állapotában egy változást, amely további tevékenységet vagy eseményt indukál. A módszer az üzleti folyamatok modellezésére használt, pl. vállalatirányítási rendszer (SAP) modellezési koncepciójának jelentős eleme. A folyamatmodellezés mellett a rendszernek kiterjesztett entitásai vannak, úgymint a szervezeti (organizational), adat és kockázat (data & risk) valamint vállalati architektúra (enterprise architecture). Ezek mindegyike beépíthető a modellbe, azért, hogy a lehető legtöbb információt adja a folyamatára [41]. A modellezésnek szigorú szabályai vannak, amelyet a 7PMG-ként ismer a tudományos élet [42]. Ez a szabályrendszer, amely kiter többek között az elemek használatára, utak számára, a „vagy” logikai operátor használatára.

A folyamatmodellezés a logikai operátorok segítségével az alábbiak alapján működik, amelyet a 3. ábra mutat be:



3. ábra: EPC diagram, [41]

### Hálózati diagram

A hálózati diagram egy olyan matematikában alkalmazott irányított gráf, amely csomópontok és élek (nyilak) együtteseként áll elő reprezentálva egy folyamatot, vagy bármilyen tetszőleges jelentésű rendszer.

Használatát tekintve, mivel bármilyen információt tartalmazhat, így felhasználási módja is ennek megfelelően sokrétű. Az elemek méretei, illetve körvanalaik erőssége nem bír jelentőséggel, viszont a csomópontok közötti logikai kapcsolatot az él valósítja meg. Az él lehet irányított, valamint irányítatlan, a jellemezni kívánt rendszer követelményei alapján [43].

*Definíció: Egy  $G$  gráf  $G = (V, E)$  rendezett pár, ahol  $V = \emptyset$  véges halmaz,  $E$  pedig a  $V$  halmaz elemeiből képezett párok halmaza.  $V$  elemeit a gráf csúcsának,  $E$  elemeit a gráf éleinek nevezzük. [44]*

*Definíció: Ha  $E$  elemei rendezett párok, akkor irányított gráfokról beszélünk. [44]*

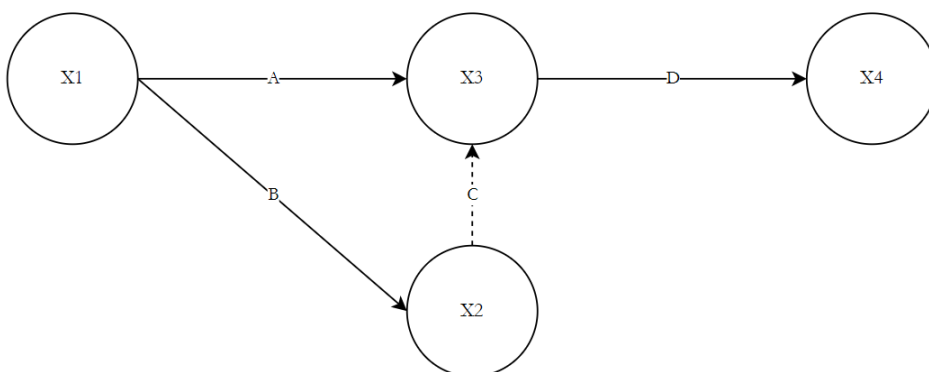
A gráfoknak kapacitásai is lehetnek, amelynek segítségével számos matematikai vagy informatikai probléma megoldható. Azon gráfot, amely csúcspontjainak kapacitásai vannak, hálózatként nevezzük [43].

Egy üzleti folyamat gráf segítségével a következőképp írható le:

- AOA hálózat (Activity On Arcs - tevékenységek az éleken): ilyenkor a tevékenységeket az élek, míg az eseményeket a csomópontok jelentik. Irányított gráf tulajdonsága miatt az éleknek kapacitásai lesznek, amely rendszerint a tevékenységidő lesz [44].
- AON hálózat (Activity on Nodes – tevékenység a csomópontokon): ebben az esetben a csomópontok jelölik a tevékenységeket, és az élek az eseményeket. Ebben az esetben az egyes csomópontok rendelkeznek korláttal. Ezt a megvalósítást nem csupán a projektmenedzsment, hanem számos logisztikai probléma leírásában alkalmazzák [44].

A projektmenedzsmentben való használatához a gráfok a következő feltételnek kell, hogy teljesüljenek [44], amelyet a 4. ábra is bemutat:

- 1 kezdő és 1 végponttal kell, hogy rendelkezzen a hálózat,
- Nem lehet a hálózatban egy korábbi csomópontra visszamutató él,
- Nem lehet önmagába mutató él a hálózatban,
- Egy tevékenységet egy él reprezentálhat,
- Két csomópont között maximálisan 1 él húzható,
- Szükség esetén nullás kapacitású él húzható két csomópont között,
- A tevékenységeket kapacitásukkal együtt ismerjük.



4. ábra: Hálózati modell, [10]

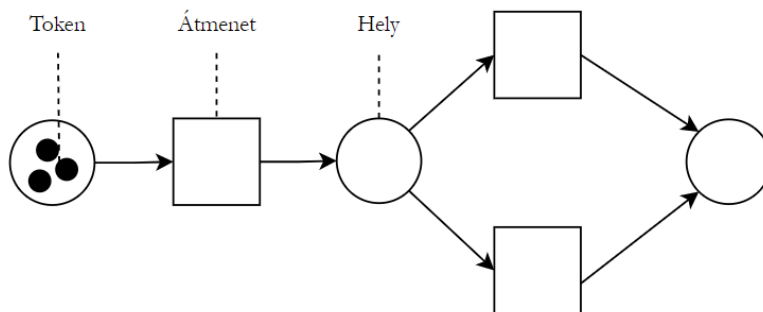


Ha ezeknek az alapvető szabályoknak megfelel a hálózat, alkalmazható rajta optimumszámítás a projektmenedzsmentben leginkább keresett legrövidebb átfutási idő meghatározására.

### Petri háló

A Petri-háló egy gráfelméleti leíró nyelv, amely mind párhuzamos, mind konkurens rendszerek modellezésére alkottak. 1964-ben Carl Adam Petri találta ki ezt a nyelvet. Előnye, hogy elkészítése a grafikai megjelenésen túl matematikai leíráson is alapszik, amelynek eredményeként egy transzparens és kiszámítható rendszer kap az elemző [45]. Használata leginkább az informatikában terjedt el, ahogy Benkő cikkében is látható [45], viszont egyre több szolgáltatással, gyártással vagy éppen logisztikával kapcsolatos megvalósítás is napvilágot lát.

A rendszert négy főbb elem alkotja, úgymint a hely (place), állapot (transition), token (token) valamint irányított él (arc), ahogy azt az 5. ábra is mutatja [46]:



5. ábra: Petri háló, [46]

A Petri-háló több módosításon is átesett, ezért beszélhetünk időalapú (időzített) és prioritás alapú, valamint színezett hálózatról is. További, informatikához és üzleti életéhez köthető alkalmazása az adatgazdag környezethez kapcsolható folyamatbányászat eredményeként létrejövő tevékenység-háló. A folyamatbányászat koncepciója alapján tevékenység, termék vagy szolgáltatás egyedi azonosí-

tója, valamint idő és erőforrás segítségével modellezhetővé válik. Folyamatszimulációs lehetőséget tartalmaz, ami egy idővonalon végigvezetve mutatja a tokenek alakulását, ezzel reprezentálva a tevékenységek idejét, hurkok és egyéb standardtól való eltérést. A módszer a digitalizált gyártás vagy szolgáltatásnyújtás elsődleges folyamatmodellje lehet [47], [48].

#### 2.3.1.2. Kritikus út módszer (CPM)

A kritikus út módszer a projektmenedzsmentben használt olyan matematikai gráfelméleti eszköz, amelynek célja, hogy egy projekthálózatban azonosításra kerüljenek a legrövidebb összes idővel rendelkező utat, ez alapján számítható legyen a teljes átfutási idő, meghatározásra kerüljenek a szűk keresztmetszet tevékenységek, amelyek lefutási időinek változása hatással van a teljes projekt átfutási idejére [11]. A módszert az 1950-es években találták ki a du Pont és a Sperry Rand kutatói [33].

A módszer alkalmazásával a nem szűk keresztmetszet tevékenységeknél kiszámíthatók az úgynevezett tartalékidők, amelyek a projekten belüli tevékenységek kezdeti és végidőpontjaihoz ad információt, amely az optimális erőforrás allokációt támogatja.

Mint minden folyamatmodellezési eszköz esetében, úgy itt is fontos megismerni a módszer alapdefinícióit, amely a projekt további értékelése során hasznos lehet, [10] alapján:

- Definíció: Az  $i$  csúcs korai időzítése ( $ET(i)$ ) az a legkorábbi időpont, amikor a csúcshoz tartozó esemény bekövetkezhet.
- Definíció: Az  $i$  csúcs késői időzítése ( $LT(i)$ ) az a legkésőbbi időpont, amikor a csúcshoz tartozó esemény bekövetkezhet anélkül, hogy a projekt befejezését késleltethetné.
- Definíció: Egy tevékenység, illetve az azt reprezentáló  $(i, j)$  él tűrészathára az a szám, amennyivel a tevékenység elkezdése a legkorábbi kezdési időpontjától eltolódhat anélkül, hogy a projekt befejezése késedelmet szenvedne.

- Definíció: *Egy nulla tűréshatárral rendelkező tevékenységet kritikus tevékenységnek hívunk.*
- Definíció: *Egy csupa kritikus tevékenységből álló, a kezdés csúcsból a befejezés csúcsba vezető utat kritikus útnak hívunk.*

### **A módszer hátrányai**

A kritikus út módszer konstans bemeneti értékek mellett nagyon sok információval szolgál, viszont számos hátrányt említ meg az irodalom [49]:

1. A módszer csak konstans értékek esetében tud eredményt szolgáltatni. A tevékenységidők változásában megtestesülő scenáriók vizsgálatát intenzív idő- és erőforrásigény jellemezheti.
2. A projekt tervezése során a tervező becslést alkalmaz a tevékenységek időinek meghatározására, viszont a gyakorlati életben túl sok a bizonytalanság, amely nem adható meg egy számértékkel.
3. Az erőforrások elosztását figyelmen kívül hagyja, csupán az időre fókuszál az elemzés.
4. Tevékenységidőben beállt jelentős változás megváltoztathatja a projekt kritikus útját, amely az egész projekttervezési fázis eredményét megkérdőjelezi.

#### **2.3.1.3. Project Evaluation and Review Technique (PERT)**

A PERT-elemzés a kritikus út módszer hiányosságainak a kiküszöbölésére, valamint kiegészítésére alkalmazott eszköz. A módszer alapfeltevése, hogy a tevékenységidők nem konstansok, hanem valamely intervallumban mozognak [11]. A metódus azt is feltételezi, hogy a kritikus úton levő tevékenységidők számítnak, a gyártás teljes átfutási idejét csak e tevékenységek figyelembevételével szükséges megadni. A számítás során a CPM által szolgáltatott egyetlen kritikus úton található összes tevékenységek várható értékének és varianciájának számításával áll elő [11].

Egy tevékenység várható értéke a minimális – legvalószínűbb – maximális tevékenységidők által meghatározott súlyozott átlagként áll elő az alábbiak szerint [10]:

$$E(T_{ij}) = \frac{a + 4m + b}{6} \quad (1)$$

ahol:

$a$  = minimális tevékenységidő (időegység, pl. óra)

$m$  = legjellemzőbb tevékenységidő (időegység, pl. óra)

$b$  = maximum tevékenységidő (időegység, pl. óra)

Mivel a módszer a várható érték számításához többféle tevékenységidőt használ fel, ezért a közöttük fennálló variancia kiszámításával kaphatjuk meg a várható értéktől vett négyzetes eltérést, amelynek segítségével később elkészíthető a PERT-diagram [10]:

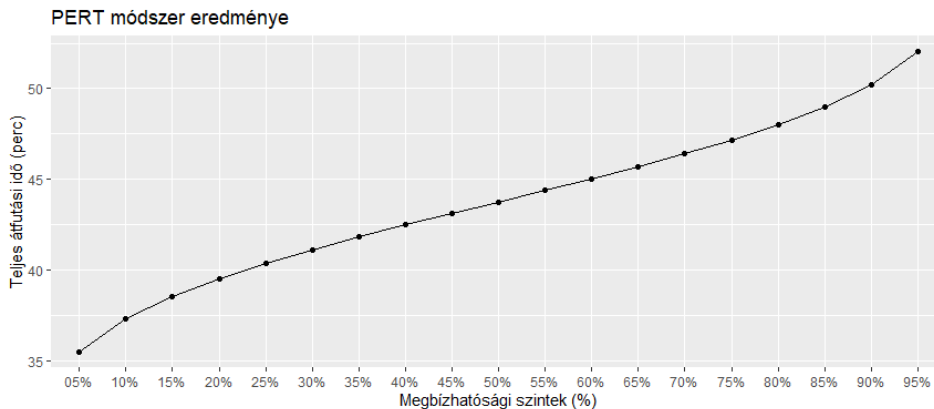
$$Var(T_{ij}) = \frac{(b - a)^2}{36} \quad (2)$$

ahol:

$a$  = minimális tevékenységidő (időegység, pl. óra)

$b$  = maximális tevékenységidő (időegység, pl. óra)

A számított információk alapján előállítható a projekt várható teljes átfutási ideje és teljes varianciája ( $\sum E(T_{ij})$  és  $\sum Var(T_{ij})$ ). A standard normális eloszlás táblázat felhasználásával megtudható, hogy bizonyos megbízhatósági szint mellett mennyi lesz a várható teljes átfutási idő, ezzel biztosítva a döntéshozók választási lehetőségét különböző kockázatvállalási attitűd mellett, ahogy azt a 6. ábrán is látható megbízhatósági szintenként meghatározott teljes átfutási idő:



6. ábra: Gyártási folyamat teljes átfutási idejének meghatározása PERT módszerrel, [11]

### A módszer hátrányai

A PERT-elemzés egy sokrétű eszköz, viszont számos hátránnyal bír [10], [11], [25]:

1. A módszer teljesen időalapú megközelítést alkalmaz, vagyis azt nem vizsgálja, hogy tevékenységidők változása mellett kell-e számolnia a vállalatnak plusz költséggel.
2. A módszer figyelmen kívül hagyja egy nem kritikus tevékenység megnövekedett időtartama miatt a kritikus útban beálló változásokat, amelyek eredményeként fals eredményre juthat a módszer, így a döntéshozó sem tud megalapozott döntést hozni.
3. A modell nem számol meghibásodással, ugyanis a három tevékenységidő meghatározása során nem feltételez szerszám- vagy gépmeghibásodást, amely folyamatos üzemelés mellett megtörténhet.
4. Elsősorban teljesen projektrendszerű gyártásnál alkalmazott módszertan, amely a tevékenységidőket szubjektívan meghatározza („előrejelzi”), nincs múltbeli pontos adat, amelyre lehetne alapozni a döntéshozást.

5. A PERT-elemzés folyamatos nyomonkövetést és frissítést igényel a becsült tevékenységidők pontatlansága miatt, így erőforrás-igénye nagyon magas a gyártás teljes idejére vonatkozóan.
6. Az alkalmazott béta-eloszlás használata erősen megkérdőjelezhető, hiszen nincs meggyőző érv ezen eloszlás a gyakorlatban való használatára. Számos, már megjelent tanulmány más és más eloszlást javasol a béta-eloszlás helyett, többek között: háromszög, log-normális eloszlás, Parkinson-eloszlás.

A módszer feltevése szerint a tevékenységidők függetlenek egymástól. Azonban Kocsi et al. [9] cikke szerint belátható, hogy gyártás során előállhatnak olyan problémák, amelyek egyszerre több tevékenységre hatnak, így a tevékenységek idejei pozitív korrelációban állnak egymással, azaz nem függetlenek.

### 2.3.2. Sztochasztikus módszerek

Más tudományterületekben, mint például pénzügyekben (portfólióelemzés, pénzügyi kockázatelemzés, befektetésértékelés) rendkívüli jelentőséggel bír sztochasztikus változók alkalmazása, hogy többféle forgatókönyvet tudjon értékelni az elemző. Ebben a fejezetben ennek elméleti háttérét mutatom be.

#### 2.3.2.1. Monte-Carlo szimuláció

A Monte-Carlo módszert a 20. század közepén hozta létre Neumann János és Stanislaw Ulam. Ez a módszer egy olyan sztochasztikus szimulációs módszer, amely adott keretek között pszeudovéletlen számok generálásával modellezi a rendszer viselkedését [50].

A véletlen számok 3 főbb kategóriára oszthatók [50] alapján:

- Igazi véletlen számok. Ilyen rendszer az ötöslottó is, ahol nem lehet adott számsor alapján megbízható előrejelzést készíteni a következő számokra.

- Pszeudovéletlen számok. Ez a csoport olyan számokat hoz létre, amely valamilyen algoritmus generál. Jellemzője, hogy periódusos, vagyis egy meghatározott szám generálása után ugyanazt a számsort fogja adni. Rendelkezik egy intervallummal, amely azonos kezdeti érték esetén ugyanazt a számsort fogja szolgáltatni a lineáris kongruenciális generátor, mint egyik leggyakrabban használt algoritmus:

$$x_{i+1} = (ax_i + c) \text{ modulo } m \quad (3)$$

ahol:

$x_0$  = mag,

$a$  = konstans szorzó,

$c$  = növekedés mértéke,

$m$  = modulus.

Elsősorban matematikai továbbá egyéb természettudományi kísérletek (pl. fizikai kísérletek) szimulációjára használják, viszont egyre több gazdasági, üzleti, illetve műszaki tudományban alkalmazzák: pénzügyi befektetések vizsgálata, kockázatkezelés, portfólió értékelése, előrejelzés készítése, valamint egyéb, folyamatmodellezési technikáknak alapkészletébe beletartozik.

A szimuláció futtatása valószínűségszámítási és statisztikai elemekkel számítják, míg értékelésük numerikus módszerrel történik. A véletlenszám generálásra legelterjedtebb módszer az úgy nevezett inverz eloszlásfüggvény módszer, amelyet számos számítógépes program alkalmaz, többek között az MS Excel (`vél()`) valamint R programozási nyelv (`runif()`), ahol  $[0;1]$  intervallumban kapjuk meg a generált véletlen számot [51].

#### 2.3.2.2. Valószínűségi eloszlások

Monte-Carlo szimuláció csakis akkor hajtható végre, ha megfelelő mennyiségű és minőségű paraméter áll rendelkezésre a modellalkotás során. Gyártási folyamat

Monte Carlo szimulációja során ilyen bemenő paraméter lehet a folyamat felépítése, az egyes tevékenységek függését leíró logikai kapcsolat, az egyes tevékenységidő-intervallumok, valamint a véletlenszám generáláshoz szükséges elméleti vagy tapasztalati eloszlás leírása. A szimuláció lefutása után véletlenül generált, egymástól független tevékenységidőket kap az elemző, amelynek eloszlása hasonlít a bemenetként megkapottra. Két fő kategóriába sorolhatók az eloszlások attól függően, hogy milyen típusú eredményt szolgáltatnak. Az egyik az egész értékeket generáló diszkrét eloszlás, amely például egy folyamat bekövetkeztét vagy épp elmaradását mutathatja, vagy folytonos, amely leginkább magas mérési skálájú adatokra vonatkozik, úgymint idő, költség vagy távolság [52].

**Valószínűségi változó:** Egy teljes eseményrendszer eseményeihez – a lehetséges kimenetek mindegyikéhez – egyértelműen valós számértékeket rendelünk, akkor az eseményeknek ezen a halmazon egy függvényt értelmezünk, amit valószínűségi változónak nevezünk [53].

**Eloszlásfüggvény:** A valószínűségi változó egyes értékeihez tartozó kumulált valószínűségeket mutatja. Jellemzői Kerékgyártó és szerzőtársai [53] alapján a  $(0,1)$  intervallumon értelmezett értékészlet, amelyen belül a függvény monoton növekszik, és képe pedig  $-\infty$ -ben a 0-hoz,  $\infty$ -ben az 1-hez tart.

**Sűrűségfüggvény:**  $X$  valószínűségi változó sűrűségfüggvénye  $f$  pontosan akkor, ha  $X$ -nek az  $F$ -fel jelölt eloszlásfüggvénye felírható az alábbi alakban:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt \quad (4)$$

Ez a képlet az eloszlásfüggvény deriváltja lesz. Jellemzője, hogy értéke nem lehet negatív, illetve a függvény alatti területnek az értéke pontosan 1 lesz [52], [53].



## Diszkrét eloszlások

Olyan valószínűségi változókat nevez diszkrétnek a szakirodalom, amely egy megszámlálhatóan sok elemből álló halmazból 1 valószínűséggel vesz fel egy értéket, vagyis:

$$\exists H = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}: P(x \in H) = 1 \quad (5)$$

A diszkrét eloszlás vizuális megjelenítésére a hisztogram ajánlott [52], [53].

Leggyakoribb és legismertebb diszkrét eloszlások:

2. táblázat: Diszkrét eloszlások [47]

| Eloszlás   | X értékei                   | $P(X=X_k)$                                     | $E(X)$    | $Var(X)$         |
|------------|-----------------------------|------------------------------------------------|-----------|------------------|
| Egyenletes | $X = \{1, 2, \dots, n\}$    | $\frac{1}{n}, \frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n}$ | $P$       | $\sqrt{pq}$      |
| Binomiális | $X = \{0, 1, 2, \dots, n\}$ | $\binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}$                 | $np$      | $\sqrt{npq}$     |
| Poisson    | $X = \{0, 1, 2, \dots, n\}$ | $\frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$            | $\lambda$ | $\sqrt{\lambda}$ |

## Folytonos eloszlások

A folytonos eloszlások a diszkrét eloszlások általánosítása, egy adott intervallumban a valószínűségi változók kontinuum számosságú potenciális kimenettel rendelkeznek:  $P(X = x) = 0$  [52], [53].

Leggyakoribb és legismertebb folytonos eloszlások:

3. táblázat: Folytonos eloszlások [47]

| Eloszlás      | X értékei           | Eloszlásfgv.            | Sűrűség fgv.                                                 | $E(X)$          | $Var(X)$                |
|---------------|---------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------|
| Egyenletes    | $[a, b]$            | $\frac{x-a}{b-a}$       | $\frac{1}{b-a}$                                              | $\frac{a+b}{2}$ | $\frac{b-a}{2\sqrt{3}}$ |
| Normális      | $(-\infty; \infty)$ | -                       | $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}$ | $m$             | $\sigma$                |
| Exponenciális | $(0, \infty)$       | $1 - e^{-\frac{1}{m}x}$ | $\frac{1}{m} e^{-\frac{1}{m}x}$                              | $m$             | $m$                     |

### 2.3.2.3. Sztochasztikus hálótervezés

Determinisztikus hálótervezés, vagyis a klasszikus kritikus út módszer egyik jelentős inputja az egyes tevékenységidők egymásra gyakorolt hatása (függőség vagy előfeltétel), valamint az egyes tevékenységekhez tartozó determinisztikus időadatok. A sztochasztikus kritikus út módszer egyik feltevése Schweickert [54] alapján, hogy minden  $x_1, x_2, \dots, x_n$  tevékenységhez tartozó idő egy nemnegatív véletlen számból előálló  $T(x_i)$  értéket jelent. Adott sztochasztikus hálózat két tetszőleges csomópontja között eltelt maximális idő (tehát a legrövidebb út, amelynek során minden tevékenység elvégződik) pedig a:

$$D(u, v) = \max_{\pi \in \Pi(u, v)} \left\{ \sum_{\pi} T(x_i) \right\} \quad (6)$$

egyenlettel írható le, az az a függvény célja a teljes átfutási idő minimalizálása. Ahogy azt Yuya és szerzőtársai [55] cikkében is leírja, az egyes tevékenységidők függetlenek egymástól, tehát az egyik tevékenység idejének változása nem áll szoros korrelációban másik tevékenység idejének változásával. Badiru cikkében [] a PERT-elemzés egy alternatíváját, a sztochasztikus CPM módszert és annak összehasonlítását mutatja be. A cikkben leírt modellek historikus adatok alapján dolgoznak.

## 2.4. Minőség és megbízhatóság az iparban

A gyártott termék minőségére, valamint megbízhatóságára a 20. század közepétől helyeztek nagy hangsúlyt a vevők és ezáltal a vállalatok is. Megbízhatóság alatt olyan termékjellemzőket értünk, amely a termék használhatóságát és a vevő által észlelt minőséget befolyásolják, mint például [28]:

- a termék élettartalma (tartósság),
- ezen idő alatti termék hibamentesség,

- a termék javíthatósága,
- annak karbantarthatósága.

Alapelvnek tekinthető, hogy a vevői elvárásoknak megfelelő terméket csakis olyan gépekkel képes gyártani egy vállalat, amelyek megbízhatónak mondhatók. Tényleges megbízhatóság elemzés alatt a tervszerű, strukturális alapokon nyugvó módszeres hibavizsgálatot értjük, amely magában foglalja az adatgyűjtés, statisztikai vizsgálatok, valamint hibaokok feltárásának folyamatát. A rendszerben dolgozó elemzők megpróbálják felderíteni a megbízhatósági problémák törvényszerűségét, a mérésekre egyszerű és összetett mutatókat készítenek, amelyeket folyamatosan figyelemmel követnek, eltérés esetén pedig beavatkoznak [56]. Az előző felsorolásban is megtalálható négy komponens folyamatos nyomonkövetése és fejlesztése a termékfejlesztés hatékonyságán is meglátszik, ezzel növelve a termék gazdasági-műszaki minőségét.

Egy gyártóberendezés hatékonyságának mutatóját három fő indikátor alapján határozzák meg: *megbízhatóság*, *hatékonyság*, *minőség*. Mind a háromnak azonos fontossága van, hiszen mindegyik hatással van a legyártott mennyiségre, valamint – ha még közvetve is – a termék minőségére [28].

Egy gyártóberendezés megbízhatóságát a rendelkezésre állás mutatójával lehet legjobban jellemezni, hiszen akkor, amikor a gép a gyártás rendelkezésére áll, akkor minden olyan hibától mentes, ami meggátolná őt a folyamatos termelésben. Ezt az indikátort a teljes termelésre fordítandó idő arányában adják meg [28], [57].

A hatékonyság, mint másik mutató pedig azt hivatott bemutatni, hogy a rendelkezésre álló időben hány terméket gyártott le a vállalat, és ezt arányosítja a tervezett kapacitáshoz. Ez megmutatja, hogy a gép mennyire hatékonyan használta fel azt az időt, amit a rendelkezésre állásban töltött [58].

A minőségi paraméter a jól legyártott termékek számát arányosítja az előzőekben megállapított hatékonysági mutatóban. Ez a gyártás során, akár a gép, akár az alapanyag hibájából fakadó rossz minőségű termékek arányát reprezentálja [28], [59], [19].

Mind a három mutatóról elmondható, hogy 0-1 közötti értéket vehetnek fel (hiszen az elméleti értékektől a valós értéknek nem szabadna magasabb értéket megkapni), és ennek a háromnak a szorzatát a szakirodalom általános berendezés hatékonyságnak (OEE – Overall Equipment Efficiency) nevezi, mely megmutatja, hogy egy gépet milyen hatékonysággal használ ki a vállalat, vizuális szemléltetése pedig a 7. ábrán látható:

$$OEE = A * P * Q \quad (7)$$

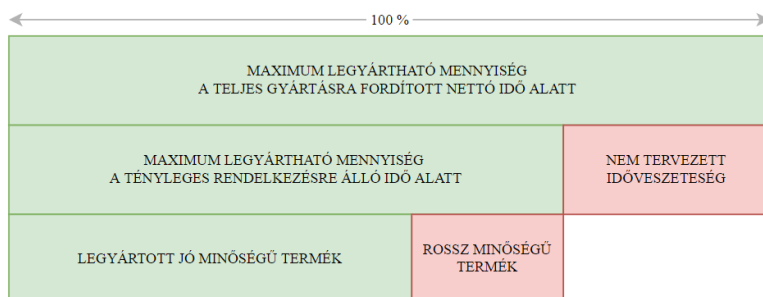
ahol:

$OEE$  = Általános Berendezés hatékonyság (%),

$A$  = Rendelkezésre állási mutató (%),

$P$  = Teljesítménymutató (%),

$Q$  = Minőségi mutató (%).



7. ábra: Általános berendezéshatékonyság lebontása, [28]

#### 2.4.1. Megbízhatóság mutatószámai

Az előző fejezetben is bemutatott általános berendezéshatékonyság mutatója rávilágít arra, hogy gép teljesítményéért nem csak a gép megbízhatósága felel, viszont annak óriási szeletét jelenti. A rendelkezésre állás csakis úgy javítható, ha

előre nem tervezett leállásoktól mentes a gyártás, továbbá, hiba bekövetkezésekor a lehető leggyorsabban kerül helyreállításra a gép [57].

Elmondható továbbá, hogy megfelelően karbantartott és megbízható gyártógép minőségi paramétereknek megfelelő terméket készít, így – ha még közvetve is – de hatással van erre a mutatóra is. A hatékonyságot tekintve pedig a gép teljesítményét jelenti adott terhelés mellett, vagyis azt, hogy a névleges kapacitását adott terhelés mellett tudja teljesíteni [28].

Kiemelt célként tekint rá az ipar, hogy az OEE-mutató értékét minél magasabb szintre emelje, így ennek megfelelően egy kiemelt terület a gépek megbízhatóságának vizsgálata. Kövesi [28] alapján a megbízhatósági indikátorok 4 fő csoportra oszthatók, amely összhangban van a vevői igényekkel is, hiszen ugyanaz az igény vonatkozik a gyártógépre, mint magára a gép által gyártott termékre is:

- 1) Hibamentesség: a termék teljes életútja (life cycle) alatt hibamentesen működjön, ne kelljen közbeavatkozni. Ennek vizsgálatára az alábbi indikátorok kerülnek meghatározásra ezen kategórián belül [28]:
  - Meghibásodási ráta: adott időintervallum alatt számított meghibásodás értéke, és még a működőképes gépek aránya.
  - Átlagos működési idő: a berendezés hibamentes működésének átlaga, amely magában foglalja az összes működési időt valamint a meghibásodások számát,
  - Meghibásodási valószínűség: kádgörbével ábrázolt valószínűségi függvény, amely 3 főbb részre bomlik: kezdeti problémák (magas hozzárendelt valószínűség), folyamatos használat (alacsonyabb hozzárendelt valószínűség), valamint az előrecedési szakasz (magas valószínűség).
  - Hibamentes működés valószínűsége: exponenciális eloszlással leírt függvény, amely az idő előrehaladtával egyre kisebb valószínűséget rendel a gyártás hibamentes fenntartásához,

- Meghibásodások közötti átlagos működési idő: A javítható berendezés kettő, folyamatos használat szakaszában meghibásodása között eltelt átlagos ideje.
- 2) Javíthatóság: Azt mutatja meg, hogy a gép esetleges problémája esetén mennyi időbe telik megjavítani azt, vagy éppen mennyire egyszerű megjavítani, milyen az alkatrészek elérhetősége, illetve a javítás után mennyire állítható vissza az eredeti állapot [28]. Az indikátorok:
- Átlagos javítási idő: a probléma észlelésétől a javítás elvégzéséig tartó átlagos idő,
  - Átlagos állásidő: az utolsó jó darab termék elkészítése és az első jó termék legyártása között eltelt idő, meghibásodás esetén,
  - Helyreállítási intenzitás: megmutatja, hogy ha egy bizonyos időpontig nem volt sikeres a helyreállítás, későbbi időintervallumban sikerülni fog,
  - Helyreállítási valószínűség: megmutatja, hogy mennyire valószínű a régi működési tulajdonságát visszaállítani a gépnek,
  - Javítás előtti átlagos várakozás idő: a probléma észlelésétől a javítás megkezdéséig eltelt átlagos várakozási idő.
- 3) Tartósság: A berendezés vagy termék azon időhorizontját értjük, amíg ugyanolyan minőséget tud biztosítani a használója fele [28]. Az indikátorok:
- Átlagos üzemi működés: a tervszerű, gép átlagos terhelése mellett érthető tervezett teljesítőképessége,
  - Átlagos élettartam: a termék vagy gép átlagos terhelési melletti maximális teljesítőképessége.
- 4) Tárolhatóság [28]: A terméknek vagy a gép egy komponensének azon idejét jelenti, amíg az biztonsággal felhasználható, minőségi romlás nélkül.

## 2.5. Digitális gyártás és Ipar 4.0

A technikai és technológiai fejlődés egy folyamatos, véget nem érő változás, kutatások, újítások sorozata, mely esetében nincsen végkifejlet vagy megérkezés. Az ipari folyamatok fejlődése manapság sokkal gyorsabb és intenzívebb, mint korábban, mégis az ipari forradalmak közül a jelenlegi egész más természetű, mint a korábbiak. A gőzgép vagy a villamosenergia felfedezése alapjaiban rengette meg a gyártási folyamatokat, az előállítható termékek mennyiségét, ma azonban az eddigi felhalmozott tudás, technológiai ismeretek pontosítása, felhasználó-baráttá tétele és a vevői igények kiszolgálása a domináns mozgatórugója a fejlesztéseknek [29].

A negyedik ipari forradalom alapja az adat és a digitalizáció, vagyis a folyamatos nyomonkövetés és mérés. A kihívás ezen hatalmas adatmennyiség, big data összefüggéseiben való értelmezése a döntés előkészítéshez, amely hozzájárulhat egy vállalkozás versenyképességéhez is. E tevékenységek fokozzák az értéklánc transzparenciáját, elősegíthetik az ellátási lánc szereplői közötti integrációt is, hiszen összehangolhatók a vevő és a beszállító folyamatai. Vannak olyan iparágak, amelyek esetében elterjedtek az Ipar 4.0 eszközei, ilyen például az autóipar, elektronika vagy a gyógyszeripar, ahol az egyes alkatrészek, összetevők minősége, nyomonkövetése kiemelt fontosságú az előállítástól a végtermékbe történő beépítésen át a fogyasztó által való felhasználásig. Világviszonylatban több jelentős iparági szereplő alkalmaz magas szintű Ipar 4.0 technológiákat, akik a beszállítóiktól is megkövetelik ugyanezt. Azonban le kell szögezni, hogy a vállalati szféra jelentős százaléka távol áll ettől az ipartechnológiai szinttől, vagyis a működésük nem adatalapú, sokkal inkább megérzésből dolgoznak, berögzött módszereket, folyamatokat alkalmaznak, amely csökkenti a cégek adaptációs képességét [60], [61].

Az adatgyűjtés, a rendszerek kialakítása az automatizáció, az elemzések készítése, a mesterséges intelligencia használata mind-mind olyan tényező, mely hatékonyabbá teszi a vállalkozás folyamatait, legyen az gyártási vagy logisztikai te-

rület. Finanziális oldalról megközelítve vállalati rendszerek ismerete, monitorozása egyfajta kiszámíthatóságot is eredményez, hiszen feltárulhatnak a veszteségek, a költségtakarékossági lehetőségek, a berendezések meghibásodásai, illetve az esetleges termékhibák, amelyekre rendszeres karbantartási ütemezést is ki lehet alakítani, elkerülve ezzel a váratlan gépleállásokat és árbevétel-kieséseket [62].

Az Ipar 4.0 alkalmazására igény mutatkozott olyan formán, hogy modell vagy feltételrendszer segítse a cégeket, hogy megtudják, alkalmasak-e a koncepció bevezetésére vagy megismerjék, milyen adottságokkal kell rendelkezni, hogy elinduljanak a modern működés útján. Ezt nevezzük Ipar 4.0 érettségi vagy felkészültségi modelleknek. Az egyik legfontosabb szempont a vállalatirányítási rendszer megléte, ez biztosítja a szabályozott működést, adatok gyűjtését, kezelését [63], [64].

Az automatizáció és a tömeggyártás kapcsán lényeges tényező, hogy a folyamatok szabályozottak és rendszeresen ismétlődők legyenek. Ezeket a folyamatokat egyszerűsíteni és átláthatóvá kell tenni a lean menedzsment szellemében, vagyis veszteségek ilyen formán azonosíthatók és csökkenthetők. A megismételhető és fix folyamatokat stabilizálni és lehetőség szerint javítani szükséges, ezekhez a gyűjtött adatok statisztikai módszertanokkal történő kiértékelése nyújthat segítséget, ezáltal fejleszthetők a folyamatok, trendek határozhatók meg és újítások vezethetők be. A mérések, adatgyűjtések digitális lebonyolítása segíti az adatfeldolgozást, gyorsabb és hatékonyabb is. A gyártási rendszerek, az adatok és berendezések jellege megkövetelheti a cég egyedi szoftverhasználatát. Akár gördülékenyebbé teheti a működést, ha saját folyamatokra tervezett, testreszabott és optimalizált szoftver használnak, ami egy magasabb technológiai szintet jelent. Ehhez szükséges már a vállalaton belüli szakértelem is, hiszen biztosítani kell a folyamatos szoftverfejlesztést, ezzel fokozva a további fejlődést és adaptációt.

A rendszerre akkor mondható, hogy elérte az Ipar 4.0 szintjét, amikor kialakításra kerül a termelési folyamatok ikerpárja az ún. digitwin, amely alkalmas tesztek, szimulációk, alternatív megoldások kipróbálására az éles termelésben való



alkalmazást megelőzően. Ebben a rendszerben már az adatgyűjtés, feldolgozás és kiértékelés alapján hozott döntések algoritmusok révén öltenek fizikai formát, mindezt automatikusan. A fent említett tényezők közül minél több megvalósul egy cég működésében, annál magasabb szintű az Ipar 4.0 érettségi szintje [65], [12].

A fent említett feltételrendszert különböző szempontok mentén lehet értékelni, melyek mellé mérőszámokat, súlyozásokat lehet meghatározni, mely segíti az értékelést. A legalapvetőbb a vállalatirányítási rendszer használata, amely horizontálisan és vertikálisan is összefogja a vállalat működését. A lean menedzsment szemlélet alkalmazása segíti az Ipar 4.0 technológia alkalmazását, hiszen a mérésre és adatalapú működésre, a veszteségminimalizálásra és hatékonyságnövekedésre ösztönzi a gyártási folyamatban működőket [66]. Így ez determinálja, hogy megfelelő informatikai infrastruktúrára is szükség van, hiszen másodpercenként akár több ezer adat is keletkezhet egy termelő vállalatnál, ahol tárolókapacitás, rendszergazdai tevékenység, tudatos jogosultsági és számítástechnikai rendszer bevezetése kell [67]. Az informatikai, hálózati szakértelmen túl elengedhetetlen mechatronikai, valamint programozói szaktudás, amely egyes területeken specialista, más területeken pedig generalista szemléletet igényel. A termelési folyamatok esetleges problémáinak megoldása, a gyártásirányítási rendszerek működtetéséhez átfogó, komplex szemléletre van szükség, amely a különböző bevezetések összekapcsolásának is köszönhető [68].

#### 2.5.1. Manufacturing Execution System – MES

Az Ipar 4.0 egyik legfőbb előnye, hogy a gyártás minden mozzanatáról számos adatot szolgáltat: ilyen információforrás maga a gyártógép, amely egy erre kialakított rendszerrel kommunikál, illetve a kommunikáció eredményeként egy olyan adatbázis kerül kialakításra, melynek eredményeként további elemzések is elkészíthetők. Ezt a rendszert mind a szakirodalom, mind az ipar MES-nek, vagyis Manufacturing Execution Systemnek nevezi, amely bár még nem kapott rendes magyar fordítást, de gyártási végrehajtási rendszernek fordítanak. A MES

egy olyan keretrendszer, amelynek elsődleges feladata a gyártásból származó összes adat gyűjtése, igény szerinti lekérdezése, továbbá – ami a rendszer egyik nagy előnyét jelenti – bizonyos szintig kontroll alatt tartja a gyártást [16], [69].

Az információcsere a szenzorokkal, érzékelőkkel, valamint erre a feladatra fejlesztett programmal (a későbbiekben „PLC”) felszerelt gépek, valamint a MES rendszer programja között valósul meg strukturált szöveges üzenetek formájában, kérdés-válasz formátumban. A gyártóberendezések üzenetet küldenek minden termékbeérkezésről, a gyártás körülményeiről, illetve a termék adott fázisának befejezéséről, mindezt időbélyeggel ellátva. Egyéb, gyártáshoz nem szükségszerűen köthető információk is küldésre kerülnek (ilyen a kapcsolat kialakulását és befejezését, valamint egyéb állapotüzenetek is). A kommunikáció számos protokollon keresztül megvalósulhat, azonban az egyik legelterjedtebb a „TCP/IP” alapú protokoll, vagyis adott IP-Port páros adja a közös csatornát [70].

A gépek minden gyártáshoz, illetve minőségi paraméterhez szükséges információt közölnek a rendszerrel, amely egy nagy adatbázisba kerül, és a termék életútjához kapcsolódik. A termékeket ennek megfelelően egyedi azonosítóval láthatják el, amelyre elterjedt technológia lehet a QR-kód (Quick Reponse), vagy DMC (Data Matrix Code) technológia. Ezek beolvasásával válik egyértelművé, hogy melyik termék áll éppen a gyártás adott lépése előtt, és itt kell eldönteni a rendszernek, hogy a termék már átesett-e a szükséges transzformációs lépéseken, vagy a meghatározott lépéssorozatban előbbi/későbbi fázisban van, és a megmunkálás nem lehetséges a gépen. Ez utóbbi tulajdonsága teszi közkedvelté az alkalmazást, hiszen a minőségügyi szempontoknak teljesen megfelelően dolgozik a rendszer, ezzel biztosítva a gyártás feletti kontrollt [5], [71].

A menedzsmentben kiemelt szerepet játszik a valós idejű információszerzés, amelyet a rendszer ugyanúgy képes lekezelni, hiszen minden információ rendelkezésre áll a gyártás főbb paramétereinek prezentálásához, indikátorok kiszámításához. Ilyen indikátor lehet például a ciklusidő (pl. két termék beolvasása között eltelt átlagos idő számítással), illetve egyéb, komplexebb indexek kalkuláci-

ója is, mint például az általános berendezés hatékonyság mutatója, amely a gyártógépek hatékonyságának meghatározására szolgál. Ennek az információnak a birtokában a folyamatot fejlesztőknek is egy olyan eszköztár áll rendelkezésre, mely a legújabb ipari forradalom előtt elképzelhetetlen volt. Segítségével valós idejű kimutatások készíthetők mind a gyár és a gyártás teljesítményét illetően, olyan a standardtól eltérő tevékenységek is felszínre kerülnek, amelyeket a lean menedzsment által végrehajtott Gemba sétákon nem láthatóak. Továbbá az adatokra alapozva elvégezhető a ciklusidő-értékelés is, amely kiemelt hatással lesz a kapacitások, szűk keresztmetszetek meghatározására. Ezen információk pedig a projektalapú gyártás során alkalmazhatóvá válnak, mivel a gépek mozgását megismerve, függvényekkel leírva egy új termék gyártása mozdulatonként, időadatokkal kiszámíthatóvá válik, így pontosabb kalkulációk készülhetnek a kapacitás, illetve a teljes átfutási idő meghatározásra [5], [68].

Szerencsére ezek a módszerek nem csupán akkor érvényesek, amikor berendezésekkel gyártunk, hiszen az iparban már ismertek olyan megoldások, amelynek segítségével manuális munka végzésekor is megoldható a szükséges adatok rögzítése, így az adat akkor is rendelkezésre áll, amikor a gépek nincsenek a MES rendszer által támasztott követelményeknek megfelelő szenzorokkal támogatva. A manuális adatbevitel némiképp meghosszabbítja egy-egy tevékenység idejét, viszont az általa nyert adatok segítségével nagyobb versenyelőnyre tehet szert a vállalat [67].

A MES nem feltétlenül egy szorosan kapcsolódó eleme egy vállalat informatikai rendszerének, de mindenképp egymást támogató egységként kell rá tekinteni. A MES egy moduláris rendszer, amelynek egyes elemei is kiszolgálhatják a vevői igényeket (pl. a gyártás főbb mutatóinak mérése vagy éppen a teljeskörű nyomonkövetés), viszont az egységek folyamatos fejlesztésével és újabb modulok implementációjával a vevői érték folyamatosan fenntartható, főként a vevői szempontból kiemelten fontos szállítási pontosságot tekintve. A vevői auditok leginkább vizsgált része a gyártás során előforduló potenciális hibákról, kocká-

zatokról és bizonytalanságokról készült elemzés, amely magába foglalja a lehetséges hibaokat, annak előfordulását, valamint súlyosságát, illetve ezekre a rendellenességekre javító- vagy elkerülő intézkedések elkészítését, felelőssel, határidővel. A teljeskörű gyártás-nyomonkövetés, valamint a kockázatok megfelelő menedzselésének prezentálása segíti a vállalatot a vevővel szembeni jobb tárgyalási pozíció megteremtésében. Egyes felvetések alapján a MES-nek nem csupán a termékekkel, valamint a gyártás körülményeinek adatbázisban való tárolásával kellene foglalkoznia, hanem egyéb, energiaforrás-ellenőrző tevékenységet is kellene végeznie, mivel ilyen formán a gyártás nem csupán pénzügyi, illetve műszaki oldalról, hanem környezeti szempontból is reprezentálva lenne [68], [72].

### 3. CÉLKITŰZÉSEIM, TÉZISEIM

A kutatásom elsődleges célja, hogy olyan kockázaton alapuló, projektgyártási struktúrába illő termelésütemezési eljárást fejlesszek, amely magába foglalja a potenciális műszaki megbízhatósági hibákat és azokra adott megoldások idejét, továbbá tartalmazza a gyártásban előforduló főbb mutatószámokat. A használatával a teljes átfutási idő közelítése pontosabb lesz a hagyományos determinisztikus módszerétől, hiszen plusz változó paraméterként szerepel a modellben a tevékenységidő, valamint a hiba előfordulása is. A projektgyártásban általánosan használt hagyományos sztochasztikus kritikus út módszerben megjelenő bizonytalanságokon, kockázatokon felül a módszer fejlesztése során a fő hangsúly a gépek meghibásodásának előrejelezhetőségén van. Ennek az egyik kiemelt indikátorai az úgynevezett MTBF, vagyis két hiba között eltelt átlagos időt, valamint a tényleges kapacitást rendkívüli módon befolyásoló átlagos állásidő mutató. Céloom, hogy ezen indikátorokat figyelembe vegyem a fejlesztett szimulációs környezetben, ezáltal pontos képet kapva a gyártásban felmerülő problémákról, a kapacitások kihasználtságáról.

Célkitűzések:

- C1: A legelterjedtebb projekt átfutási idő meghatározó módszerek kritikus elemzése.
- C2: Megbízhatósági indikátorok meghatározása és kiválasztása projekt átfutási idő meghatározásához Quality Function Deployment módszertan segítségével.
- C3: Projekt átfutási idő módszer fejlesztése a tevékenységekben, illetve a gépek meghibásodásában jelentkező bizonytalanságok figyelembevételével.
- C4: Kritikus útban potenciálisan bekövetkező változások értékelése.
- C5: Szimuláció eredményének megjelenítése a döntéshozók számára főbb gyártást leíró mutatókkal.

C6: Keretrendszer készítése a módszer inputjaként szolgáló adatok Ipar 4.0 alkalmazásokból való kigyűjtése.

A kutatásom elkészítése során megfogalmazott tézisek:

- T1: Megbízhatósági indikátorok fontosságának elemzése és kiválasztása többszemponútú döntéstámogató rendszer és termékfejlesztési módszertan kombinációjával.
- T2: Szimulációval támogatott projekttervezési modell hatékonyabban támogatja a döntéshozókat a tervezésben, mint a klasszikus determinisztikus modellek. Az eredeti kiindulási értékekhez viszonyítva akár 20 %-os javulás érhető el a módosított modell alkalmazásával.
- T3: Meghibásodások között eltelt átlagos idő, valamint átlagos állásidő indikátorok sztochasztikus kritikus út módszerben történő használata.
- T4: A ciklusonkénti MTBF indikátor alkalmazása a gépek műszaki megbízhatóságának egy újszerű megközelítése a projektszerű tervezés esetében. Lehetővé teszi, hogy az indikátor alkalmazásával szemben a változó mennyiségi és minőségi igényeket is be lehessen építeni a tervezés folyamatába, azaz így arról nyer az elemző és a döntéshozó információt, hogy egy adott projekt beindításakor várható-e egy adott berendezés meghibásodása olyan berendezések esetén, amelynek használata nem folyamatos.
- T5: Sztochasztikus kritikus út és lineáris programozási modell kombinációjával együtt megadható olyan termelésütemezési terv, amely figyelembe veszi a műhelyek meghibásodásának valószínűségét.

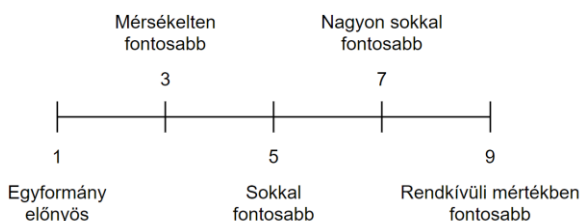
### 3.1. A kutatás során alkalmazott módszerek ismertetése

Jelen fejezetben a módszertani fejlesztés megalapozásához szükséges műszaki módszereket mutatom be.

### 3.1.1. Analytic Hierarchy Process (AHP)

Az „analitikus hierarchia folyamat” (Analytic Hierarchy Process; AHP) egy olyan strukturált, többszemponútú döntéshozatali eljárás, amelynek célja, hogy az objektív, szubjektív, valamint minőségi-mennyiségi elemek egységbe foglalását, úgynevezett szintézisét megteremtse. A módszer első változata 1977-ben látott napvilágot L. Saaty nyomán, amely további finomításokon, változtatásokon esett keresztül 1999-ben, majd 2001-ben nyerte el a vállalati gyakorlatban is széles körben használt formáját [73], [74]. A módszer ipari (használati) és tudományos (kutatási és használati) alkalmazása az információs technológia ugrásszerű fejlődésével összhangban egyre elterjedtebb lett. A fejlődésnek köszönhetően a döntéshozatali eljárásba bevont szempontok és alternatívák mennyisége jelentősen nőtt és egyre növekszik, viszont az eredmények megértésében, így a bonyolult rendszerek vizualizációjában akadnak még kihívások.

Az AHP módszer lényege, hogy a döntési helyzet megértése során megtalált összetevőket egyszerűbb egységekre bontjuk, majd ezt egy logikus rendszerbe rendezzük, így biztosítva az alternatívák és a szempontok összehasonlítását [75], [76]. Ez az összehasonlítás mennyiségi formában történik úgynevezett páros összehasonlítási mátrixban. A döntési modellben úgynevezett sajátvektor módszer használt, ahol intervallum-skálába rendezzük az egyes szempontok egymás között fennálló kapcsolatát, ahogyan az a 8. ábrán is látható:



8. ábra: Páros összehasonlítási mátrix skálaértékei, [75]

A páros összehasonlítás pedig egy mátrix formátumban érdemes értékelni, ahol a döntés mindkét szempontból megtörténik: először  $A_i$  alternatíva /  $C_i$  szempont

került összehasonlítása  $A_j$  alternatívával /  $C_j$  szemponttal, majd ennek fordítottja is számításra kerül. Ennek eredményeként a páros összehasonlítási mátrixban adott lesz egy egész szám (pl.  $A_i$  mérsékelten fontosabb, mint  $A_j$ , így az értékelés során az  $i$ -edik szempont 3-as értéket kap), illetve – ha a páros összehasonlítás során is konzisztensek akarunk maradni – annak a „párja” pedig az egész szám reciproka lesz ( $A_j$  mérsékelten jelentéktelenebb, mint  $A_i$  alternatíva, így a  $j$ -edik alternatíva értékelése az  $i$ -edikkel szemben  $\frac{1}{3}$  lesz).

4. táblázat: Páros összehasonlítási mátrix, [73]

|       | $A_1$     | $A_2$     | ... | $A_i$     |
|-------|-----------|-----------|-----|-----------|
| $A_1$ | $w_1/w_1$ | $w_1/w_2$ | ... | $w_1/w_i$ |
| $A_2$ | $w_2/w_1$ | $w_2/w_2$ | ... | $w_2/w_i$ |
| ...   | ...       | ...       | ... | ...       |
| $A_j$ | $w_j/w_1$ | $w_j/w_2$ | ... | $w_j/w_i$ |

ahol:

$i = j$ , egységmátrixot jelent,

$w$  = Indikátor fontosságának súlyszáma.

A módszer további lépése, hogy a páros összehasonlítási mátrix összeállítása után a mátrix értékeit standardizáljuk, és egy úgynevezett teljes konzisztencia vizsgálatnak is alávetjük, ezzel biztosítva, hogy nincsenek egymásnak ellentmondó vélemények a teljes rendszerben.

A döntési helyzet megoldásának a következő lépése a fontossági értékek standardizálása, majd konzisztencia-index és konzisztencia hányados számítása az alábbi képletek segítségével [73]:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (8)$$



$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (9)$$

ahol:

CI = Konzisztencia index, amely a standardizált mátrixból kerül kiszámítása,

RI = Random index, amely egy Saaty által létrehozott, elemszámonként eltérő generált szám,

CR = Konzisztencia hányados, amely az előző két értéknek a hányadosa.

A konzisztencia annál jobb, minél alacsonyabb a hányados értéke, viszont a szakirodalomban a 0,1 vagy az alatti érték az elfogadható, viszont kiemelik, hogy ennek értéke akár projektről projektre változhat, így akár magasabb érték is elfogadható lesz [73],[44].

Az AHP nem egy olyan módszer, amelyre minden kérdésre választ kaphat a döntéshozó, viszont nagyon jó kiegészítőjeként szolgálhat iparág-specifikus módszereknek, mint például a minőség házának (QFD – Quality Function Deployment) [77] vagy éppen kockázatértékelés során alkalmazott FMEA-nak (Hibamód- és hatáselemzés) [9], vagy a Data Envelopment Analysis-nek [78].

Ezekben a módszerekben az a közös, hogy az alkalmazás során reprezentálni kell a döntéshozó preferenciáját, ennek megfelelően a módszer eredménye is közelebb fog állni az objektív ítélethez.

### 3.1.2. Quality Function Deployment (QFD)

A „minőség háza”, vagy a „minőségfunkció lebontása” (Quality function deployment; QFD) olyan strukturált, rugalmas tervezőrendszer, amelynek középpontjában a vevő, illetve annak igényei állnak. A leginkább gyártásban használt módszert 1966-ban találta ki Yoji Akao, melyet elsősorban terméktervezésre és fejlesztésre alkalmaztak. Az idő előrehaladtával az üzleti folyamatme-

menedzsment fejlődésének köszönhetően egyre több kontinensen és iparágban került alkalmazásra a QFD, a gyártáson felül az ellátási lánc menedzsment témakörben is [79], [80].

A technika célja, hogy azonosítsa a vevői elvárásokat, ezeket sorba rendezze fontosságuk alapján, valamint megteremtse a kapcsolatot az elvárások, valamint a rendszer műszaki paraméterei között, ezzel biztosítva a kiváló minőségű termék- vagy szolgáltatástervezést [81].

A módszertan egy új megközelítést nyújt a vállalatok számára: míg a hagyományos minőségügyi rendszerek fókuszában a negatív minőség csökkentése áll, addig a QFD a pozitív minőséget próbálja meg maximalizálni [82]. A minőség pedig a vevő által észlelt elégedettséget jelenti. A gyakorlatban tapasztaltak szerint lényegesen lecsökkenthető az említett módszer segítségével a terméktervezés ideje és költsége, továbbá a termékek újratervezésének és módosításának mennyisége is, amely vállalati szempontból létfontosságú a mindennapi kiélezett versenyben. Ezen felül a módszer használatával lehetőség nyílik a konkurens cégek termékeinek értékelésére is, amely újabb távlatokat nyithat meg a vállalat számára.

A módszertan egyik sarkalatos pontja a vevői elvárások azonosítása. Annak érdekében, hogy az elemzés a legtöbb hasznot hozza a vállalat számára, előzetes vizsgálatot szükséges végezni a vállalat által nyújtott termékről vagy szolgáltatásról. Azokat érdemes bevonni a termékfejlesztésbe, akik jól ismerik a terméket, sőt, fogyasztják vagy fogyasztani fogják, ugyanis így lehetséges a jó minőségű információ összegyűjtése. A vevői szegmentációt követően pedig strukturált módszertanokkal szükséges kikérdezni a preferenciáiról. Ezt megtehetik kérdőív, fókuszcsoportos beszélgetés során, de akad olyan módszer is, amely megfigyeli a vevőt a termék használata közben, és ez alapján von le következtetéseket. A kérdések felvetésénél törekedni kell az olyan megfogalmazásra, melyek nem minőségi (kvalitatív) válaszokat eredményeznek, hanem számszerűsíthető, mennyiségi (kvantitatív) formában is megadhatók, ezzel könnyebbé téve az elemzés további részét.

A módszer másik alapvető pillére a meghatározott igények priorizálása, sorba rendezése. A vevő által meghatározott sorrendek nagyon hasznosak, viszont szubjektívek és néhány esetben pedig következtlenek, amely nem viszi előre a vállalati érdeket. A probléma feloldására többszemponútú döntéstámogató módszer alkalmazása javasolt, amely segíti a következtlenések, illetve szubjektivitás kiszűrését, ezzel jótékony hatással van a módszer sikerességére. Santos de Oliveira és szerzőtársai [83] összefoglaló cikke alapján elmondható, hogy az elmúlt évtizedekben (a cikk 1994 és 2015 között megszületett Scopus adatbázisból leszárt cikkeket vizsgált) számos alkalommal kombinálták a QFD módszertant az AHP-val, amely megfelelően alátámasztja a két módszer közös alkalmazhatóságát. A cikk ezen kívül rámutatott arra is, hogy a QFD „hagyományos” használata mellett (amelynek 47,17%-át még mindig a gyártás és ezen belül terméktervezés teszi ki) milyen új alkalmazási területeket találtak a technikának [83]:

- Ellátási lánc menedzsment: beszállító kiválasztás, gyár helyszínének kiválasztása,
- Stratégiai menedzsment: vállalatirányítási rendszer kiválasztása,
- Felsőoktatás: egyetemi kurzus létrehozása, egyéb felsőoktatás [84].

A módszer másik dimenzióján elhelyezkedő eleme a műszaki paraméterek meghatározása. A műszaki paraméterek kiválasztása során a vállalat belső teljesítményét, valamint a termelés technológiáját is ismerni kell. Az egyes technológiai jellemzők nagy hatással vannak a vállalat által előállított termék minőségére. A folyamat jelen lépésében meg kell vizsgálni, hogy a technikai paraméter változtatása hogyan hat a vevői elvárásokra, amelyet számszerűen szükséges megadni. Ezt, a két szempont (vevői elvárások és technikai paraméter) által közre zárt mátrixot kapcsolatmátrixnak nevezzük, ahol a korreláció erősségét egy skálán értékelik. A kapcsolati erősséget jelentő skála alapján lehet lineáris, továbbá exponenciális [79]. Takai és szerzőtársai [85] által megvizsgált 295 darab, QFD-t tartalmazó cikk alapján elmondható, hogy a tudományban elterjedtebb az 1-3-9-

es exponenciális skála alkalmazása, ahol az „1” a gyenge kapcsolatot, a „3” a közepes kapcsolatot, míg a „9”-es az erős kapcsolatot reprezentálja, köztes értékek nem értelmezhetők.

A kapcsolati mátrix kitöltését követően a követelmények fontossági sorrendjének meghatározása következett:

$$W_j = \sum_{i=1}^n d_i * r_{ij} \quad (10)$$

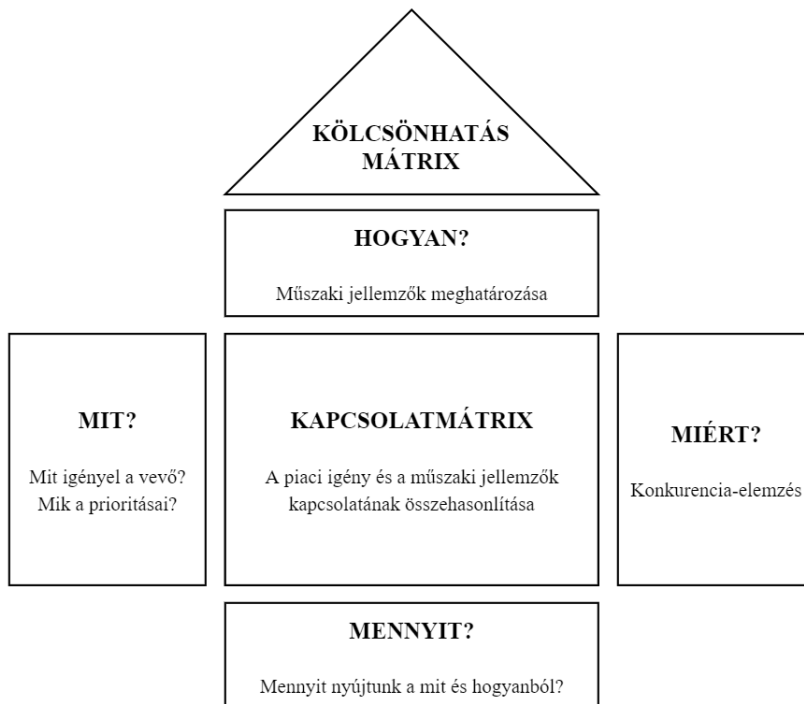
ahol:

$W_j$  = j-edik paraméter fontossága [%],

$d_i$  = i-edik követelmény fontossága [%],

$r_{ij}$  = a kapcsolati mátrix értéke j paraméter esetében {0,1,3,9}.

A dokumentum másik eredményeként a vállalat már a piacon jelen lévő termékek teljesítményét is felmérheti, mely segítheti a vállalatot az árazási módszerének, valamint egyéb hosszú távú stratégiai tervének kialakításában, amelyet a 9. ábra is bemutat [85].

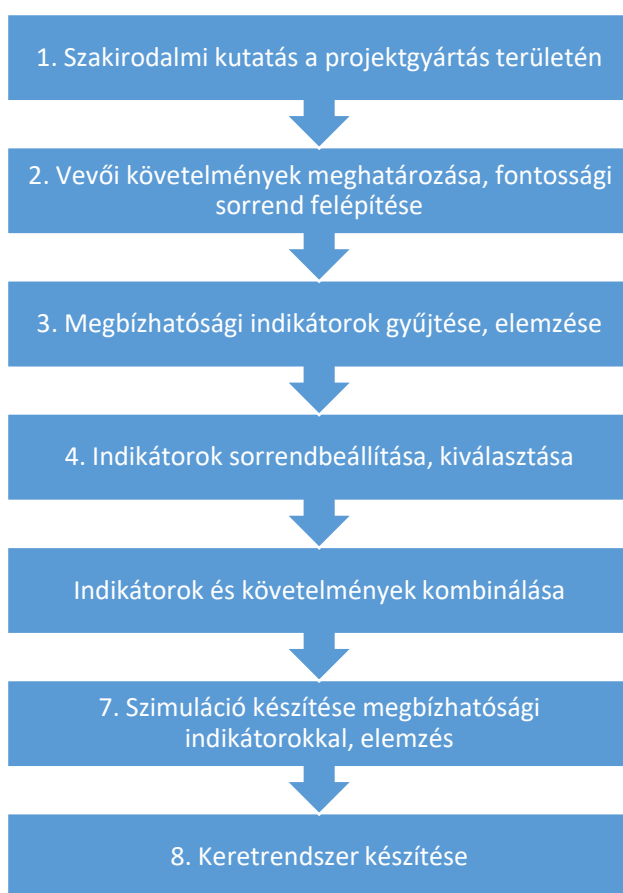


9. ábra: Minőség háza, [82]

Az előbb leírt elemekből egy grafikusan leírható, házszerű dokumentumot kapunk (9. ábra), amely elősegíti a kapott eredmények jobb megértését, illetve a munkában résztvevő részlegek közötti gyorsabb kommunikációt.

### 3.2. A kutatás lépései

Az előzőekben bemutatott kutatási célkitűzésekkel, valamint tézisekkel összhangban elkészült a kutatás ábráját (10. ábra):



10. ábra: Kutatás lépései

A kutatásom első lépése egy kiterjedt szakirodalmi áttekintés volt, ahol a projektgyártásban használt projektütemezési módszerek elemzését végeztem el. Az

elemzésem során megismerésre kerültek a főbb módszerek, azok előnyei és hátrányai, valamint a cikkekben található kutatási irányok.

A módszerek megismerését követően ipari szakemberekkel való konzultáció keretén belül olyan követelményrendszert alakítottam ki, melynek eredményeként az új módszer a projektütemezéshez gyakorlatiasabb megoldását tud szolgáltatni. A vizsgálat tárgyába olyan rendszer került, amelyek projektelven működnek, több műhellyel, így az egyes gyártási műhelyek hatékonysága is eltérő.

A kutatásomban kiemelt szerepet játszott a megbízhatóság témaköre is, ahol 12 indikátor került kiválasztásra, majd elemzésre. Az előző lépésben gyűjtött követelmények az indikátorokkal implementálásra kerültek a QFD, „Quality Function Deployment” nevezetű fejlesztési keretrendszerbe, ahol az egyes követelmények és a technikai paraméterek kapcsolata került meghatározásra, továbbá az AHP, „Analytich Hierarchy Process” nevű többszempon্তু döntéstámogató módszer segítségével az elvárások rangsorolásra kerültek. A módszerem eredményeként meghatározásra kerültek azok az indikátorok, amelyek a legfontosabbak a projektütemezés szempontjából.

A legfontosabb indikátorok kiválasztását követően szimulációs modellembe építettem. Ezt követően a kapott eredmények elemzésre kerültek az iparban is széles körben használt mutatók alapján.

A szimulációs eredmények és a kutatás kimeneteleként egy olyan keretrendszer került kialakításra, mely iparágfüggetlenül alkalmazható, kis szériás projektgyártási rendszer ütemezésének vizsgálatához.

#### 4. KOCKÁZAT-ALAPÚ PROJEKTÜTEMEZÉSI ELJÁRÁS MEGHATÁROZÁSA

Annak érdekében, hogy minél gyakorlatközelibb módszert lehessen fejleszteni, szakirodalmi áttekintésen és gyakorlati tapasztalton nyugvó módszereket szükséges használni a kutatás során. Első lépcsőfokként szekunder kutatás elvégzése történt meg, ahol a szakirodalomban fellelhető megbízhatósági mutatók kerültek kigyűjtésre, amelyet egy validáció követett gyakorlati szakemberekkel.

Ezt követően nemzetközileg ismert és elismert cikkadatbázisokban való keresés következett, amelyben meghatározásra kerültek a megbízhatósági indikátorok használatának gyakorisága. Ezen adatbázisok a minőségi szempontoknak megfelelően a *ScienceDirect*, *Scopus*, *Elsevier* voltak.

Azért, hogy a legfrissebb tudás álljon a rendelkezésem, 2017-től megjelent cikkekre támaszkodtam az elemzés folyamán. Ennek lényege, hogy a folyamatosan változó piaci környezet miatt, a jelenlegi vállalati igények kapjanak hangsúlyt a módszertan kidolgozásakor.

Az irodalomkutatásom során olyan kulcsszavak, valamint kulcsszó-kombinációk kerültek elemzésre, melyet a kutatók felhasználtak a cikkükben is [49]:

$$\begin{aligned} & (Process \cup machine \cup production \cup manufacturing) \cap \\ & (Reliability \cup uncertainty \cup stochastic) \cap \\ & (simulation \cup analysis) \end{aligned}$$

Ennek eredményeként 15 releváns cikk került további vizsgálatra. Az elemzés során megállapításra került, hogy egyes cikkekben milyen módszereket, mutatókat használnak a gépek megbízhatóságának vizsgálatára. Ennek összefoglalásaként egy keresztábrát, valamint egy hisztogramot állítottam elő.

#### 4.1. Az új módszerrel szemben támasztott követelmények

A technológiai fejlődésnek köszönhetően a vállalatok által támasztott követelmények reprezentációja is kiemelt szerep kap módszertani fejlesztéskor. Mivel a vállalatoknak korlátozott lehetőségük van a döntés meghozatalára, melyet szűkíthet akár idő- vagy pénzbeli korlát vagy akár az erőforrások váltakozó rendelkezésre állása is. A felmérés során 7 egyértelműen megkülönböztethető igényt állapítottam gyakorlati szakemberek segítségével:

- 1) **Időn alapuló módszertan fejlesztése (CR1):** Az egyes kockázatok vagy bizonytalanságok több jellemzőjét sérti meg egy projektnek. Kifeszített gyártás esetén, amikor az egyik projekt csúszása egy másik projekt kezdeti időpontját is befolyásolhatja, úgy fontosabb lesz ez az időindikátor a költséggel valamint a minőséggel szemben.
- 2) **Mérhetőség (CR2):** Számszerűsíteni lehessen a várható idő vagy költségnövekményt, amely releváns veszélyként fenyegeti a projektet.
- 3) **A problémák egymásra hatásának implementációja (CR3):** A folyamatba beépült problémák között korreláció fedezhető fel. Az új módszertannak figyelembe kell vennie ezeknek a problémáknak az egymásra gyakorolt hatását.
- 4) **Gyakoriság (CR4):** A probléma felmerülésének gyakorisága alapján tudjon szimulációt futtatni.
- 5) **A projektben minden kritikus útban beálló változás rögzítése (CR5):** Amikor a kockázat bekövetkezésekor a javító intézkedések jelentős időt vesznek igénybe, megváltozhat a tervezéskor determinisztikusan megadott tevékenység átfutási idő, és ezzel párhuzamosan a kritikus út is. Ennek akkor van jelentősége, amikor egy nem kritikus tevékenységnek azonosított tevékenységben áll be egy hosszabb probléma-elhárítási idő.
- 6) **Termelésütemezési eljárásba való integráció lehetősége (CR6):** Az új módszer segítségével mind az egyedi projekt, mind kontextusba (több projektben) helyezve állja meg a helyét.



- 7) **Alacsony számítási kapacitás/idő (CR7):** Az alkalmazni kívánt módszer illetve a kiválasztott indikátor ne legyen számításigényes, hiszen annak implementálása sztochasztikus környezetbe jelentősen megnövelné a döntésre fordítandó időt.

#### 4.2. Az irodalmi elemzés eredményei

Ahogy az az előző fejezetben (4.1) leírtam, az indikátorok vizsgálata a szűrés után 15 cikkben keresztül történt meg. A cikkek nemzetközileg ismert és elismert folyóirat-adatbázisokból kerültek ki. A cikkek fókuszja a termelés hatékonyságára ható megbízhatósági indikátorokkal való elemzés volt. E cikkek analízisa eredményeként kigyűjtöttem, hogy egy-egy cikkből milyen mutatókkal foglalkoztak, ezzel bizonyítva az indikátorok helyét gyakorlati környezetben. Az összefoglaló a 5. táblázat található, ahol az RI előtag a Reliability Indicator, vagyis megbízhatósági indikátor rövidítése. Az előtag utáni számok pedig az indexet jelölik. Ez a jelölésrendszer azért került bevezetésre, hogy a későbbi táblázatokban egyértelmű legyen, melyik indikátorról írok.

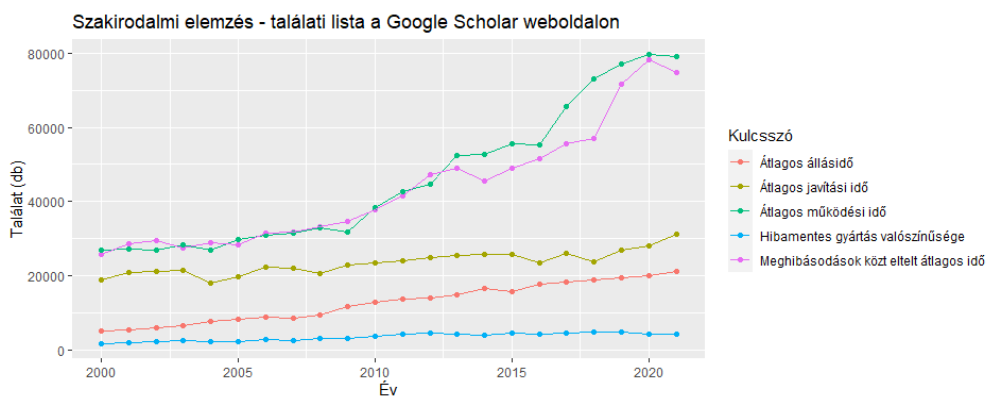
5. táblázat: Szakirodalom értékelési mátrix, [49]

| Cikk | Átlagos működési idő (RI1) | Javítás előtti átlagos várakozási idő (RI2) | 2 hiba között eltelt átlagos idő (RI3) | Átlagos állásidő (RI4) | Hibamentes gyártás valószínűség (RI5) | Átlagos javítási idő (RI6) | Átlagos élettartam (RI7) |
|------|----------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| [86] | X                          | X                                           | X                                      | -                      | -                                     | -                          | -                        |
| [65] | X                          | X                                           | X                                      | -                      | -                                     | X                          | -                        |
| [87] | X                          | -                                           | -                                      | X                      | -                                     | -                          | -                        |
| [88] | -                          | -                                           | -                                      | -                      | -                                     | -                          | X                        |
| [89] | -                          | -                                           | X                                      | X                      | -                                     | -                          | X                        |
| [90] | -                          | X                                           | X                                      | X                      | -                                     | X                          | -                        |
| [91] | -                          | X                                           | X                                      | X                      | -                                     | -                          | -                        |
| [92] | X                          | X                                           | X                                      | X                      | -                                     | -                          | X                        |
| [93] | -                          | X                                           | X                                      | X                      | -                                     | -                          | -                        |
| [94] | -                          | -                                           | X                                      | -                      | X                                     | -                          | -                        |
| [95] | -                          | X                                           | X                                      | X                      | -                                     | -                          | -                        |
| [96] | X                          | X                                           | X                                      | X                      | -                                     | X                          | X                        |
| [97] | X                          | X                                           | X                                      | X                      | -                                     | -                          | X                        |
| [98] | X                          | X                                           | X                                      | -                      | -                                     | X                          | -                        |
| [99] | X                          | X                                           | X                                      | -                      | -                                     | -                          | -                        |
| Σ    | 8                          | 11                                          | 13                                     | 9                      | 1                                     | 4                          | 5                        |

„X” = Foglalkozott vele, „-” Nem foglalkozott vele

Az elemzést követően elmondható, hogy egyértelműen a két meghibásodás között eltelt átlagos idő (MTBF) mutatója számít mérvadónak, míg a szakirodalomban a legkevésbé alkalmazott index az „hibamentes gyártás valószínűsége” az elemzés eredménye alapján. Ez az indikátornak a „népszerűtlenségét” annak köszönheti, hogy a SMED – (Single Minute Exchange of Dies - 10 perc alatti szerzőcsere) felhívja a figyelmet arra, hogy a karbantartás vagy a javítás külső és belső tevékenységekre is bontható, vagyis mindaddig, amíg minden tevékenység nem készül el, addig nem indulhat el újra a gyártás. Ennek köszönhetően az átlagos javítási idő (RI6) kapacitástervezéskor és termelésütemezéskor nem szolgáltat elegendő információt a döntéshozók részére. E helyett az indikátor helyett alkalmazandó a minden magában foglaló átlagos állásidő (RI4) mutatójának használata tűnik célszerűnek.

Az előző táblázatban meghatározott legnépszerűbb, valamint legkevésbé népszerű kulcsszót további tesztnek vetettem alá: Volker Strobel python nyelven megírt „Academic keyword finder” nevű alkalmazását [100] használva megnéztem, hogy adott kulcsszó milyen gyakorisággal fordult elő az elmúlt 2000 és 2021 között évente a Google Scholar adatbázisában. Ennek eredményeként látható, hogy két kiugró, valamint kettő kevésbé kiugró értékünk van, míg egy a többihez viszonyítva alacsony szinten van, ahogy a 11. ábrán is kiolvasható:



11. ábra: További szakirodalmi elemzés a négy legfontosabb és a legkevésbé fontos indikátorra, [100]

Kiemelkedő találati aránnyal rendelkezik az átlagos működési idő, valamint a meghibásodások között eltelt átlagos idő mutatói – ezek a kulcsszavak mindenképp foglalkoztatják a tudományos életet. Az előzőhöz viszonyítva közel fele akkora találattal rendelkezik az átlagos javítási idő, valamint az átlagos állásidő mutató. Viszont érdemes megemlíteni, hogy az átlagos állásidő és az átlagos működési idő egymást kiegészítő mutatók. Az átlagos javítási idő pedig népszerűségét annak köszönheti elsősorban, hogy számos karbantartási / javítási idő csökkentő kutatás készül.

A QFD modell alkalmazásához nem elégséges csupán a „műszaki jellemzők” pontos meghatározása, hanem a vevői igények definiálása, a pontos rangsor felállítása is kiemelt fontossággal bír. Ennek használatára az AHP (Analytic Hierarchy Process) módszertant alkalmazása tűnt a legcélszerűbbnek, részint annak ipari és tudományos felhasználása, részint pedig annak mennyiségi jellemzőjével való leírása miatt. A módszertan alkalmazása során szakértői interjúk keretében került sor, amelynek során az egyes kritériumok kerültek páronként összehasonlításra. Ennek eredményét (standardizált táblázat) a következő, 6. táblázatban láthatjuk, amelynek értékelése a konzisztencia index alapján  $CI = 0,104$ .

6. táblázat: AHP normalizált táblázat

| KRITÉRIUMOK | CR1   | CR2   | CR3   | CR4   | CR5   | CR6   | CR7   | FONTOSSÁG |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| CR1         | 0,241 | 0,199 | 0,200 | 0,462 | 0,272 | 0,227 | 0,176 | 0,254     |
| CR2         | 0,241 | 0,199 | 0,200 | 0,103 | 0,136 | 0,227 | 0,176 | 0,183     |
| CR3         | 0,048 | 0,040 | 0,040 | 0,051 | 0,019 | 0,045 | 0,059 | 0,043     |
| CR4         | 0,027 | 0,099 | 0,040 | 0,051 | 0,136 | 0,045 | 0,118 | 0,074     |
| CR5         | 0,121 | 0,199 | 0,280 | 0,051 | 0,136 | 0,114 | 0,294 | 0,171     |
| CR6         | 0,241 | 0,199 | 0,200 | 0,256 | 0,272 | 0,227 | 0,118 | 0,216     |
| CR7         | 0,080 | 0,066 | 0,040 | 0,026 | 0,027 | 0,114 | 0,059 | 0,059     |
| ÖSSZEG      | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000     |

Ahogy az a 7. táblázatban is látható, a szakemberek az igénylistából a „idő-alapú” valamint a „termelésütemezési eljárásba való integrációjának lehetősége”-t választotta a legfontosabbnak, míg a legkevésbé fontosak a hibák egymásra épülésének vizsgálata, számítási gyorsaság szerepelt.

A QFD módszertan eredménye a két elemzés metszetéből épül fel. Az igényeket, illetve a műszaki jellemzőket egymással párhuzamba állítva egy olyan mátrix elkészítése volt a célom a „Minőség házában”, amely megfelelően reprezentálja a műszaki paraméterek és az igények között fennálló korrelációs kapcsolatot. Az értékelés során a 0-1-3-9-es értékeket alkalmazta a kutató annak megfelelően, ahogyan azt a szakirodalom alapján javasolnak (0 – nincs kapcsolat; 1 – enyhe kapcsolat; 3 – közepes kapcsolat; 9 – erős kapcsolat):

7. táblázat: QFD-részlet

| <b>MÓDSZER</b><br><b>IGÉNY</b> | RI 1 | RI 2 | RI 3        | RI 4        | RI 5 | RI 6 | RI 7 | FONTOSSÁG |
|--------------------------------|------|------|-------------|-------------|------|------|------|-----------|
| CR1                            | 9    | 9    | 9           | 9           | 0    | 9    | 0    | 0,254     |
| CR2                            | 9    | 9    | 9           | 9           | 3    | 3    | 3    | 0,183     |
| CR3                            | 3    | 3    | 3           | 1           | 3    | 3    | 1    | 0,043     |
| CR4                            | 1    | 3    | 9           | 9           | 9    | 3    | 9    | 0,074     |
| CR5                            | 1    | 3    | 9           | 9           | 3    | 3    | 9    | 0,171     |
| CR6                            | 3    | 9    | 9           | 3           | 9    | 3    | 3    | 0,216     |
| CR7                            | 3    | 1    | 3           | 3           | 3    | 1    | 3    | 0,059     |
| <b>SÚLY</b>                    | 5,13 | 6,80 | <u>8,39</u> | <u>7,00</u> | 3,98 | 4,41 | 3,62 |           |

A 7. táblázat magyarázataként szolgáló példa: a meghibásodások közötti átlagos működési idő – mint ahogyan a neve is – megmondja, hogy átlagosan mennyi ideig tud a vállalat gyártani, mielőtt a gép valamilyen hibából fakadóan megállna, ezzel csökkentve az effektív kapacitását. Ez az indikátor egy időben megadott eredményt szolgáltat, amely teljes mértékben megfelel az időbeliségnek, mint

vevői elvárásnak. Ennek értelmében pedig a két indikátor között szoros kapcsolat van, amelyet a módszerben 9-es értékkel jelölünk. Ennek ellenpéldája a „számítási idő,” valamint az „átlagos javítási idő” mutatója. Mivel a modellem minden plusz paramétere hatással lesz a számítási kapacitásra, az elérhető időre, ezért elmondható, hogy van a két érték között kapcsolat. Ennek ellenére, a többi technikai paraméterhez viszonyítva ennek az időnövekedésnek a mértéke csekélyebb, mint más paraméteré, mivel egy átlagszámítás eredményeként konstans inputot szolgáltatunk, szemben egy bonyolultabb számítással. Ezzel szemben áll bármilyen elméleti- vagy tapasztalati szórással számított input, amely a szimuláció során kerül kiszámításra, ezért azoknak nagyobb hatása lesz az időre.

A „minőség háza”-módszertan további szintjeinek elkészítése nem tartozott a kutatás fókuszába, ugyanis ezen információk elegendőnek bizonyultak a módszertani fejlesztéshez.

## 5. A TERMELÉSÜTEMEZÉSHEZ HASZNÁLT MODELL BEMUTATÁS

A szakirodalomban is ismertetett determinisztikus CPM és a PERT-elemzés hátrányaira építve egy olyan sztochasztikus módszertan volt a kutatásom közép-pontjában, amelynek használatával a 4. fejezetben ismertetett igényeknek képes megfelelni.

Ahogy azt a [49] cikkben is olvasható, olyan megoldást dolgoztam ki szerző-társaimmal, amely a két meghibásodás között eltelt átlagos időt nem egy konstans értéknek tekinti, hanem a gép használatával arányosan történjen a meghibásodás számítása. Ennek azért van szerepe egy projektrendszerben gyártó vállalatnak az életében, mert egyedi termék gyártása során nem feltétlenül merül fel ugyanannak a gépnek a használata, valamint terhelésének mértéke.

Ezt az információt felhasználva az indikátor nem egy konstans értéket vett fel, hanem a szimulációban oly módon lett alkalmazva, hogy bizonyos időközönként, „ciklusonként” fordul elő a hiba, amely a szimuláció futtatásakor egy-egy iterációnak felel meg. A hiba értéke megnövekedésre kerül az átlagos állásidő értékével, amely a számítások alapján lehet egy konstans érték vagy egy elméleti / tapasztalati eloszlás eredménye is.

A szimuláció alapjául szolgáló megbízhatósági paraméterrel egybefüggő paraméterlista az alábbi információkat tartalmazza:

- A gépben beálló hiba megnevezése: annak leírására szolgál, hogy milyen hiba történik a gyártás során.
- Az a tevékenység, amely a hiba bekövetkezésekor annak idejére hatással lesz.
- A hiba előfordulása „ciklusban” megadva.
- A hiba előfordulásakor várható állásidő.

A bemeneti adatként megadott egyes hibákat szimulálható a hibák egymásra gyakorolt hatása is, ugyanakkora ciklussal rendelkező problémák ugyanakkor

fognak bekövetkezni a termelésben a szimuláció szerint olyan eset is felmerülhet, hogy egy bizonyos hiba 3. előfordulásakor következik be egy másik hiba (pl. egy hiba minden 10. esetben fordul elő, egy másik pedig minden 30.-nál, amivel biztosítható ez a fajta korrelációs kapcsolat is).

A szimulációt az alábbi pszeudokód részlet reprezentálja, amit a 8. táblázatban láthatunk:

8. táblázat: Projektszimuláció pszeudokódja

| PROJECT SIMULATION                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SET <i>i</i> to 1,<br>SET <i>setShift</i><br>SET <i>setMinutes</i><br>SET <i>totalProcessTime</i> to 0,<br>SET <i>cumulatedTPT</i> to 0,<br>SET <i>nrDays</i> to 0,<br>SET <i>nrShifts</i> to 0,<br>SET <i>activityDuration</i> , //array<br>SET <i>problemList</i> // block which contains: <i>problemCount</i> , <i>activityAffected</i> , <i>MTBFCycle</i> , <i>meanDownTime</i><br><br>FOR <i>i</i> to 1000<br>RANDOMIZE <i>activityDuration</i><br><br>FOR each problem <i>n</i><br>IF <i>i mod problemList[MTBFCycle] == 0</i> THEN<br><i>activityDuration[n] = activityDuration[n] + problemList[meanDownTime]</i><br>ELSE <i>activityDuration[n] = activityDuration[n]</i><br>END FOR<br><br>SOLVE <i>totalProcessTime</i> → <i>min!</i><br>ASK <i>sensitivityReport</i><br><br><i>cumulatedTPT = cumulatedTPT + totalProcessTime</i> ,<br><i>nrDays = cumulatedTPT / (setShift * setMinutes)</i><br><i>nrShifts = cumulatedTPT / setMinutes</i><br><br>COPY <i>i</i> , <i>activityDuration</i> , <i>totalProcessTime</i> , <i>cumulatedTPT</i> , <i>sensitivityReport</i> , <i>nrDays</i> ,<br><i>nrShifts</i><br><br>INCREMENT <i>i</i><br>END FOR |

A szimulációban a *modulus* függvényt alkalmazva, a szimuláció számlálójára és a hibalista gyakoriságára figyelemmel lesz. A szimuláció tudni fogja, hogy mikor következik be egy hiba a termelésben. Minden iterációnál le fog futni ez az ellenőrzés, és maradék nélküli osztás esetén a plusz időt hozzáadva szimulálható egy tevékenységben bekövetkező ciklusidő-növekedés.

A modellben hálózati modell lefuttatása is történik, amely a teljes átfutási időt, a kritikus utat, illetve kiegészítő információként a tartalékidők is elemezhetővé válnak az érzékenység-jelentésnek, illetve a további riportoknak köszönhetően. További funkcióként a szimulációba egy aggregált érték is számításra kerül, ami megmutatja, hogy adott termék legyártásához összesen mennyi időre van szükség, amely igény szerint tovább bontható műszakra, napra, hétre a teljeskörű kapacitástervezés érdekében.

Mivel a fejlesztett modell időalapú (ahogyan azt a vevői igények is kimondják), ezért költségek ebben a lépésben nem kerülnek bevezetésre, ami később, a szimuláció által létrehozott adatbázisra egyszerűen további felhasználható.

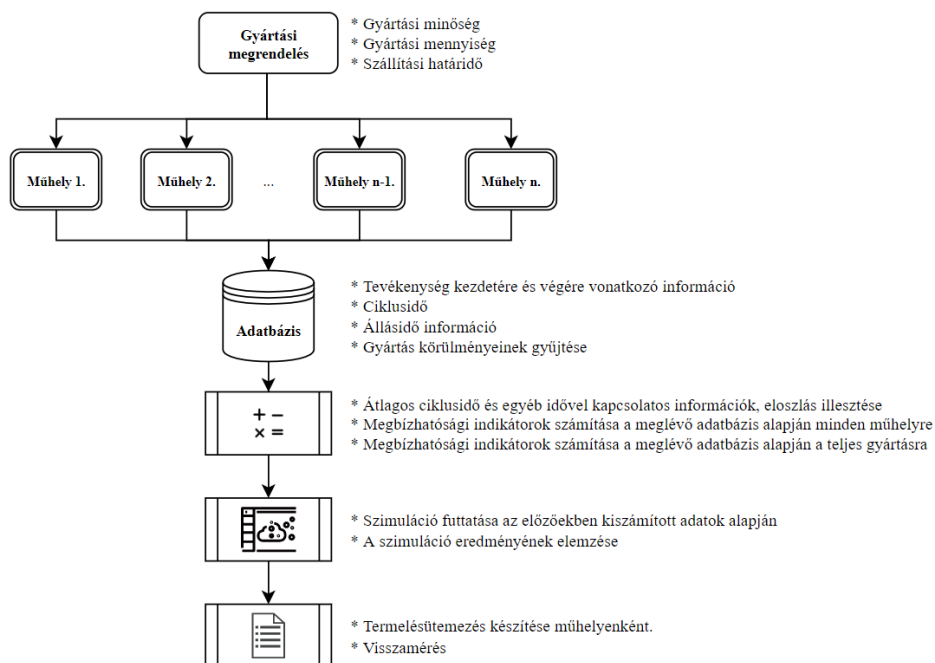
A fenti módszer VBA (Visual Basic Application) nyelven került megírásra, amely a függelékben megtalálható.

### 5.1. Az ütemezési keretrendszer

Az ütemezés az előzőekben bemutatott szimuláción felül készül el, hiszen ez csak egy szeletét adja annak az információnak, amit szolgáltathat ez a módszer.

A keretrendszer feltevése az, hogy a projektgyártásból fakadóan a vevő pontosan meg tudja mondani mind a minőségre, mind a mennyiségre továbbá a szállítási határidőre vonatkozó igényét, mint ahogyan az látható a 12. ábrán. Utóbbi követelmény mindenképp megbeszélés tárgyát kell képeznie, ugyanis a vállalatnak már vannak lekötött kapacitásai. Ezen felül – amelyet a fejlesztett keretrendszer nem tartalmaz – a termék ára is megbeszélés tárgyát kell, hogy képezze, de ezekről előzetes kalkulációt természetesen készíthet a vállalat.





12. ábra: Keretrendszer projektgyártás ütemezésére

A gyártás tervezése során alakul ki a tevékenységlista, a tevékenységek között fennálló kapcsolat, valamint egy idő kalkuláció, mellyel a tervezés során számolhatnak a vállalatnál. Mivel a gyártási struktúra több termékes igényeket jelent, jelen esetben több műhelyre is szét lehet bontani a termelést, ezáltal a termék legyártásának a teljes átfutási idejét.

Továbbá, nem törvényszerű, de a különböző műhelyek különböző gyártóberendezésekkel, eszközökkel és szerszámokkal gyártanak, így a folyamatleírással egyező, de eltérő karakterisztikájú gyártásról is lehet szó, legyen akár szó akár az átfutási időről, akár a felhasznált eszközök megbízhatóságáról. Ezeket pontosan fel kell tudni mérni, hogy a tervezés minél pontosabb legyen. Ne tegyen olyan vállalásokat a gyártó vállalat, amit magas megbízhatósági szint mellett nem tud elérni.

Ipar 4.0-kompatibilis eszközök segítségével, múltbeli adatokra támaszkodva, matematikai módszerekkel dolgozva az egyes tevékenységek ciklusidő, tevékenységidő elég pontosan megállapíthatóak, amelynek eredményeként elméleti

vagy tapasztalati eloszlást lehet illeszteni a múltbeli vagy előrejelzett adatokra. Ezen felül a gépekkel való munka során olyan tapasztalatokat lehet szerezni az egységek megbízhatóságáról, amelyet implementálni lehet a szimulációba.

Ha minden információ rendelkezésre áll, a korábbi fejezetben bemutatott szimulációs technikát alkalmazva lehetőség nyílik minden egyes műhelyre elkészíteni a személyre szabott szimulációt: a megbízhatóságot ciklusonként megadva úgy, ahogy az elvárás is volt a fejlesztett modellel szemben.

A futtatott szimuláció optimalizációval együtt fut le, így ennek előnyét is ki tudom használni. Érzékenységvizsgálat, valamint egyéb riportok állnak rendelkezésre a folyamat minél pontosabb megértése érdekében, azaz a döntéstámogatási folyamatot a lehető legmagasabb szintre emelve.

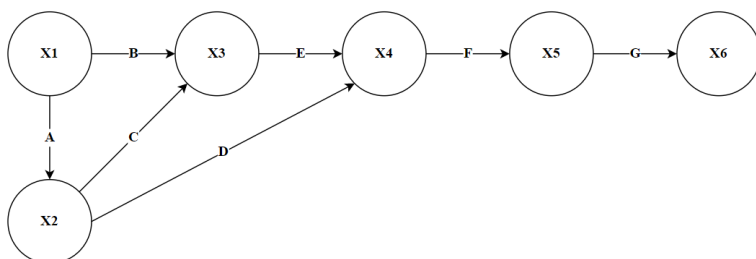
Az elemzéseket természetesen mind műhely, mind teljes gyártás szinten meg kell mutatni, valamint ezt egy gyártásütemezési eljárásba integrálni – mint ahogy ez a kutatás célja. Az integráció eredményeként a szimuláció által adott kapacitásértékek fognak inputként szolgálni, és legjobb / legrosszabb scenárió is elemzésre került. A gyártásütemezés és műhelyekhez való hozzárendelés mellett két forgatókönyv készült: maximum kapacitást kihasználva minél hamarabb kész lenni (nincs készletezési költség), valamint az összköltséget minimális szinten tartani (minél később, de határidőre elkészülni – ilyenkor számolunk készletezési költséggel).

## 6. A MÓDSZER GYAKORLATI ALKALMAZÁSÁNAK BEMUTATÁSA

### 6.1. Ütemezés egy gép esetén

A termelési folyamat egy projektgyártást mutat be, mely a megrendelő egyedi elképzelésének megfelelő terméket állít elő, magasabb darabszámban, a projekt szerint 100 db terméket kell előállítani. A termék gyártásának sajátja, hogy olyan emberek végzik a tevékenységet, akik az egész projekten végigkísérik a terméket. A folyamatban vannak olyan tevékenységek, amelyek párhuzamosíthatók, viszont a tevékenységek többsége lineárisan megy.

A termelési folyamat leírására AOA (Activity On Arcs) hálózat került használatra, ahol a csomópontok jelentik a tevékenység eseményeit, míg a nyilak felelősek a tevékenységek bemutatásáért. A folyamat a 13. ábrán látható:



13. ábra: Gyártási folyamat leírása AOA hálózatban

A folyamatlépések idejének számításához valós idejű gyártási ciklust vettem alapul. A ciklusidők alsó-felső határai, valamint az alkalmazott béta-eloszlás  $\alpha, \beta$  paraméterei a 9. táblázatban található meg.

A béta-eloszlás mellett azért döntöttem, hiszen [35] cikke alapján látható, hogy gyártási folyamatok béta, illetve normál eloszlással megfelelően jellemezhetők. A béta-eloszlást az egyik jellemzője miatt használtam, hiszen ezek az eloszlástí-

pusok zártnak tekinthetőek, vagyis rendelkeznek alsó és felső határral. A két paraméter ( $\alpha$  és  $\beta$ ) értéke pedig ugyanakkora volt, ezzel biztosítva azt, hogy szimmetrikus legyen az eloszlás.

9. táblázat: Ütemezés inputjai egy gép esetén

| Tevékenység megnevezése | Tevékenység (csomópontok) | Minimum érték (perc) | Maximum érték (perc) | Béta eloszlás ( $\alpha, \beta$ ) |
|-------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|
| A                       | X1-X2                     | 7,5                  | 8,5                  | $\beta(2; 2)$                     |
| B                       | X1-X3                     | 6,0                  | 6,5                  | $\beta(2; 2)$                     |
| C                       | X2-X3                     | 3,0                  | 3,3                  | $\beta(2; 2)$                     |
| D                       | X2-X4                     | 5,0                  | 0,7                  | $\beta(2; 2)$                     |
| E                       | X3-X4                     | 3,0                  | 4,0                  | $\beta(2; 2)$                     |
| F                       | X4-X5                     | 8,0                  | 9,6                  | $\beta(2; 2)$                     |
| G                       | X5-X6                     | 3,0                  | 3,3                  | $\beta(2; 2)$                     |

Tapasztalati alapon az egyes tevékenységekhez is meghatározásra kerültek a megbízhatósági problémák, amelyek a tevékenység átfutási időkre vannak hatással. A gyártási folyamat során az alábbi kockázatokat azonosítottam, amelyet a következő, 10. táblázat részletez:

10. táblázat: Megbízhatósági problémák

| Sorszám | Érintett tevékenység | Meghibásodási ciklus (futás) | Állásidő (perc) |
|---------|----------------------|------------------------------|-----------------|
| 1       | A                    | 5                            | 50              |
| 2       | B                    | 8                            | 20              |
| 3       | C                    | 12                           | 30              |
| 4       | D                    | 12                           | 40              |
| 5       | E                    | 25                           | 30              |
| 6       | F                    | 10                           | 50              |

A 10. táblázatban látható, hogy minden egyes tevékenységhez meg lett határozva valamilyen megbízhatósági probléma, valamint annak előfordulási valószínűsége, de nem a megszokott, MTBF alapján: ennek oka az az, hogy projektgyártás esetén a felhasznált erőforrások, vagyis jelen esetben gépek használata nem állandó – így az MTBF indikátor ilyen esetekben fals eredményt adhat, hiszen előfordulhat, hogy a gépek a vállalt projektek karakterisztikája miatt sokáig nem kerülnek használatra.

Továbbá látható, hogy van két ugyanolyan gyakorisággal rendelkező probléma is, amely tekinthető ok-okozati összefüggés leírásának is, ugyanis a probléma előfordulása mindig ugyanazokra az iterációkra vonatkozik. A jelenlegi példában determinisztikus értékek alkalmazására került sor, viszont pontosabb adatok meglétekor javasolható az állásidők sztochasztikus felírása.

#### 6.1.1. Szimuláció futtatása

Az alkalmazott módszer során a megrendelt mennyiséggel egyenlő szimulációs futás lett meghatározva. A szimuláció minden egyes eleme egy termék legyártásának átfutási idejét veszi figyelembe, amely egyidőben egy optimalizációs feladat megoldása is:

Az optimalizáció célfüggvénye:

$$x_n - x_1 \rightarrow MIN! \quad (11)$$

Korlátozó tényezők:

$$-x_i + x_j \geq t_{ij} \quad (12)$$

ahol:

$x_{i,j,n}$  = csomópontok jelölései,

$t_{ij}$  =  $i$ . és  $j$ . csomópont közötti tevékenységidő (megegyezés szerint, pl. óra).

Az elkészült modell az alábbi, 11. táblázat mutat be, amelyet a fentebbi, 9-10. egyenletek segítségével készítettem el:

11. táblázat: Optimalizációs modell

| HÁLÓZAT             | x1 | x2  | x3   | x4   | x5   | x6   | Total | Operátor | Tij |
|---------------------|----|-----|------|------|------|------|-------|----------|-----|
| x1-x2 (a)           | -1 | 1   |      |      |      |      | 8,1   | >=       | 8,1 |
| x1-x3 (b)           | -1 |     | 1    |      |      |      | 11,2  | >=       | 6,2 |
| x2-x3 (c)           |    | -1  | 1    |      |      |      | 3,1   | >=       | 3,1 |
| x2-x4 (d)           |    | -1  |      | 1    |      |      | 6,8   | >=       | 5,2 |
| x3-x4 (e)           |    |     | -1   | 1    |      |      | 3,7   | >=       | 3,7 |
| x4-x5 (f)           |    |     |      | -1   | 1    |      | 8,4   | >=       | 8,4 |
| x5-x6 (g)           |    |     |      |      | -1   | 1    | 3,1   | >=       | 3,1 |
| Teljes átfutási idő | -1 |     |      |      |      | 1    | 26,4  | MIN!     |     |
| Megoldás            | 0  | 8,1 | 11,2 | 14,9 | 23,3 | 26,4 |       |          |     |

A modell technológiai mátrixában található a forrás és nyelő csomópontok ábrázolása (negatív előjellel a forrás, pozitív előjellel pedig a nyelő csomópontok). A  $T_{ij}$  kapacitásvektor pedig a tevékenységidőket jellemzik. A total oszlopban a 10. egyenlet alapján áll elő, melyet az MS Excel *sumproduct()* függvényével készítettem el. A Solver használatával a modellt optimalizáltam, amelynek előnye,

hogy érzékenységvizsgálat és egyéb riport is lekérhető, amely a projekt tartalékidejeit meghatározhatjuk, így támogatva a döntéshozatalt.

A módosított sztochasztikus kritikus út módszer egyéb bemenő adatokat is kíván, mint ahogyan azt az 5.1. fejezetben is leírásra került: megbízhatósági problémák, érintett tevékenység, ciklusban megadott MTBF indikátor valamint átlagos állásidő adatok úgy kerültek implementálásra a szimulációs modellben, ahogy azt a 12. táblázat is bemutatja, azaz a sorszám oszlop a szimulációs program egyértelműbb azonosításához kellett:

12. táblázat: Bemenő adatok a szimulációhoz

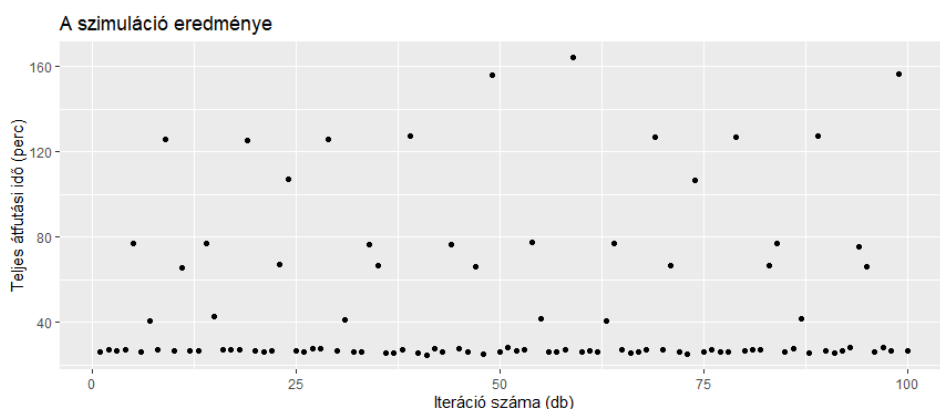
| Probléma | Érintett tevékenység | Sorszám (modellben) | MTBF ciklus | Állásidő |
|----------|----------------------|---------------------|-------------|----------|
| 1        | a                    | 2                   | 5           | 50       |
| 2        | b                    | 3                   | 8           | 20       |
| 3        | c                    | 4                   | 12          | 30       |
| 4        | d                    | 5                   | 12          | 40       |
| 5        | e                    | 6                   | 25          | 30       |
| 6        | f                    | 7                   | 10          | 50       |

A szimulációban minden egyes iteráció ellenőrzésre kerül, ha az iteráció száma megegyezik valamelyik értékkel, akkor a megbízhatósági probléma felmerül, így a hozzá tartozó átlagos állásidő hozzáadásra kerül a modell adott tevékenységéhez, amely a frissített tevékenységidővel együtt kerül optimalizálásra. Az optimalizálás során az összes releváns adatból egy adatbázis épül fel, amely a későbbiekben elemzésre kerül. A következő, 13. táblázat megmutatja az adatbázis egy részletét:

13. táblázat: Adatbázis egy részlete (tevékenységidők, TPT, érzékenysgvizsgálat)

| #  | x1-x2 | x1-x3 | x2-x3 | x2-x4 | x3-x4 | x4-x5 | x5-x6 | TPT | CF x1-x2 | CF x1-x3 | CF x2-x3 | CF x2-x4 | CF x3-x4 | CF x4-x5 | CF x5-x6 | ACC TPT | Days | Shifts | CP | Normal |   |   |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|------|--------|----|--------|---|---|
| 1  | 8.1   | 6     | 3.2   | 5.3   | 3     | 8.9   | 5.9   | 3.1 | 26.3     | 1        | 0        | 1        | 0        | 1        | 1        | 0       | 1    | 26     | 1  | 1      | A | 1 |
| 2  | 8.1   | 6     | 3     | 6.6   | 3.7   | 9     | 6     | 3.2 | 27       | 1        | 0        | 1        | 0        | 1        | 1        | 0       | 1    | 53     | 1  | 1      | A | 1 |
| 3  | 8.5   | 6.5   | 3     | 5.4   | 3.3   | 9     | 5.3   | 3.1 | 26.9     | 1        | 0        | 1        | 0        | 1        | 1        | 0       | 1    | 80     | 1  | 1      | A | 1 |
| 4  | 7.9   | 6     | 3.2   | 6     | 3.9   | 9.3   | 5.1   | 3   | 27.3     | 1        | 0        | 1        | 0        | 1        | 1        | 0       | 1    | 107    | 1  | 1      | A | 1 |
| 5  | 58.1  | 6.4   | 3     | 6.2   | 4     | 8.5   | 5.5   | 3.3 | 76.9     | 1        | 0        | 1        | 0        | 1        | 1        | 0       | 1    | 184    | 1  | 1      | A | 0 |
| 6  | 7.5   | 6.5   | 3.2   | 6.3   | 3.8   | 8.3   | 5     | 3.3 | 26.1     | 1        | 0        | 1        | 0        | 1        | 1        | 0       | 1    | 210    | 1  | 1      | A | 1 |
| 7  | 7.6   | 6     | 3.2   | 5.8   | 4     | 9.1   | 5.2   | 3.1 | 27       | 1        | 0        | 1        | 0        | 1        | 1        | 0       | 1    | 237    | 1  | 1      | A | 1 |
| 8  | 8.1   | 26    | 3.1   | 5.6   | 3.1   | 8.5   | 5.8   | 3.3 | 40.9     | 0        | 1        | 0        | 0        | 1        | 1        | 0       | 1    | 278    | 1  | 1      | C | 0 |
| 9  | 7.8   | 6.3   | 3.2   | 6.1   | 3.8   | 9.6   | 5.2   | 3.1 | 27.5     | 1        | 0        | 1        | 0        | 1        | 1        | 0       | 1    | 306    | 1  | 1      | A | 1 |
| 10 | 58.3  | 6.5   | 3     | 6.2   | 3.8   | 58    | 5.1   | 3   | 126.1    | 1        | 0        | 1        | 0        | 1        | 1        | 0       | 1    | 432    | 1  | 1      | A | 0 |
| 11 | 8     | 6.3   | 3.2   | 5     | 3     | 9.6   | 5.2   | 3.1 | 26.9     | 1        | 0        | 1        | 0        | 1        | 1        | 0       | 1    | 459    | 1  | 1      | A | 1 |
| 12 | 7.6   | 6.4   | 33.2  | 45.4  | 3.4   | 9.2   | 5.7   | 3.3 | 65.5     | 1        | 0        | 0        | 1        | 0        | 1        | 0       | 1    | 524    | 1  | 2      | B | 0 |
| 13 | 8     | 6.1   | 3.1   | 5.9   | 4     | 8.4   | 5.8   | 3   | 26.5     | 1        | 0        | 1        | 0        | 1        | 1        | 0       | 1    | 550    | 1  | 2      | A | 1 |
| 14 | 8.4   | 6.3   | 3.1   | 6.7   | 3.4   | 8.3   | 5.3   | 3.3 | 26.7     | 1        | 0        | 0        | 1        | 0        | 1        | 0       | 1    | 577    | 1  | 2      | B | 1 |
| 15 | 57.9  | 6.3   | 3     | 5.2   | 3.8   | 9.2   | 5.2   | 3.1 | 77       | 1        | 0        | 1        | 0        | 1        | 1        | 0       | 1    | 654    | 1  | 2      | A | 0 |
| 16 | 8.4   | 26.2  | 3     | 6.7   | 3.8   | 9.6   | 5.1   | 3   | 42.6     | 0        | 1        | 0        | 0        | 1        | 1        | 0       | 1    | 697    | 1  | 2      | C | 0 |

Az adatbázis első számítása a teljes átfutási idők vizsgálata egyfajta ellenőrzésként: meg kell állapítani, hogy a szimuláció megfelelően futott le, pontosan azt akarta modellezni az elemző, amit szeretett volna, így az eredményt további elemzés alá lehet vonni, mint amit lehet látni a 14. ábrán is:

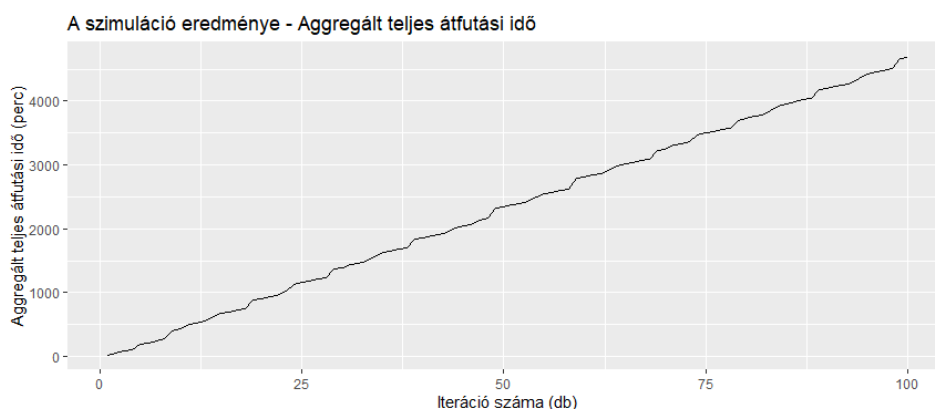


Az esettanulmányt tekintve látható, hogy a projektet 20-30 perc között végzik el a szakemberek, azonban a különböző problémáknak köszönhetően ez az érték akár a 160 percet is elérheti. Ez annak is köszönhető, hogy az egyes előfordulások közös többszörösére bukkanunk, amikor közel minden probléma fennáll. Ilyen a 60. iteráció, amikor az A-C-D-F tevékenységekben bekövetkezik a potenciális hiba, így ennek következtében az adott termék gyártásának befejezése is későbbre tevődik.



### 6.1.2. Szimulációs eredmények értékelése

A szimulációs futtatás első és egyik legfontosabb kérdése az volt, hogy jelenlegi kapacitások és hibák mellett mennyi idő alatt tudja a vállalat kielégíteni a vevő mennyiségi követelményét. Ezzel egyidőben, mivel az egyes termékek legyártásához szükséges időinek változása ekkora gyártott mennyiség esetén nem mutat akkora kilengést, ezért egy regressziós egyenes lett illesztve az értékhalmazra, amelyet a 15. ábra mutat be:



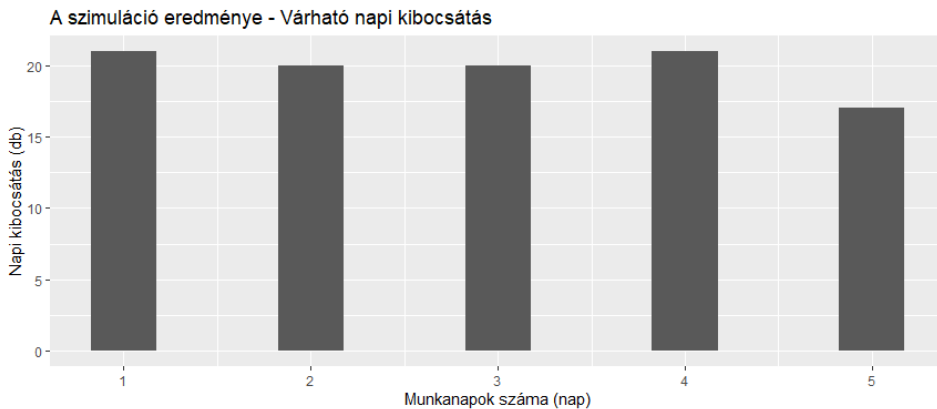
15. ábra: Aggregált teljes átfutási idők

Lineáris regressziószámítással megkaptam a kis szériás projekt átfutási idejének egyenesét:  $\hat{y} = 46,896x - 62,408$ , a modell magyarázó ereje ( $r^2 = 0,9996$ ) pedig nagyon magas, így hosszabb távon szinte lineárisnak tekinthető a folyamatunk. Ez természetesen hosszú távon értendő csak, ilyen tevékenységidőkkel tűnik lineárisnak, ez nem evidencia más termékek termelése esetén. További elemzést folytatva az is kiderült, hogy három különböző kritikus úttal rendelkezik a projektszimuláció, melyet a következő, 14. táblázat tartalmaz:

14. táblázat: Kritikus utak eloszlása

| Kritikus út csoport | Kritikus út | Arány        |
|---------------------|-------------|--------------|
| A                   | A-C-E-F-G   | 73% (73/100) |
| B                   | A-D-F-G     | 21% (21/100) |
| C                   | B-E-F-G     | 6% (6/100)   |

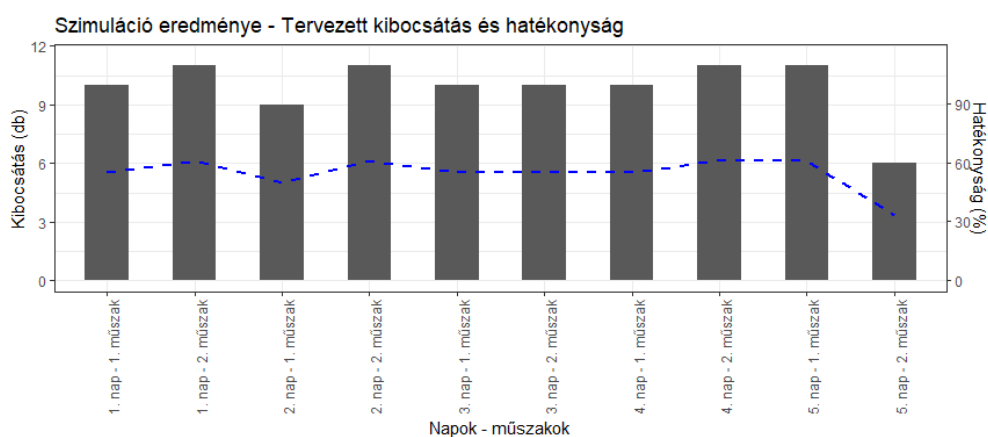
Ennek az az elsődleges tanulsága, hogy hibával terhelt folyamatszimuláció eredményeként más kritikus utak is megtalálhatók, amely a további kockázatmenedzsment törekvéseinket tudja kisiklatni. A vevőnek tett vállalást eltekintve pedig látható, hogy a projektet 5 munkanap alatt el tudja végezni a vállalat, feltéve, ha 2 db 480 percnyi műszak áll rendelkezésre naponta. Az utolsó nap kibocsátása pedig a többi napéhoz viszonyítva azért ilyen alacsony, mert a 100. termék legyártását követően még nem ér véget a napi 2. műszak, amit gyártásra ki lehetett volna használni, lásd 16. ábra:



16. ábra: Gyártási folyamat elemzése kibocsátás tekintetében

A lean elveknek megfelelően viszont nem gyárt a vállalat több terméket, mint amennyi a vevő igény volt, így ennek megfelelően más termékre való átállást kell eszközölni a műhelyben.

Az előzőekben bemutatott eredmény nagyobb „felbontás” alatt, azaz műszakonként értelmezve pedig a 17. ábrán látható. A műszakok úgy lettek meghatározva, hogy 2 darab, egyenként 480 perces műszak áll rendelkezésre a munkanapok során. Az egyes műszakok (és napok) kibocsátása pedig úgy került kiszámításra, hogy a teljes átfutási idők kumulálása során 480 percenként osztópontot vezettem be, és ezen osztópontok közötti teljesen legyártott termék számított egy terméknek (17. ábra):



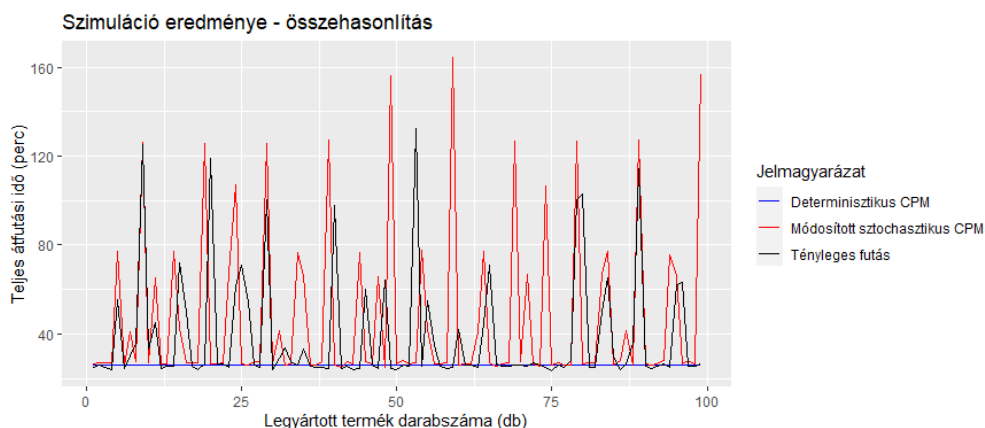
17. ábra: Gyártási folyamat leírása AOA hálózatban

Az elemzés során a gyártáshatékonyság is kiszámításra került a szimulációhoz viszonyítva. Egy műszakhoz tartozó elméleti kapacitás került kiszámításra egy determinisztikus kritikus út módszer segítségével, és a szimulált kibocsátást osztottam el ezzel az értékkel. Ennek folytán láthatóvá vált, hogy mekkora hatékonyságbeli veszteséget kell egy műhelynek elviselni, ha megbízhatósági problémái adódnak a termelésben.

### 6.1.2.1. Eredmények összehasonlítása

Ahhoz, hogy megvizsgáljam a fejlesztett módszer hatékonyságát, két további információra volt szükségem: először a determinisztikus kritikus út módszer segítségével ki kellett számolnom, hogy mennyi a projekt teljes átfutási ideje. Ehhez a tevékenység alapadatokátlagával számoltam, hiszen abban a modellben is a szimmetrikus béta ( $\beta(2; 2)$ ) eloszlás használata volt fókuszban. Ennek eredményeként megállapítást nyert, hogy a teljes átfutási idő a CPM módszer segítségével 26 perc volt. Ez a módszer nem dolgozik feltételes hibákkal, vagy hiba bekövetkezésével. Így a 100 termék legyártása ennek a módszernek megfelelően 2600 perc alatt teljesülne, amely átszámítva 480 perces műszakokra 5,41 ~ 6 műszak lenne.

Valós lefutást tekintve 100 darab termék kerül legyártásra egyetlen műhelyben. A rendszerben megfigyelhetők kiugró értékek, ahogy azt a megbízhatósággal terhelt modellben is látható volt, viszont ennek mértéke és értéke némely esetben eltért a modellben prognosztizálttól, amelyet a következő, 18. ábra mutat be:



18. ábra: Módszerek összevetése eredeti adatok mellett.

Ahogy lehet látni az ábrán, a módosított sztochasztikus kritikus út módszer jobban leköveti a tényleges gyártást, ennek köszönhetően pedig a tervezett lefutások eredménye közelebb is van a tényleges értékhez képest. A vizualitás mellett pedig átlagos abszolút eltérés, valamint átlagos abszolút százalékos hiba mutatókkal is számoltam:

$$MAD_{CPM} = \sum |TPT_{Real} - TPT_{CPM}| * \frac{1}{n} = 13,67 \text{ perc} \quad (13)$$

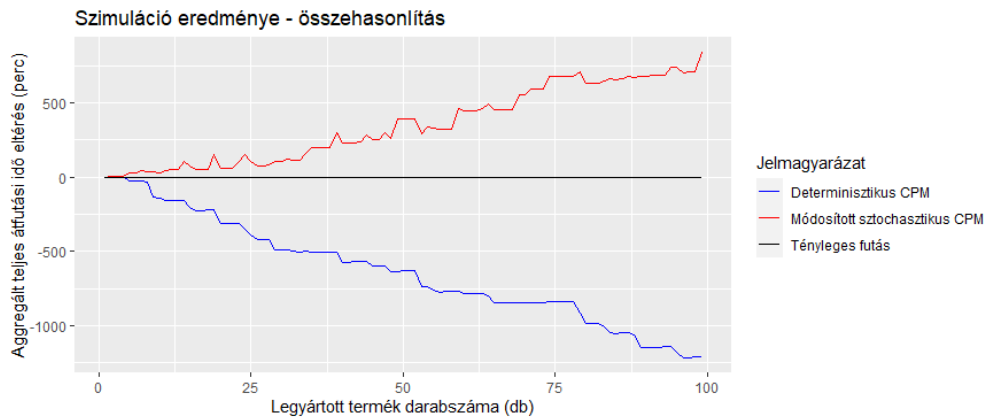
$$MAD_{SCPM} \sum |TPT_{Real} - TPT_{MSCPM}| * \frac{1}{n} = 22,67 \text{ perc} \quad (14)$$

Az átlagos abszolút eltérés esetében láthatóvá válik, hogy a klasszikus projekt kritikus út módszer segítségével átlagosan kisebb hibával tudunk előrejelzést készíteni a következő projektfutást illetően, viszont itt ki kell emelni, hogy ez annak köszönhető, hogy a projektben sűrű az átlagos, vagyis hibamentes gyártás. Kis szériás projektgyártás esetén viszont meg kell vizsgálni azt, hogy 100 lefutásnál mennyire tér el a két módszer aggregált átfutási ideje a tényleges értéktől. Ehhez pedig a minta kvartilis pontjainál vettem mintát. Látható, hogy a Ennek eredménye az alább, a 15. táblázatban található:

15. táblázat: Eltérések a tényadatoktól

| #   | CPM    | Módosított Sztochasztikus CPM | Tényleges | CPM eltérés         | SCPM eltérés     |
|-----|--------|-------------------------------|-----------|---------------------|------------------|
| 25  | 660    | 1158                          | 1052,2    | -392,2<br>(-37,3%)  | 105,8<br>(10,1%) |
| 50  | 1320   | 2343,3                        | 1951,2    | -631,2<br>(-32,3%)  | 392,1<br>(20,1%) |
| 75  | 1980   | 3497,3                        | 2817,5    | -837,5<br>(-29,7%)  | 679,8<br>(24,1%) |
| 100 | 2613,6 | 4664,8                        | 3826      | -1212,4<br>(-31,7%) | 838,8<br>(21,9%) |

Ezen kívül egy összehasonlítást is készítettem annak érdekében, hogy megnézzem a 100 termék termék legyártásának aggregált idejét úgy, hogy a tényleges gyártási idő szolgált referenciapontként, ahogyan azt a 19. ábra mutatja:



19. ábra: Gyártási folyamat elemzése kibocsátás tekintetében

Az ábrán látható, hogy mind a két tervezett esetben tapasztalható eltérés a tényleges gyártás idejéhez viszonyítva. A klasszikus kritikus út módszer segítségével ez az érték 1212,4 percet jelent a ténylegestől negatív irányban eltérve, ami a tényleges eredménynek 31,7%-a. Ez a fajta negatív eltérés egyértelműen ronthatja a vállalat kilátásait, hiszen túlságosan optimista forgatókönyvet mutat a projektről, és az ennek megfelelő tárgyalások során a projekt elvégzésének esélye minimális lesz.

A módosított sztochasztikus módszer eltérése már pozitív irányú, értéke pedig 21,9%, így ha a projektvezető ilyen kondíciókkal vállalja el a projektet, úgy a gyártáshoz szükséges időt felülbecsüli, és tartalékidőt képez a projektben, továbbá lehetőségessé válik más projektek előkészülete.

Feltéve, hogy mind a két eset egyaránt rossz a vállalat számára, úgy a javulás mértéke abszolút értékben 9,8% a módosított sztochasztikus kritikus út módszer esetében, így megállapítható, hogy a módosított sztochasztikus modell hatékonyság javulásának mértéke 30,09% a determinisztikus módszerhez képest.

## 6.2. Ütemezés több gép esetén

A második esettanulmány folyamata hasonló tevékenységsort foglal magába annyi eltéréssel, hogy a projektgyártás kivitelezésére nem csupán egy, hanem négy műhely is rendelkezésre áll. A műhelyek különböző típusú és hatásfokú, valamint megbízhatóságú gépekkel dolgoznak, így a felmerülő potenciális hibák száma is eltérő. A folyamatábrát tekintve nincs különbség az egyműhelyes gyártástól [a folyamatábra a 6.1. fejezetben található, viszont a tevékenységidők és a tevékenységek változtak valamelyest, amelyet a következő, 16. táblázat foglal magában, ahol a zárójelben található értékek az egyes tevékenységidők minimumát és maximumát adja meg a béta eloszlás alkalmazásához, percben kifejezve [min; max]:

16. táblázat: Ütemezés inputjai több gép esetén

| <b>Tevékenység</b> | <b>Műhely 1.</b> | <b>Műhely 2.</b> | <b>Műhely 3.</b> | <b>Műhely 4.</b> |
|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| A                  | [12;17]          | [10;14]          | [10;12]          | [11;16]          |
| B                  | [27;32]          | [27;29]          | [25;28]          | [28;32]          |
| C                  | [17;26]          | [20;22]          | [20;22]          | [19;23]          |
| D*                 | 30               | 30               | 30               | 30               |
| E                  | [16;18]          | [15;16]          | [15;17]          | [16;17]          |
| F                  | [12;14]          | [12;17]          | [10;15]          | [14;16]          |
| G                  | [7;13]           | [8;16]           | [8;11]           | [9;14]           |

A tevékenységidők eloszlását tekintve – úgy, mint az előző esettanulmányban –  $\beta(\alpha, \beta)$  = béta (2,2) eloszlást követett. A zárójelben található értékek a minimum és maximum időt prezentálják, míg a D tevékenységnél található \* jelzés a

tevékenység determinisztikus mivoltát jelöli, mely technikai várakozásból adódik.

17. táblázat: Megbízhatósági problémák több gép esetén

| Tevékenység | Műhely 1.                   | Műhely 2.                   | Műhely 3.                   | Műhely 4.                   |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| A           | 30 perc minden 5. futásnál  | -                           | 15 perc minden 5. futásnál  | 20 perc minden 7. futásnál  |
| B           | 25 perc minden 8. futásnál  | 15 perc minden 10. futásnál | 10 perc minden 5. futásnál  | 10 perc minden 5. futásnál  |
| C           | 30 perc minden 10. futásnál | 15 perc minden 9. futásnál  | 15 perc minden 10. futásnál | 15 perc minden 8. futásnál  |
| D           | -                           | -                           | -                           | -                           |
| E           | 50 perc minden 20. futásnál | 32 perc minden 8. futásnál  | 40 perc minden 11. futásnál | 20 perc minden 25. futásnál |
| F           | -                           | -                           | -                           | -                           |
| G           | -                           | -                           | -                           | -                           |

A megbízhatósági problémák rendszerint ugyanazoknál a tevékenységeknél állnak fent, de a 17. táblázat a döntéshozó kedve szerint variálható. Egy tevékenységhez több hiba felvihető, ha a tevékenységhez többet is hozzá tudunk rendelni, viszont ez a számítási kapacitás rovására mehet. A 17. táblázatba felvitt adatok mennyisége és minősége a döntéselőkészítő vagy döntéshozó által meghatározott elvárásoknak kell, hogy megfeleljen.

#### 6.2.1. Szimulációk futtatása

Mint ahogyan az előző példában, úgy itt is 100 db azonos minőségű terméket kellett jelen esetben 4 műhelyben legyártani. Annak érdekében, hogy a minden eshetőségre felkészüljön a döntéshozó, minden műhelyre 100-as szimulációs futás lett meghatározva. Ez a teljes rendszert tekintve  $4 * 100 = 400$  szimulációs fu-



tást jelentett. A szimuláció egyes iterációiban optimalizálás volt, hogy meg tudható legyen a projektről több információ szülessen: úgymint legrövidebb átfutási idők, kritikus utak, tartalékidők.

A 18. táblázat pedig megmutatja a szimulációs futások főbb leíró mutatóit teljes átfutási idő kapcsán:

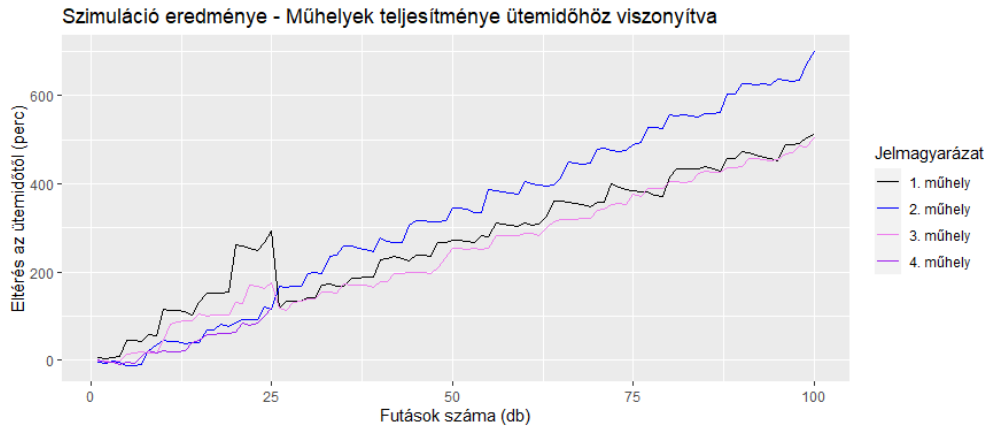
18. táblázat: Szimuláció leíró statisztikája

| Műhely                 | Minimum TPT (perc) | Maximum TPT (perc) | Átlag ( $\bar{x}$ ) perc | Szórás (s) perc | Konfidencia intervallum (perc) |
|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|-----------------|--------------------------------|
| <b>Műhely 1.</b>       | 70,00              | 190,00             | 89,82                    | 27,53           | 84,358 – 95,282                |
| <b>Műhely 2.</b>       | 68,00              | 122,00             | 81,91                    | 12,36           | 79,457 – 84,363                |
| <b>Műhely 3.</b>       | 69,00              | 128,00             | 83,80                    | 14,38           | 80,947 – 86,653                |
| <b>Műhely 4.</b>       | 71,00              | 105,00             | 81,85                    | 8,37            | 80,188 – 83,512                |
| <b>Teljes rendszer</b> | 68,00              | 190,00             | 84,35                    | 17,47           | 82,628 – 86,062                |

A táblázatból látható, hogy a „legstabilabb” működésre a negyedik műhely képes, hiszen ott a legkisebb mind a terjedelem, mind a szórás. Ez elsősorban annak köszönhető, hogy a fellépő problémák nagy része könnyebben, gyorsabban megoldható a többi műhely hasonló problémáihoz viszonyítva.

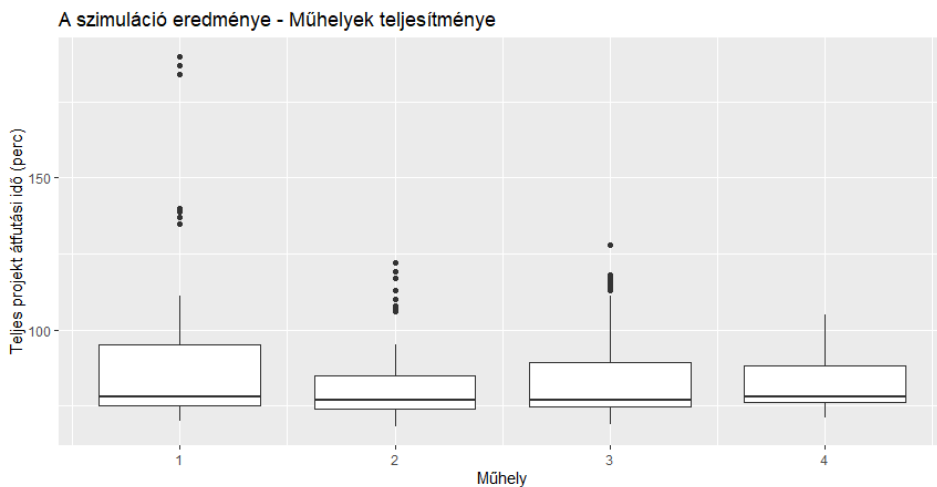
#### 6.2.2. Eredmények értékelése

A szimuláció eredménye az előző esettanulmányhoz hasonlóan került kiemelésre. Mivel négy, ugyanazt a tevékenységet végrehajtó műhely került górcső alá, így a vizuális megjelenítés is némiképp változott, amely a 20. ábrán látható:



20. ábra: Aggregált átfutási idők több műhely esetén

Az aggregált értékek mellett egyedileg is értékelve lettek a műhelyek, ami a teljes átfutási időt illeti. Itt is kivehető, hogy a legkisebb variációval a 4. műhely áll, és az elsőben nagyon magas, a második műhelyben pedig nagyon sok a kiugró érték (outlier).



21. ábra: Átfutási idők leíró statisztikája több műhely esetén

Az összesített projekt átfutási idők mellett vizsgálatra került az ütemidőtől való eltérés. Az ütemidő kiszámításához a teljes heti tervezett elérhető idő és az ezen idő alatt legyártandó mennyiség hányadosát számoltam:

$$TT = \frac{D * S * H}{I} = \frac{5 \text{ nap} * 2 \text{ műszak} * 480 \text{ perces műszak}}{100 \text{ db termék}} = 76,8 \text{ perc} \quad (15)$$

ahol,

$TT$  = Takt time, azaz ütemidő,

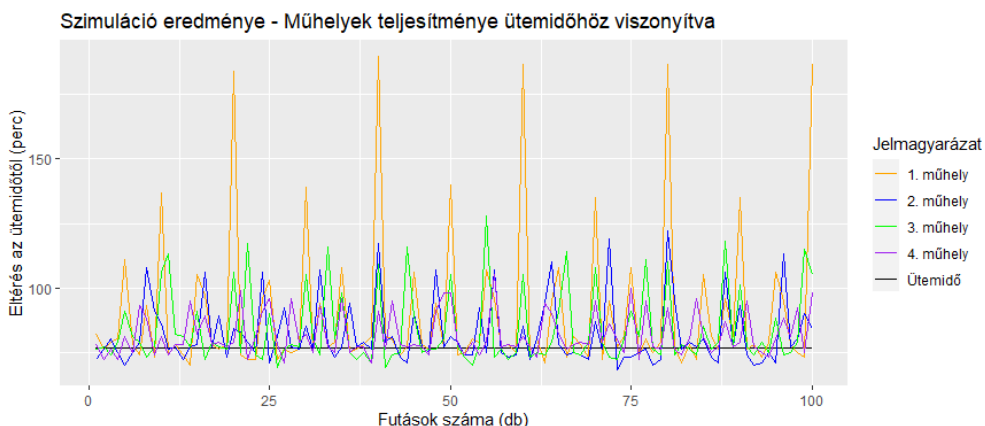
$D$  = napok száma,

$S$  = műszakok száma / nap,

$H$  = óra száma / műszak (jelen esetben percben megadva),

$I$  = Adott időintervallumra vonatkoztatott vevői igény.

A számítás mellett vizualizációra is sort került. Az ütemidő konstans értéként szerepel az elemzésben, ugyanis minden terméknek ugyanilyen ütemen belül kell lejönnie a gyártósorról, nem kapcsolódik be több állomás a gyártásba az idő előrehaladtával a kiinduló tervek alapján. Ahogyan azt a 22. ábrán is láthatjuk, az egyes gépek várható átfutási ideje meg fogja haladni az ütemidőt, amely bizonyítja, hogy egyetlen egy műhely nem lenne képes kiszolgálni a vevői igényeket.



22. ábra: Ütemidőtől való eltérés

Ha a műhelyeket is beleveszem a számításba, úgy szignifikánsan megnő az ütemidő:

$$TT = \frac{4 \text{ műhely} * 5 \text{ nap} * 2 \text{ műszak} * 480 \text{ perces műszak}}{100 \text{ db termék}} = 307,2 \text{ perc} \quad (16)$$

Ennek a módosításnak köszönhetően pedig láthatóvá válik, hogy minden műhely az új ütemidő alatt dolgozik, így biztosítható, hogy a vállalat képes lesz kiszolgálni ezt a vevői igényt. Mint következő lépés, az egyes tevékenységidőkhöz tartozó kritikus utak kerültek elemzésre, amelyet a következő, 19. táblázat tartalmaz:

19. táblázat: Kritikus utak eloszlása több műhely esetén

|        | <b>Műhely 1.</b>   | <b>Műhely 2.</b>   | <b>Műhely 3.</b>     | <b>Műhely 4.</b>   | <b>Teljes gyártás</b> |
|--------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|
| „A” út | 89.00%<br>(89/100) | 91.00%<br>(91/100) | 100.00%<br>(100/100) | 85.00%<br>(85/100) | 91.25%<br>(365/400)   |
| „B” út | 11.00%<br>(11/100) | 9.00%<br>(9/100)   | 0.00%<br>(0/100)     | 15.00%<br>(15/100) | 8.75%<br>(35/400)     |

2 főbb kritikus út volt megtalálható a szimulációs futások ellenőrzése során. A termelés a szimuláció alapján az „A” úton ment nagyrészt minden műhelynél, viszont némely esetben ez áttérlődött a „B” útra is, ennek használata azonban nem volt annyira szignifikáns.

Ami a 100 termék legyártását illeti, a műhelyeknek egyedül 18-19 napra, tehát közel 4 hétnyi munkára lenne szüksége, hogy a teljes vevői igényt kielégítse. Ha a műhely egyedül gyárt, abban az esetben nincs helye ütemezésnek, hiszen a termékek gyártása egy csatornán lineárisan történik meg. Több gép esetén viszont a gyártásütemezésre azért van szükség, hogy hozzá tudjunk rendelni egy gyártási mennyiséget.

### 6.2.3. A műhelyek ütemezése

A több műhely miatt szükségessé válik a termelési tevékenység ütemezése is, hiszen a projekt kivitelezését több műhellyel együtt kell megoldani. Az alapvető

számítás jelen esetben az kell, hogy legyen, hogy a vállalat kiszámolja a napi kapacitásértékeket (vagyis mennyit képes egy műhely az adott napon elkészíteni, figyelembe véve a gyártási folyamatba épült bizonytalanságokat és kockázatokat). Ennek megfelelően egy műhely adott napon nem gyárthat több terméket, mint amennyi az a szimuláció által kiszámításra kerül:

$$x_{ij} \leq u_{ij} \quad (17)$$

$$i \in [1; 4], j \in [1; 5]$$

ahol:

$x_{ij}$  =  $i$ -edik műhelyben,  $j$ -edik napot gyártott mennyiség,

$u_{ij}$  =  $i$ -edik műhelyben,  $j$ -edik napon maximálisan legyártható mennyiség.

A gyártásra vonatkozóan, ahhoz hogy a hét végére ki tudja a cég szolgálni a vevői igényeket, szükség lesz egy olyan elemre is, amely jelzi, hogy mekkora a készlet-szint az adott napokon. Mivel készletet csupán az első négy napon képződik, az ötödikre kész lesz a teljes termelés, valamint nincs meghatározva, hogy minimálisan mennyi darabot gyártson a vállalat – így tárolják az adott nap végén a műhelyhez tartozó készletként.

$$\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 x_{ij} \geq I_j \quad (18)$$

ahol:

$x_{ij}$  = a  $i$ -edik műhely  $j$ -edik napjain összesen legyártott mennyiség,

$I_j$  = a vevő  $j$ -edik napi igénye.

A vállalatnak feladott megrendelés szerint 100 darab terméket kell legyártania, amely a lineáris programozási modellben az alábbiak szerint történik: az első

négy nap gyártása adja a vállalat adott termékből álló készlet szintjét ( $T_4$ ) a negyedik nap végére, amihez hozzáadódik az 5. munkanap gyártása az összes műhelyt figyelembe véve. Ahogy az a képlet alapján is látható, a korlátozó tényező nem szigorúan egyenlőséget határoz meg gyártandó mennyiségként, azonban a modell célfüggvénye egy minimum függvény lesz, amely nem fogja az összesen legyártott mennyiséget pozitív irányba elmozdulni:

$$\sum_{i=1}^4 x_{i5} + T_4 \geq I_5 \quad (19)$$

ahol:

$x_{i5}$  =  $i$ -edik műhely 5. napon legyártott mennyisége,

$T_4$  = 4. nap végi készlet szint,

$I_5$  = Vevői igény az 5. napon.

Mivel a szimuláció során látható, hogy van elegendő kapacitás a termék legyártására, további elemzési eszköz lehet, hogy költségeket is beépítsünk a modellbe. Ez már nem feltétlenül kell, hogy a döntéshozást befolyásolja, a fő eredményt, azaz az adott műhelyszám mellett hány napra van szükség a projekt elvégzésére már kiszámításra került. A napi döntéshozatalt, valamint a nyomonkövetést viszont nagyban segíti, ha további elemzésnek vetjük alá a módszert, hiszen így kapható meg teljeskörű információ a gyártásról. Ennek megfelelően a vállalatok egy kritikus indikátora alapján dönthető el a napi gyártás az alábbiak szerint:

$$\min z = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 c_{ij} x_{ij} + \sum_{j=1}^4 T_j * c^k \quad (20)$$

ahol:

$\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 c_{ij} x_{ij}$  =  $j$ -edik műhely  $i$ -edik napi összesített termelési költsége,

$\sum_{j=1}^4 T_j * c^k$  = A négy nap összesített készletezési költsége.

A termelési költség esetén minden alapanyagköltség és munkadíj beletartozhat, amely a gyártás közvetlen költségét jelenti – így a gyártás során felmerülő hibák megoldására költött összeg is.

- 1) Ennek megfelelően még két szempont alapján lehetséges a döntéshozatal: Amikor a készletezési költség nem releváns
- 2) Amikor a készletezési költség releváns

Mindkét esetben ugyanaz volt a célfüggvény, viszont a költségértékek változtak (készletezési költség első esetben = 0; második esetben = 1 egység): Az előzőekben bemutatott képletek lineáris programozási feladatba kerültek implementálásra, amit a következő, 23. ábra is bemutat:

|          | X11 | X21 | X31 | X41 | T1 | X12 | X22 | X32 | X42 | T2 | X13 | X23 | X33 | X43 | T3 | X14 | X24 | X34 | X44 | T4 | X15 | X25 | X35 | X45 | F   | R   | K   |
|----------|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| X1       | 1   |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     | 5   | ≤   | 5   |
| X2       |     | 1   |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     | 6   | ≤   | 6   |
| X3       |     |     | 1   |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     | 6   | ≤   | 6   |
| X4       |     |     |     | 1   |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     | 6   | ≤   | 6   |
| X5       |     |     |     |     | 1  |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     | 6   | ≤   | 6   |
| X6       |     |     |     |     |    | 1   |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     | 5   | ≤   | 5   |
| X7       |     |     |     |     |    |     | 1   |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     | 5   | ≤   | 5   |
| X8       |     |     |     |     |    |     |     | 1   |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     | 6   | ≤   | 6   |
| X9       |     |     |     |     |    |     |     |     | 1   |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     | 5   | ≤   | 5   |
| X10      |     |     |     |     |    |     |     |     |     | 1  |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     | 6   | ≤   | 6   |
| X11      |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    | 1   |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     | 5   | ≤   | 5   |
| X12      |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     | 1   |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     | 5   | ≤   | 5   |
| X13      |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     | 1   |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     | 5   | ≤   | 5   |
| X14      |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     | 1   |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     | 6   | ≤   | 6   |
| X15      |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     | 1  |     |     |     |     |    |     |     |     |     | 5   | ≤   | 5   |
| X16      |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    | 1   |     |     |     |    |     |     |     |     | 6   | ≤   | 6   |
| X17      |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     | 1   |     |     |    |     |     |     |     | 4   | ≤   | 6   |
| X18      |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     | 1   |     |    |     |     |     |     | 0   | ≤   | 6   |
| X19      |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     | 1   |    |     |     |     |     | 7   | ≤   | 7   |
| X20      |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     | 1  |     |     |     |     | 0   | ≤   | 6   |
| Igény 1. | 1   |     |     |     |    | -1  |     |     |     |    | -1  |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     | 0   | ≥   | 0   |
| Igény 2. |     | 1   |     |     |    |     | 1   |     |     |    |     | 1   |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     | 0   | ≥   | 0   |
| Igény 3. |     |     | 1   |     |    |     |     | 1   |     |    |     | 1   |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     | 0   | ≥   | 0   |
| Igény 4. |     |     |     | 1   |    |     |     |     |     |    |     |     | 1   |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     | 0   | ≥   | 0   |
| Igény 5. |     |     |     |     | 1  |     |     |     |     |    |     |     |     |     | 1  |     |     |     |     |    |     |     |     |     | 0   | ≥   | 0   |
| Költség  |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    |     |     |     |     |    | 1   |     |     |     | 100 | ≥   | 100 |
| Megoldás | 5   | 6   | 6   | 6   | 23 | 6   | 5   | 5   | 6   | 45 | 5   | 6   | 6   | 5   | 67 | 5   | 6   | 5   | 6   | 89 | 4   | 0   | 7   | 0   | #   | MIN |     |

23. ábra: Lineáris programozási modell műhelyek ütemezésére

Az első scenárióban – tehát amikor nincs készletezési költség a modellben, akkor a 20. táblázat alapján készülne el az ütemezés:

20. táblázat: Ütemezés készletezési költség nélkül

|                           | 1. nap | 2. nap | 3. nap | 4. nap | 5. nap |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Műhely 1.<br>készlet (db) | 5      | 6      | 5      | 5      | 6      |
| Műhely 2.<br>készlet (db) | 6      | 5      | 6      | 6      | 5      |
| Műhely 3.<br>készlet (db) | 6      | 5      | 6      | 5      | Ø      |
| Műhely 4.<br>készlet (db) | 6      | 6      | 5      | 6      | Ø      |
| Készlet (db)              | 23     | 45     | 67     | 89     | 100    |

Ennek megfelelően minden legyártott termék az első napokon kerülne legyártásra, így az utolsó nap a 3. és 4. műhelynek nem kellene termelést beütemezni. Ennek következményeként egy másik projekt előkészülete, vagy éppen másik projekt kerülhetne erre a napra, mely a gördülő tervezést segítené a vállalat számára. Természetesen ez egy megoldás, vannak vagy lehetnek alternatív optimumok is a modellben. A modell megoldásán döntéshozók még alakíthatnak saját belátásuk szerint. Ebben az esetben is figyelemmel kell kísérnie a vállalatnak, hogy a következő megbízhatósági problémák mikor következnek be a gyártásban, nehogy emiatt legyen csúszás a projektben.

Abban a forgatókönyvben, amikor a készletezési költség releváns, illetve fontos döntési tényező, akkor a termelés ütemezése annyiban változik meg, hogy a termelés úgy próbáljaműtemezni, hogy az a lehető legkésőbbi időpontban készüljön el. Ennek eredményeként egy olyan gyártási tervet kaptam, amely a legkifeszítettebb, hiszen erőforrást hagyunk el az első nap, ezzel megtakarítva valamennyi összeget (vagy épp befejezve az előtte levő projektet). A gyártási terv akkor, amikor számít a készletezési költség a 21. táblázatban található:



21. táblázat: Ütemezés készletezési költséggel

|                           | 1. nap | 2. nap | 3. nap | 4. nap | 5. nap |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Műhely 1.<br>készlet (db) | Ø      | 6      | 5      | 5      | 6      |
| Műhely 2.<br>készlet (db) | 6      | 5      | 6      | 6      | 6      |
| Műhely 3.<br>készlet (db) | Ø      | 5      | 6      | 5      | 7      |
| Műhely 4.<br>készlet (db) | 3      | 6      | 5      | 6      | 6      |
| Készlet (db)              | 9      | 31     | 53     | 75     | 100    |

Összefoglalva az eredményeket: a termelésütemezés során két szempontból került vizsgálatra ugyanaz a projektgyártási feladat. Négy műhelyre kellett szétosztani a termelést úgy, hogy a termelésben található kockázatokat, és bizonytalanságokat is figyelembe vette a modell. Ennek eredményeként kapacitásértékek határozhatók meg, továbbá gyártással relációban álló költségeket felhasználva két merőben eltérő eredményt kaphat a döntéshozó a projekt ütemezésére. Ezek közötti választás, vagy akár kompromisszumos megoldás melletti döntés a döntéshozó feladata, függően a kockázatvállalási attitűdjétől.

## 7. ÚJ TUDOMÁNYOS MEGÁLLAPÍTÁSAIM, TÉZISEIM

**Megbízhatósági indikátorok fontosságának elemzése és kiválasztása többszemponútú döntéstámogató rendszer és termékfejlesztési módszertan kombinációjával.**

- A kutatás során elsődleges cél volt, hogy megállapítsam, milyen megbízhatósági indikátorok szükségesek az ipar számára kis szériás projekt struktúrában. A dolgozat első részében irodalmi kutatást továbbá, interjúkat készítettem ipari és tudományos területről annak megállapítására, hogy milyen indikátorok fontosak. Ezen felül a célkitűzésem lefedte a szakemberek által támasztott követelmények összegyűjtését, és elemzését többszemponútú döntéstámogató módszer segítségével. A dolgozat eredményeként a *„két meghibásodás között eltelt átlagos idő”*, valamint az *„átlagos állásidő”* mutatók voltak a legfontosabbak. Ezek közös használatát az irodalomkutatás során számos tanulmányban láttam, viszont ennek kritikus-út módszerben történő használatáról nem volt tudományos beszámoló.
- A mutatók és az elvárások közötti összefüggést, továbbá a fejlesztési módszeremet az úgynevezett „Minőség háza” módszer alapozta meg, ahol az egyes komponensek korrelációját vizsgáltam meg, továbbá itt fogalmazódott meg, hogy milyen szempontok szerint haladjon a módszertani fejlesztés. A módszertan helyességéért és objektívátásáért AHP módszertant alkalmaztam, amivel kiszűrhető lett volna az egyes kritériumok meghatározásánál lehetséges inkonzisztencia. A mutatók segítségével kiderült, hogy a két meghibásodás között eltelt átlagos idő (MTBF) továbbá az átlagos állásidő indikátorok számítanak a legfontosabbnak, ugyanis mindkettőnek óriási hatása van az adott időszak alatt mért állásidőre, így a kapacításra, ezáltal a gyár profit termelő képességére is.

### **Meghibásodások között eltelt átlagos ciklus, valamint átlagos állásidő indikátorok sztochasztikus kritikus út módszerben történő használata.**

- A folyamatszimulációba épített „MTBF” indikátorát célszerűbb az eltelt idő helyett annak használatának száma alapján számszerűsíteni, hiszen projektgyártás esetén nem biztosított, hogy adott gép, szerszám vagy eszköz is használva lesz, így az indikátor hibás eredményt szolgáltat a döntéshozó számára. Ezzel az újszerű megközelítéssel valósabb képet kaphatnak a döntéshozók arról, hogy átlagosan hányadik használatra történik valamilyen megbízhatóságot érintő probléma, és a projektek tervezésekor már számíthatnak a hiba elég magas valószínűségű bekövetkezésére. A szimulációban megjelenő, számszerűsített hibára már a tervezési szakaszban fény derülhet, és az erre hozott azonnali javító intézkedések pedig rugalmassá és ellenállóbbá teszik a gyártást az esetleges problémák felmerülésekor.
- A folyamatszimulációba az „átlagos állásidő” indikátor iparágtól vagy döntési helyzettől függően lehet valószínűségi változó is, a döntéshozó jogkörétől és a projekt komplexitásától függően. A valószínűségi változó beépítése plusz számítási kapacitást emészt fel, így tanácsos ezt is figyelembe venni ennek eldöntésekor.
- A projektszimuláció során a gépek hibáinak előfordulása összekapcsolható, vagyis az egyes hibák egymásra gyakorolt hatása is modellezhető a szimulációban, legyen az közvetlenül (ugyanabban az iterációban) vagy később (1-2 gyártási ciklussal később), vagy akár egyik hiba többszöri előfordulásának következménye (pl. minden harmadik „A” hiba fogja indukálni a „B” hibát). Ezen gyártói igény lefedésével a szimulációs adatbázisban nem szükséges semmit se változtatni, így teljeskörű elemzés érhető el.

**Módosított sztochasztikus kritikus út és lineáris programozási modell kombinációjával együtt megadható olyan termelésütemezési terv, amely figyelembe veszi a műhelyek meghibásodásának valószínűségét.**

- A kiszámított várható napi kapacitásadatokból gyártásütemezési eljárás készíthető. A módszer eredményeként előálló gyártásütemezési eljárás képes több szempontból megvizsgálni a gyártási tervet, többféle eredményt szolgáltatva segíteni a döntéshozót az általa preferált döntések meghozatalában.
- A disszertációban bemutatott újszerű elemzési javaslat nem iparág-specifikus, minden olyan területen alkalmazható, melyben egyedi megrendelések érkeznek, és a gyártás projektalapon működik, akár egy, akár több műhely vagy gyártóegység alkalmazásával. Ebben az esetben nem csak a lehetséges hiba bekövetkezését lehet előre jelezni, megbecsülni, hanem egyéb fontos KPI-okat is előre tud jelezni a szimuláció, amely a gyártásnak létfontosságú az aggregált tervezés során.

**Szimulációval támogatott projekttervezési modell hatékonyabban támogatja a döntéshozókat a tervezésben, mint a klasszikus determinisztikus modellek. Az eredeti kiindulási értékekhez viszonyítva 20 %-os javulás érhető el a módosított modell alkalmazásával.**

- Esettanulmányon keresztül bemutattam a determinisztikus és sztochasztikus módszerek közötti különbséget. Közepes mennyiségű hiba esetén az egyes tevékenységlefutásokra a determinisztikus modell alacsonyabb átlagos abszolút eltérést mutat a valós modellhez képest, viszont a teljes időhorizontot tekintve, tehát többszöri lefutást, a projektgyártás befejezésére megközelítőleg 20%-kal pontosabb eredményt ad eltérés esetén. A

### **Egyéb megállapítások**

A szimulációs eljárás nem csupán a megbízhatósági problémával terhelt átfutási időket mutatja meg a döntéshozók számára, hanem az adatbázisnak köszönhetően számos egyéb analízis elkészíthető, mint például.

- Kritikus utak megoszlása: ha bekövetkezik egy hiba, az hatással lesz-e az átfutási időre. Ez akkor evidens, ha a gyártási lépés a kritikus úton van, viszont előfordulhat az, hogy egy nem kritikus tevékenység ideje annyira megnövekszik, hogy új út lesz kritikus. Harmadik eshetőség, hogy a hiba nem fogja befolyásolni az átfutási időt, így ennek megfelelően csak kellemtelenség adódik a javításból, plusz időbeli vonzata nem lesz a teljes átfutási időt illetően.
- Az aggregált tevékenységidőknek köszönhetően napi/heti kapacitásokra lebontható a gyártás, amelynek eredménye egy átgondolt és realisztikus napi ütemezés és nyomonkövetés lesz.
- Szükség esetén tartalékidő-elemzést is lehet készíteni annak érdekében, hogy minél részletesebb legyen a gyártási és egyéb erőforrásterv.

A szimuláció által kapott eredmény beépíthető egy belső folyamatfejlesztési projektbe is, hiszen a gépek megbízhatósági gondjai a teljes folyamat alapján prioritizálhatók – ezekre a disszertációban ismertetett mutatók alkalmasak. A prioritizálás mellett hatásvizsgálat is könnyen készíthető a folyamatszimuláció módosításával és újbóli futásával, így maximalizálva a projekt előkészítési fázis során szerzett adatok minőségét.

Az Ipar 4.0 módszerei által támogatott termelés elegendő adatot szolgáltat a tevékenységidők előrejelzésére, valamint mintázatok fedezhetők fel az egyes gépek meghibásodásainál. Ezek lehetnek egymásra ható meghibásodások (ha „A” hiba bekövetkezik, akkor a „B” hiba is be fog → „dominó-effektus”), vagy csak egyedüli hibák. A Manufacturing Execution System (MES) által szolgáltatott adatok lefedik a folyamat szimulációhoz szükséges inputokat, amelyek a következők: folyamat kezdetét jelző időbélyeg („process start”), folyamat végeztét jelző időbélyeg („process\_end”), utóbbival pedig a termék egyes környezeti és gyártási információit, amely alapján eldől, hogy a termék jól lett-e elvégezve, és így mehet tovább a transzformációs folyamatban, avagy sem.

## 8. ÖSSZEFOGLALÁS

A vállalatok célja az, hogy a vevői igényeket teljes körűen kiszolgálják, legyen az az igény a termék minőségére, mennyiségére vagy éppen a megszabott határidőre vonatkoztatva. Egyedi termékek alacsony vagy közepes intenzitású gyártása esetén kiemelten fontos, hogy a vevői igény minőséget tekintve előre még nem ismert (mert a kívánt termék egy egyedi termék lesz), emiatt a termék ára magasabb, viszont a gyártása körültekintő tervezést, magas szakképzettséggel rendelkező szakemberek munkáját és többcélú eszközök, szerszámok valamint gépek beszerzését és használatát igényli. Ennek megfelelően a költségek magasak lesznek, ez készítetve a vállalatot a lehető legnagyobb hatékonyság elérésére. A hatékonyság egyedi termékek alacsony vagy közepes intenzitású gyártása során előkészületet igényel, hiszen előfordulhat, hogy a termék több paraméterében változik, ezzel egy új design-fázist indítva. Ezzel összhangban kell lennie a gyártási struktúrának, tehát ha olyan terméket is érintő változás történik, amely a gépek átalakítását vagy másmilyen használatát igényli, úgy mindenképp átgondolt tervezési fázis kell megalapozza a teljes termékgyártást. A legismertebb átfutási idő-alapú módszerek – úgy mint a determinisztikus és sztochasztikus CPM és a PERT - vizsgálatra kerültek, amelyben számos olyan hátrány került elő, amely nehezíti az előbb említett cél elérését (*C1 cél; T2 hipotézis*). A tervezést nehezítheti az előre nem látható kockázatok, vagy a folyamatba beépített bizonytalanságok is, amelyek elsődlegesen a gyártóberendezések megbízhatóságának tudhatók be. A dolgozat kiindulópontja termék gyártására vonatkozó kockázat-értékelő keretrendszer fejlesztése volt, amely kiszolgálja a vállalati igényeket: időn alapuló módszertan, mérhetőség, gyakoriság, dominó-effektus, kritikus út rögzítése, termelésütemezési eljárásba való integráció lehetősége, alacsony számítási kapacitás. A folyamat második lépéseként megkeresésre került az összes olyan megbízhatósági indikátor, amely a termelésre jelentős hatást jelez. Ezek között az indikátorok között egy QFD és AHP módszertani kettőssel kiválasztásra kerültek azok az indikátorok, amelyek a legfontosabbak a fentebb említett célok

elérésében; ezek pedig a „két hiba között eltelt átlagos idő” valamint az „átlagos állásidő” indikátorok voltak (*C2 cél; T1 tézis*).

A rendelkezésre álló információk segítségével megvalósult egy módszertani fejlesztés, amelynek eredménye ez a disszertáció. A módszerem figyelembe veszi szimulációs környezetben a kiválasztott indikátorokat, kiértékeli a tevékenységidőket, kritikus utakat, valamint segítségével modellezni lehet a meghibásodások egymásra gyakorolt hatását is. A döntéshozatali eljárást segítő vizuális eszközök meghatározása is megtörtént a lehető leginformatívabb módon, amely nagyban segítheti a döntéshozó tervezési munkáját (*C3-C4-C5 célok, T3 tézis*). A gyakoriság igényének megfelelően, valamint a projektgyártásból adódó hektikus eszköz/géphasználat miatt olyan MTBF indikátor került implementálásra, amely az értékét ciklusban adja meg, ezzel segítve a döntéshozót a realisztikusabb eredmény megismerésében (*T4 tézis*). További elvárás volt a „dominó-effektus” modellezése is, hiszen a gyártásban előfordulhat egy hiba egy másik hibának fog megágyazni. Erre pedig az előbb ismertetett ciklus-alapú megoldás a kézenfekvő (*T4 tézis*).

További célom volt, hogy a megbízhatósági indikátorokat kiegészítsek egy termelésütemezési eljárással, amely a legyártandó mennyiséget a rendelkezésre álló erőforrások között szét tudja osztani. Mindezt úgy, hogy a hagyományosan kockázatmenedzsmentben használt kockázati mátrix valamint hibamód és hatáselemzés módszerek hátrányait kiküszöbölve, ezektől eltérő, de inkább matematikai alapokon nyugvó, vagyis kvantitatív módszertani fejlesztés eredményeként értékeljük a kockázatokat (*T5 tézis*).

A fejlesztett módszer validálása két esettanulmányon keresztül történt meg: az első esettanulmány egy gépes kockázatelemzést tartalmaz, míg a második már többgépes ütemezéssel is kibővül annak érdekében, hogy a lehető legtöbb, projektgyártásban dolgozó vállalat könnyen beépíthesse mindennapi rutinjába.

A disszertációm utolsó lépéseként egy keretrendszer került kialakításra, amely arra próbál választ adni, hogy speciális, egymással illetve Ipar 4.0 rendszerekkel kommunikáló gépek esetén milyen megoldás lehetséges (*C6 cél*). A kutatás során számos olyan, már piacon is elérhető szoftvert találtam, amely „manuális” munka adminisztrációjára lett kitalálva, könnyen és egyszerűen lehet adatot felvinni és egyéb kiegészítő adatokat (pl. állásidő oka) a rendszerbe, amely akár adatbázisban, akár interaktívabb módon – dashboardon is megjelenítésre kerülhet.



## 9. SUMMARY

The aim of the companies is to fully meet the customer's needs, whether the need refers to the quality or quantity of the product or the set deadline. In the case of low- or medium-intensity production of individual products, it is extremely important that the customer's demand in terms of quality is not yet known in advance (because the desired product will be a unique product), for this reason the price of the product is higher, but the production requires careful planning and a high level of expertise. requires the work of professionals and the acquisition and use of multi-purpose tools, tools and machines. Accordingly, costs will be high, prompting the company to achieve the greatest possible efficiency. Efficiency requires preparation during the low- or medium-intensity production of individual products, as several parameters of the product may change, thereby starting a new design phase. The production structure must be in line with this, so if there is a change affecting a product that requires the transformation or other use of the machines, then a well-thought-out planning phase must be the basis for the entire product production. The most well-known lead time-based methods - such as deterministic and stochastic CPM and PERT - were examined, in which several disadvantages were found that make it difficult to achieve the aforementioned goal (goal C1; hypothesis T2). Planning can be complicated by unforeseen risks or uncertainties built into the process, which are primarily due to the reliability of the production equipment. The starting point of the thesis was the development of a risk assessment framework for product manufacturing, which serves the company's needs: time-based methodology, measurability, frequency, a domino effect, critical path recording, the possibility of integration into the production scheduling procedure, low computing capacity. As a second step in the process, all reliability indicators that indicate a significant impact on production were searched. Among these indicators, the indicators that are the most important in achieving the above-mentioned goals were selected using a QFD and AHP

methodological duo; and these were the "average time between two errors" and the "average downtime" indicators (objective C2; thesis T1).

With the help of the available information, a methodological development was realized, the result of which is this dissertation. My method considers selected indicators in a simulation environment, evaluates activity times, critical paths, and can also be used to model the effect of failures on each other. The visual aids to assist the decision-making process were defined in the most informative way possible, which can greatly help the decision-maker's planning work (objectives C3-C4-C5, thesis T3). In response to the need for frequency, and due to the hectic use of tools/machines resulting from project production, an MTBF indicator was implemented that gives its value in a cycle, thus helping the decision-maker to get to know the more realistic result (thesis T4). Another requirement was the modeling of the "domino effect", since one error in production may lead to another error. And the cycle-based solution described above is obvious (thesis T4).

Another goal was to supplement the reliability indicators with a production scheduling procedure that can distribute the quantity to be produced among the available resources. All this by eliminating the disadvantages of the risk matrix and error mode and impact analysis methods traditionally used in risk management, and we evaluate the risks as the result of quantitative methodological development, which differs from them, but is more based on mathematical foundations (thesis T5).

The developed method was validated through two case studies: the first case study contains a machine risk analysis, while the second one is extended with multi-machine scheduling in order to easily incorporate it into the daily routine of as many companies working in project production as possible.

As the last step of my dissertation, a framework was created, which tries to answer what kind of solution is possible for special machines that communicate with each other and with Industry 4.0 systems (goal C6). During the

research, I found a number of software already available on the market, which were designed for the administration of "manual" work, it is easy and simple to upload data and other additional data (e.g. reason for downtime) into the system, either in a database or in a more interactive way – can also be displayed on the dashboard.

## 10. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Demeter Krisztina, Termelés, szolgáltatás, logisztika, Budapest: Wolters Kluwer Kft., 2014.
- [2] Gubán Ákos, Logisztika - Felvetések, példák, válaszok, Budapest: Saldo Zrt., 2013.
- [3] Péczely György, et al., Lean3 - Termelékenyséfejlesztés egységes rendszerben, Szeged: ICG Stádium Kft..
- [4] Carsten Linz, et al, Az üzleti modellek radikális átalakítása, Budapest: Pallas Athéné Books, 2018.
- [5] Paolo Perico, et. al., „MES as an Enabler of Lean Manufacturing,” *IFAC-PapersOnLine*, pp. 48-53, 2019.
- [6] Xi Tian et al., „An infinite life cycle assessment model to re-evaluate resource efficiency and environmental impacts of circular economy systems,” *Waste Management*, pp. 72-82, 2022.
- [7] Project Management Institute, A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide) – and the Standard for Project Management, Project Management Institute, 2017.
- [8] Polónyi. István, Tevékenységmenedzsment, Debrecen: Debreceni Egyetem, 2007.
- [9] Balázs Kocsi, et al.: „Real-Time Decision-Support System for High-Mix Low-Volume Production Scheduling in Industry 4.0,” *Processes*, 2020.
- [10] Wayne L. Winston, Operations Research: Applications and algorithms, Belmont: Brooks/Cole - Thomson Learning, 2004.
- [11] Cliff Ragsdale, Spreadsheet Modeling & Decision Analysis: A Practical Introduction to Business Analytics, Boston: Cengage Learning, 2017.

- [12] Tortorella, Guilherme Luz, et al., „Implementation of Industry 4.0 and Lean Production in Brazilian Manufacturing Companies,” *International Journal of Production Research*, pp. 2975-2987, 2017.
- [13] Marlene Kuhn, et al., „Blockchain architecture for automotive traceability,” *Procedia CIRP*, pp. 390-395, 2021.
- [14] Fátima Leal, Adriana E. Chis, „Smart Pharmaceutical Manufacturing: Ensuring End-to-End Traceability and Data Integrity in Medicine Production,” *Big Data Research*, 2021.
- [15] Aditya Sinha, et al., „Worldwide trends in the scientific production of literature on traceability in food safety: A bibliometric analysis,” *Artificial Intelligence in Agriculture*, pp. 252-261, 2021.
- [16] E. L. Itskovich, „Fundamentals of Design and Operation of Manufacturing Executive Systems (MES) in Large Plants,” *IFAC Proceedings Volumes*, pp. 313-318, 2013.
- [17] Chiuhsiang Joe Lin, et al., „Prediction of the use of mobile device interfaces in the progressive aging process with the model of Fitts’ law,” *Journal of Biomedical Informatics*, 2020.
- [18] Raymonvan Dinter, et al., „Predictive maintenance using digital twins: A systematic literature review,” *Information and Software Technology*, 2022.
- [19] Ghita Bencheikh et al., „An approach for joint scheduling of production and predictive maintenance activities,” *Journal of Manufacturing Systems*, pp. 546-560, 2022.
- [20] P. T.Engström, et al., „Data collection and analysis of manual work using video recording and personal computer techniques,” *International Journal of Industrial Ergonomics*, pp. 291-298, 1997.
- [21] Jaeil Park, „Evaluating a mobile data-collection system for production information in SMEs,” *Computers in Industry*, pp. 53-64, 2015.

- [22] Aurélien Lux, et al., „FMEA and consideration of real work situations for safer design of production systems,” *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, pp. 1-8., 2016.
- [23] Christian Spreafico, et al., „A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents,” *Computer Science Review*, pp. 19-28, 2017.
- [24] Seung J. Rhee, Kosuke Ishii Using cost based FMEA to enhance reliability and serviceability,” *Advanced Engineering Informatics*, pp. 179-188, 2003.
- [25] Pusztai László, et al., „Making engineering projects more thoughtful with the use of fuzzy value-based project planning,” *Pollack Periodica*, pp. 25-34, 2019.
- [26] Parmpreet Kaur, Parmpreet Kaur, „Linear programming approach for solving fuzzy critical path problems with fuzzy parameters,” *Applied Soft Computing*, pp. 309-319, 2014.
- [27] Mete Mazlum, Ali Fuat Güneri, „CPM, PERT and Project Management with Fuzzy Logic Technique and Implementation on a Business,” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, pp. 348-357, 2015.
- [28] Kövesi János, Minőség és megbízhatóság a menedzsmentben, Budapest: Typotex Kiadó, 2011.
- [29] Demeter Krisztina, et al: Tevékenységmenedzsment, Budapest: Akadémiai kiadó, 2022 (online).
- [30] Jay Heizer et al., Principles of operations management,, New Jersey: Prentice-Hall International, 1997.
- [31] International Organization for Standardization, ISO 21502:2022, 2022.
- [32] Garaj Erika, Projektmenedzsment, Tatabánya: Edutus Főiskola, 2021.
- [33] Szűcs István, Nagy Adrián Szilárd, A projektmenedzsment gyakorlata, Debrecen: Debreceni Egyetem, 2105.
- [34] Görög Mihály, Általános projektmenedzsment, Budapest: Aula Kiadó, 2007.

- [35] Abusaleem Osama, et al., „Implementing quantitative techniques to improve decision making in construction projects: A case study,” *Pollack Periodica*, pp. 223-234, 2019.
- [36] Pei-Yuan Hsu, et al., „Investigating Schedule Deviation in Construction Projects through Root Cause Analysis,” *Procedia Computer Science*, pp. 732-739, 2017.
- [37] Enrique de-Madaria, et al., „The present and future of gastroenterology and hepatology: an international SWOT analysis (the GASTROSWOT project),” *The Lancet Gastroenterology & Hepatology*, pp. 485-494, 2022.
- [38] Gabriel Carvalhode Sousa, et al., „PESTEL analysis and the macro-environmental factors that influence the development of the electric and hybrid vehicles industry in Brazil,” *Case Studies on Transport Policy*, pp. 689-699, 2022.
- [39] Behrad Barghi, Shahram Shadrokh Sikari, „Qualitative and quantitative project risk assessment using a hybrid PMBOK model developed under uncertainty conditions,” *Heliyon*, 2020.
- [40] J. Mendling, et al., „Seven process modeling guidelines (7PMG),” *Information and Software Technology*, pp. 127-136, 2010.
- [41] ARIS, „EPC in Aris - Cheat sheet,” Software AG., [Online]. Available: [https://documentation.softwareag.com/aris/UML\\_Designer/10-0sr8/yud10-0sr8e/10-0sr8\\_EPC\\_Cheat\\_Sheet.pdf](https://documentation.softwareag.com/aris/UML_Designer/10-0sr8/yud10-0sr8e/10-0sr8_EPC_Cheat_Sheet.pdf). [Hozzáférés dátuma: 3. december 2022].
- [42] T Tangkawarow, et al., „A Comparative of business process modelling techniques,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015.
- [43] Hajnal Péter, Gráfelmélet, Szeged: Polygon, 1997.
- [44] Varró Zoltán, Temesi József, Operációkutatás, Budapest: Akadémiai Kiadó, 2014.

- [45] Benkő János, „Petri-hálók alkalmazása termelési és logisztikai folyamatok modellezésére,” *Logisztikai Évkönyv*, pp. 1-12., 2016.
- [46] Paul J. Fortier, Howard E. Michel, „Petri nets,” in *Computer Systems Performance Evaluation and Prediction*, Burlington, Elsevier Science, 2003, pp. 279-305..
- [47] Wil Van der Aalst, „Decomposing Petri Nets for Process Mining - A generic approach -,” in *Distributed and Parallel Databases*, Berlin, Springer Nature, 2012, pp. 471-507.
- [48] B. F. van Dongen, et al., „Process Mining: Overview and Outlook of Petri Net Discovery Algorithms,” in *Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency II*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2009, pp. 225-242.
- [49] Pusztai László, et al.: „Selection of Production Reliability Indicators for Project Simulation Model,” *Applied Sciences*, 2022.
- [50] Wil Van der Aalst, „Business Process Simulation Survival Guide,” in *Handbook on Business Process Management*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2014, pp. 337-370.
- [51] Kehl Dániel, „Monte-Carlo-módszerek a statisztikában,” *Statisztikai szemle*, pp. 521-543., 2012.
- [52] Obádovics J. Gyula, Valószínűségszámítás és matematikai statisztika, Budapest: Scholar Kiadó, 2009.
- [53] Kerékgyártó Györgyné et al., Statisztikai módszerek és alkalmazásuk, Budapest: Aula Kiadó, 2008.
- [54] R. Schweickert, „Constructing a stochastic critical path network given the slacks: Representation,” *Mathematical Social Sciences*, pp. 343-366, 1991.
- [55] Yuya Takakura et al., „Application of critical path method to stochastic processes with historical operation data,” *Chemical Engineering Research and Design*, pp. 195-208, 2019.



- [56] George Michael, *The Lean Six SIGMA Pocket Toolbook*, McGraw Hill Book Co, 2004.
- [57] Lauren Van De Ginste, et al., „The role of equipment flexibility in Overall Equipment Effectiveness (OEE)-driven process improvement,” *Procedia CIRP*, pp. 289-294, 2022.
- [58] Koltai Tamás, *Termelésmenedzsment*, Budapest: Typotex Kiadó, 2006.
- [59] G. Garcia-Garcia et al., „Optimising Changeover through Lean-Manufacturing Principles: A Case Study in a Food Factory,” *Sustainability*, 2022.
- [60] Fakhreddin Rad, et al., „Industry 4.0 and supply chain performance: A systematic literature review of the benefits, challenges, and critical success factors of 11 core technologies,” *Industrial Marketing Management*, pp. 268-293, 2022.
- [61] Ehsan Mahmoodi, et al., „The impact of Industry 4.0 on bottleneck analysis in production and manufacturing: current trends and future perspectives,” *Computers & Industrial Engineering*, 2022.
- [62] W. E. Darwish Alami, „A cost benefit analysis for industry 4.0 in a job shop environment using a mixed integer linear programming model,” *Journal of Manufacturing Systems*, 2021.
- [63] František Simetinger, Josef Basi, „A pilot study: An assessment of manufacturing SMEs using a new Industry 4.0 Maturity Model for Manufacturing Small- and Middle-sized Enterprises (I4MMSME),” *Procedia Computer Science*, pp. 1068-1077, 2022.
- [64] Gábor Nick, et al., „Industry 4.0 readiness in manufacturing: Company Compass 2.0, a renewed framework and solution for Industry 4.0 maturity assessment,” *Procedia Manufacturing*, pp. 39-44., 2021.

- [65] Jonas Friedericha, Sanja Lazarova-Molnar „Towards Data-Driven Reliability Modeling for Cyber-Physical Production System” *Procedia Computer Science*, pp. 589-596., 2021.
- [66] Nedjwa ELAFRI, et al., „Lean 4.0: Synergies between Lean Management tools and Industry 4.0 technologies,” *IFAC-PapersOnLine*, pp. 2060-2066, 2022.
- [67] Gautam Dutta, et al., „Overcoming the barriers of effective implementation of manufacturing execution system in pursuit of smart manufacturing in SMEs,” *Procedia Computer Science*, pp. 820-832, 2022.
- [68] Lea Mayer et al, „Manufacturing execution systems driven process analytics: A case study from individual manufacturing,” *Procedia CIRP*, pp. 284-289, 2021.
- [69] Szilárd Jaskó et al., „Development of manufacturing execution systems in accordance with Industry 4.0 requirements: A review of standard- and ontology-based methodologies and tools,” *Computers in Industry*, 2020.
- [70] Bilal Shabbir Chohan et al., „MES Dynamic interoperability for SMEs in the Factory of the Future perspective,” *Procedia CIRP*, 2022.
- [71] L. Naciri, et al., „Lean and industry 4.0: A leading harmony,” *Procedia Computer Science*, pp. 394-406, 2022.
- [72] Johannes Seibold, et al., „Process automation in the area of manufacturability analysis using machine learning,” *Procedia Computer Science*, 2022.
- [73] Rapcsák Tamás, Több szempontú döntési problémák, Budapest: MTA SZTAKI, 2007.
- [74] Thomas L. Saaty, „The Analytic Hierarchy Process: Decision Making in Complex Environments,” in *Quantitative Assessment in Arms Control* , 1984, pp. 285-308.

- [75] R. W. Saaty, „The Analytic Hierarchy Process - what it is and how it is used,” *Mathematical Modelling*, pp. 161-176, 1987.
- [76] Thomas L. Saaty, „How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process,” *Interfaces*, pp. 19-43., 1994.
- [77] Ali Karasan, et al., „Customer-oriented product design using an integrated neutrosophic AHP & DEMATEL & QFD methodology,” *Applied Soft Computing*, pp. 1-18, 2022.
- [78] Pankaj Gupta, et al., „An integrated AHP-DEA multi-objective optimization model for sustainable transportation in mining industry,” *Resources Policy*, pp. 1-12, 2021.
- [79] Lai-Kow Chan, Ming-Lu Wu „Quality function deployment: A literature review,” *European Journal of Operational Research*, pp. 463-497, 2002.
- [80] Akshat Rampal, et al., „Kano and QFD analyses for autonomous electric car: Design for enhancing customer contentment,” *Materials Today: Proceedings*, pp. 1-8., 2022.
- [81] Adila Md Hashim, et al., „Kano Model and QFD integration approach for Ergonomic Design Improvement,” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, pp. 22-32, 2012.
- [82] Deák Csaba, Minőséghozzáértékelés, Miskolc: Bíbor Kiadó, 2005.
- [83] Leonardo Medeiros Vaz de Oliveira, et al., „Quality Function Deployment and Analytical Hierarchy Process: A literature review of their joint application,” *Concurrent Engineering*, pp. 239-251, 2020.
- [84] Fabiane L. Lizarelli, et al., „Integration of SERVQUAL, Analytical Kano, and QFD using fuzzy approaches to support improvement decisions in an entrepreneurial education service,” *Applied Soft Computing*, pp. 1-15, 2021.
- [85] Shun Takai, et al., „Sensitivity analysis of relative worth in quality function deployment matrices,” *Concurrent Engineering*, 2012.

- [86] Jairo Romero Huerta, et al., „A dynamic simulation approach to support operational,” *Simulation Modelling Practice and Theory*, pp. 1-11, 2022.
- [87] Xiaohui Chen, et al., „An approximate nondominated sorting genetic algorithm to integrate optimization of production scheduling and accurate maintenance based on reliability intervals,” *Journal of Manufacturing Systems*, pp. 227-241., 2020.
- [88] E.M. O'Brien, et al., „Novel design and diagnostics improvements for increased production capacity and improved reliability at the Los Alamos Isotope Production Facility,” *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, pp. 1-13, 2020.
- [89] B. Marchi, et al., „Economic production quantity model with learning in production, quality, reliability and energy efficiency,” *Computers & Industrial Engineering*, pp. 502-511., 2019.
- [90] Latife Gökemli, et al., „Fuzzy Bayesian reliability and availability analysis of production systems,” *Fuzzy Bayesian reliability and availability analysis of production systems*, pp. 690-696, 2010.
- [91] Harish Kumar, et al., „Reliability, availability and maintainability study of 6.5 cubic meters shovel and 60 tone dumper in a surface limestone mine,” *Materials Today: Proceedings*, pp. 199-204, 2022.
- [92] Yao Li, et al., „A practical reliability design method considering the compound weight and load-sharing,” *International Journal of Approximate Reasoning*, pp. 17-32, 2020.
- [93] Valerie L. Harmon, et al., „Reliability metrics and their management implications for open pond algae cultivation,” *Algal Research*, pp. 1-13., 2021.
- [94] Yuchen He, „Engineering application research on reliability prediction of the combined DC-DC power supply,” *Microelectronics Reliability*, pp. 1-7., 2021.

- [95] Pooya Alavian, et al., "The  $(\alpha, \beta)$ -Precise Estimates of MTBF and MTTR: Definitions, Calculations, and Induced Effect on Machine Efficiency Evaluation" *IFAC PapersOnline*, pp. 1004-1009, 2019.
- [96] Manuel Leite, et al., „Reliability and availability assessment of railway locomotive bogies under correlated failures," *Engineering Failure Analysis*, pp. 1-18, 2022.
- [97] Ing. David Dubovýa, et al., „Determination of Operational Reliability of Firefighting Special Vehicles," *Transportation Research Procedia*, pp. 126-132, 2021.
- [98] Kavyashree Na, et al. „Site reliability engineering for IOS mobile application in small-medium scale industries," *Global Transitions Proceedings*, pp. 137-144, 2021.
- [99] D. P. Kuldeep Jayaswal, „Role of reliability assessment in Si-based non-Isolated DC-DC power electronic converters," *Materials Today: Proceedings*, pp. 1-7., 2022.
- [100] Volker Strobel, et al., „Academic keyword occurrence," 04 2018. [Online]. Available: [10.5281/zenodo.1218409](https://zenodo.org/record/1218409) . [Hozzáfézés dátuma: 03. 12. 2022.].

## 11. PUBLIKÁCIÓK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN

### **Megjelent:**

1. **Pusztai, László Péter; Nagy, Lajos; Budai, István:** Selection of Production Reliability Indicators for Project Simulation Model. APPLIED SCIENCES-BASEL 12 : 10 Paper: 5012 , 15 p. (2022)
2. **Pusztai, László; Kocsi, Balázs ; Budai, István; Nagy, Lajos:** Investigation of a Production Process Under Uncertainty. POLLACK PERIODICA: AN INTERNATIONAL JOURNAL FOR ENGINEERING AND INFORMATION SCIENCES 15 : 2 pp. 49-59. , 11 p. (2020)
3. **László, Péter Pusztai ; Balázs, Kocsis ; István, Budai ; Lajos, Nagy:** Industrial process modelling with operations research method. The 11th Conference of PhD Students in Computer Science: Volume of short papers

### **Megjelenés alatt:**

1. **Pusztai, László Péter; Nagy, Lajos; Budai, István:** A risk management framework for industry 4.0 environmen. SUSTAINABILITY (Achieving Sustainability in Production Management with a Focus on Industry 4.0 and Lean Philosophy)

## 12. EGYÉB PUBLIKÁCIÓK

Kocsi, Balázs; Matonya, Michael Maiko ; Pusztai, László Péter ; Budai, István  
Real-Time Decision-Support System for High-Mix Low-Volume Production  
Scheduling in Industry 4.0  
PROCESSES 8 : 8 pp. 1-26. Paper: 912 , 26 p. (2020)

Michael, Matonya ; Balázs, Kocsi ; László, Pusztai ; István, Budai  
Production Planning, Scheduling and Risk Analysis in Manufacturing Operations  
by Robotic Process Automation  
In: Kovásznai, Gergely; Fazekas, István; Tómacs, Tibor (szerk.) Proceedings of  
the 11th International Conference on Applied Informatics (ICAI 2020)

Pusztai, László ; Kocsi, Balázs ; Budai, István ; Nagy, Lajos  
Investigation of a Production Process Under Uncertainty  
POLLACK PERIODICA: AN INTERNATIONAL JOURNAL FOR ENGINEERING AND  
INFORMATION SCIENCES 15 : 2 pp. 49-59. , 11 p. (2020)

Törő, Lilla ; Pusztai, László  
Előrejelzési módszerek elemzése és összehasonlítása egy kisvállalat számára  
INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING AND MANAGEMENT SCIENCES /  
MŰSZAKI ÉS MENEDZSMENT TUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK 5 : 1 pp. 13-20. , 8 p.  
(2020)

Kocsi, Balázs ; Pusztai, László ; Budai, Istvan  
New approach for resource allocation in digital healthcare 4.0  
In: Javier, Orozco Messana; Juan, Miguel Martínez Rubio (szerk.) Proceedings 5th  
CARPE Conference: Horizon Europe and beyond  
Valencia, Spanyolország : Editorial Universidad Politécnica de Valencia (2019)  
268 p. pp. 244-251. , 8 p.

Csipkés, M ; Pusztai, L ; Nagy, L

Energiamenedzsment térhódítása Magyarországon = The importance of energy management in Hungary

INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING AND MANAGEMENT SCIENCES /  
MŰSZAKI ÉS MENEDZSMENT TUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK 3 : 1 pp. 72-79. , 8 p.  
(2018)

Kocsi, B. ; Pusztai, L.. ; Budai, I..

Total process time prediction in complex manufacturing environment

In: Fülöp, Attila; Iványi, Péter (szerk.) Abstract book for the 14th Miklós Iványi  
International PhD & DLA Symposium : Architectural, Engineering and Informa-  
tion Sciences

László, Péter Pusztai ; Balázs, Kocsis ; István, Budai ; Lajos, Nagy

Industrial process modelling with operations research method

In: The 11th Conference of PhD Students in Computer Science : Volume of short  
papers

Szeged, Magyarország (2018) 194 p. pp. 105-108. , 4 p.

Pusztai, L ; Kocsi, B ; Budai, I ; Nagy, L

Analysis of activity times in the process of a wooden box manufacturing

INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING AND MANAGEMENT SCIENCES /  
MŰSZAKI ÉS MENEDZSMENT TUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK 3 : 4 pp. 475-484. ,  
10 p. (2018)

Pusztai, László ; Budai, István ; Nagy, Lajos

Multi period production planning under uncertainty

In: Fülöp, Attila; Iványi, Péter (szerk.) Abstract book for the 14th Miklós Iványi  
International PhD & DLA Symposium : Architectural, Engineering and Informa-  
tion Sciences



Pécs, Magyarország : Pollack Press (2018) Paper: 80

Pusztai, László Péter ; Kocsi, Balázs ; Budai, István ; Nagy, Lajos

Alapanyag áramlásának optimalizálása általánosított hálózati folyam modellel

In: Bitay, Enikő (szerk.) A XXIII. FIATAL MŰSZAKIAK TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAK  
ELŐADÁSAI. : PROCEEDINGS OF THE XXIII-RD INTERNATIONAL SCIENTIFIC  
CONFERENCE OF YOUNG ENGINEERS.

Cluj-Napoca, Románia, Kolozsvár, Románia : Óbudai Egyetem, Erdélyi Múzeum  
Egyesület (EME) (2018) 256 p. pp. 203-206. , 4 p.

Balázs, Kocsi ; László, Pusztai ; István, Budai ; Edit, Szűcs

How to build our houses in order to consume the minimum energy

In: 12th Conference on Advanced Building Skins

Sarnen, Svájc : Advanced Building Skins GmbH, (2017) pp. 399-405. , 7 p.

Oláh, Judit ; Nagy, Lajos ; Popp, József ; Füzesi, István ; Pusztai, László

A készlettervezés és az előrejelzési modellek kapcsolata

ACTA CAROLUS ROBERTUS 7 : 2 pp. 115-132. , 18 p. (2017)

Pusztai, L ; Kocsi, B ; Budai, I

Business process development with the application of simulation technique

INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING AND MANAGEMENT SCIENCES /  
MŰSZAKI ÉS MENEDZSMENT TUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK 2 : 3 pp. 109-118. ,  
10 p. (2017)

## TÁBLÁZATJEGYZÉK

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. táblázat: Kockázatlebontási struktúra (RBS), [7] .....                              | 15  |
| 2. táblázat: Diszkrét eloszlások [47] .....                                            | 29  |
| 3. táblázat: Folytonos eloszlások [47] .....                                           | 29  |
| 4. táblázat: Páros összehasonlítási mátrix, [73] .....                                 | 44  |
| 5. táblázat: Szakirodalom értékelési mátrix, [49] .....                                | 53  |
| 6. táblázat: AHP normalizált táblázat.....                                             | 55  |
| 7. táblázat: QFD-részlet .....                                                         | 56  |
| 8. táblázat: Projektszimuláció pszeudokódja .....                                      | 59  |
| 9. táblázat: Ütemezés inputjai egy gép esetén.....                                     | 64  |
| 10. táblázat: Megbízhatósági problémák.....                                            | 65  |
| 11. táblázat: Optimalizációs modell .....                                              | 66  |
| 12. táblázat: Bemenő adatok a szimulációhoz .....                                      | 67  |
| 13. táblázat: Adatbázis egy részlete (tevékenységidők, TPT, érzékenységvizsgálat)..... | 68  |
| 14. táblázat: Kritikus utak eloszlása.....                                             | 70  |
| 15. táblázat: Elterések a tényadatoktól.....                                           | 73  |
| 16. táblázat: Ütemezés inputjai több gép esetén.....                                   | 75  |
| 17. táblázat: Megbízhatósági problémák több gép esetén.....                            | 76  |
| 18. táblázat: Szimuláció leíró statisztikája.....                                      | 77  |
| 19. táblázat: Kritikus utak eloszlása több műhely esetén .....                         | 80  |
| 20. táblázat: Ütemezés készletezési költség nélkül.....                                | 84  |
| 21. táblázat: Ütemezés készletezési költséggel .....                                   | 85  |
| 22. táblázat: AHP módszertan – kritériumok súlyai.....                                 | 112 |
| 23. táblázat: AHP módszertan – kritériumok súlyai.....                                 | 113 |
| 24. táblázat: VBA programkód.....                                                      | 114 |

## 13. ÁBRAJEGYZÉK

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. ábra: Projektháromszög, [34] .....                                                                      | 13 |
| 2. ábra: Gantt-diagram, [34] .....                                                                         | 17 |
| 3. ábra: EPC diagram, [41] .....                                                                           | 19 |
| 4. ábra: Hálózati modell, [10] .....                                                                       | 20 |
| 5. ábra: Petri háló, [46] .....                                                                            | 21 |
| 6. ábra: Gyártási folyamat teljes átfutási idejének meghatározása PERT módszerrel, [11] .....              | 25 |
| 7. ábra: Általános berendezéshatékonyság lebontása, [28] .....                                             | 32 |
| 8. ábra: Páros összehasonlítási mátrix skálaértékei, [75] .....                                            | 43 |
| 9. ábra: Minőség háza, [82] .....                                                                          | 48 |
| 10. ábra: Kutatás lépései .....                                                                            | 49 |
| 11. ábra: További szakirodalmi elemzés a négy legfontosabb és a legkevésbé fontos indikátorra, [100] ..... | 54 |
| 12. ábra: Keretrendszer projektgyártás ütemezésére .....                                                   | 61 |
| 13. ábra: Gyártási folyamat leírása AOA hálózatban .....                                                   | 63 |
| 14. ábra: Projekt átfutási idők szimulációja .....                                                         | 68 |
| 15. ábra: Aggregált teljes átfutási idők .....                                                             | 69 |
| 16. ábra: Gyártási folyamat elemzése kibocsátás tekintetében .....                                         | 70 |
| 17. ábra: Gyártási folyamat leírása AOA hálózatban .....                                                   | 71 |
| 18. ábra: Módszerek összevetése eredeti adatok mellett .....                                               | 72 |
| 19. ábra: Gyártási folyamat elemzése kibocsátás tekintetében .....                                         | 74 |
| 20. ábra: Aggregált átfutási idők több műhely esetén .....                                                 | 78 |
| 21. ábra: Átfutási idők leíró statisztikája több műhely esetén .....                                       | 78 |
| 22. ábra: Ütemidőtől való eltérés .....                                                                    | 79 |
| 23. ábra: Lineáris programozási modell műhelyek ütemezésére .....                                          | 83 |

## 14. FÜGGELÉK

22. táblázat: AHP módszertan – kritériumok súlyai

| Kritériumok                    | Idő alapú | Mérhető | Dominó-hatás | Gyakoriság | Kritikus út változása | Ütemezési eljárás integrációja | Számítási kapacitás |
|--------------------------------|-----------|---------|--------------|------------|-----------------------|--------------------------------|---------------------|
| Idő alapú                      | 1         | 1       | 5            | 9          | 2                     | 1                              | 3                   |
| Mérhető                        | 1         | 1       | 5            | 2          | 1                     | 1                              | 3                   |
| Dominó-hatás                   | 1/5       | 1/5     | 1            | 1          | 1/7                   | 1/5                            | 1                   |
| Gyakoriság                     | 1/9       | 1/2     | 1            | 1          | 1                     | 1/5                            | 2                   |
| Kritikus út változása          | 1/2       | 1       | 7            | 1          | 1                     | 1/2                            | 5                   |
| Ütemezési eljárás integrációja | 1         | 1       | 5            | 5          | 2                     | 1                              | 2                   |
| Számítási kapacitás            | 1/3       | 1/3     | 1            | 1/2        | 1/5                   | 1/2                            | 1                   |

23. táblázat: AHP módszertan – kritériumok súlyai

| Kritériumok                           | Átlagos súly (A) | Mátrixok szorzata (B) | Konzisztencia mértéke (B/A) | Konzisztencia index |
|---------------------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------|
| <b>Idő alapú</b>                      | 0,254            | 2,052                 | 8,081                       | 0,180               |
| <b>Mérhető</b>                        | 0,183            | 1,365                 | 7,449                       | 0,075               |
| <b>Dominó-hatás</b>                   | 0,043            | 0,331                 | 7,647                       | 0,108               |
| <b>Gyakoriság</b>                     | 0,074            | 0,569                 | 7,702                       | 0,117               |
| <b>Kritikus út változása</b>          | 0,171            | 1,260                 | 7,384                       | 0,064               |
| <b>Ütemezési eljárás integrációja</b> | 0,216            | 1,698                 | 7,852                       | 0,142               |
| <b>Számítási kapacitás</b>            | 0,059            | 0,427                 | 7,255                       | 0,043               |
| CI:                                   |                  |                       |                             | 0,104               |
| CR:                                   |                  |                       |                             | 0,077               |

## 24. táblázat: VBA programkód

---

```

Sub Simulation()
' Stochastic Network Model

' xlCalculation
    Application.Calculation = xlCalculationManual

Dim i As Integer
Dim j As Integer

Dim SetShifts As Integer
Dim SetMinutes As Integer
Dim CumTPT As Integer

Dim Days As Variant
Dim Shifts As Variant

Dim RoundedDays As Integer
Dim RoundedShifts As Integer

Dim Problem1 As Integer
Dim Problem2 As Integer
Dim ProblemArray(6) As Variant

' Days and shifts, calculate accumulated TPT from
    SetShifts = Range("D25").Value
    SetMinutes = Range("D26").Value
    CumTPT = 0

    Problem1 = Range("E28").Value
    Problem2 = Range("E29").Value

' For loop
For i = 1 To Range("D30").Value

    Sheets("Model").Activate

    Range("E16:E23").Select
    Selection.Copy
    Range("J2").Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _

```

---

---

:=False, Transpose:=False

' Problems

For j = 1 To Range("E28").Value

    If i Mod Range("O" & j + 1) = 0 Then

        Range("J" & j + 1).Value = Range("J" & j + 1) + Range("P" & j + 1).Value

        ProblemArray(j) = 1

    Else

        ProblemArray(j) = 0

    End If

Next j

solver.solve userfinish:=True

SolverFinish KeepFinal:=1, ReportArray:=Array(2)

CumTPT = CumTPT + Range("H10").Value

Days = CumTPT / (SetShifts \* SetMinutes)

RoundedDays = Application.WorksheetFunction.RoundDown(Days, 0) + 1

Shifts = CumTPT / SetMinutes

RoundedShifts = Application.WorksheetFunction.RoundDown(Shifts, 0) + 1

Range("R" & i + 1).Value = i

Range("J2:J9").Select

Selection.Copy

Range("S" & i + 1).Select

Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks \_

    :=False, Transpose:=True

Range("H10").Select

Selection.Copy

Range("AA" & i + 1).Select

Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks \_

    :=False, Transpose:=True

Sheets("Sensitivity Report 2").Activate

Set sourceKrit = Sheets("Sensitivity Report 2").Range(Cells(19, 5), Cells(26, 5))

Set targetKrit = Sheets("Model").Range("AB" & 1 + i)

---

---

```

sourceKrit.Copy
targetKrit.PasteSpecial    Paste:=xlPasteValues,    Operation:=xlNone,    SkipBlanks:=False,
Transpose:=True
Application.DisplayAlerts = False

Sheets("Sensitivity Report 2").Activate
Set sourceKrit = Sheets("Sensitivity Report 2").Range(Cells(19, 7), Cells(26, 7))
Set targetKrit = Sheets("Model").Range("BG" & 1 + i)
sourceKrit.Copy
targetKrit.PasteSpecial    Paste:=xlPasteValues,    Operation:=xlNone,    SkipBlanks:=False,
Transpose:=True
Application.DisplayAlerts = False

Sheets("Sensitivity Report 2").Select
ActiveWindow.SelectedSheets.Delete

Range("AJ" & i + 1).Value = CumTPT
Range("AK" & i + 1).Value = RoundedDays
Range("AL" & i + 1).Value = RoundedShifts

Range("B11:G11").Select
Selection.Copy
Range("BA" & i + 1).Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False

Calculate

Next i

' Workbook Save
ActiveWorkbook.Save

End Sub

```

---





Nyilvántartási szám: DEENK/494/2022.PL  
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Pusztai László Péter  
Doktori Iskola: Informatikai Tudományok Doktori Iskola  
MTMT azonosító: 10056956

### A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

#### Idegén nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (1)

1. **Pusztai, L. P.**, Kocsi, B., Budai, I., Nagy, L.: Investigation of a production process under uncertainty.  
*Pollack Period.* 15 (2), 49-59, 2020. ISSN: 1788-1994.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1556/606.2020.15.2.5>

#### Idegén nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (2)

2. **Pusztai, L. P.**, Nagy, L., Budai, I.: A risk management framework for industry 4.0 environment.  
*Sustainability. "Accepted by publisher"*, 1-17, 2022. ISSN: 2071-1050.  
IF: 3.889 (2021)
3. **Pusztai, L. P.**, Nagy, L., Budai, I.: Selection of Production Reliability Indicators for Project Simulation Model.  
*Appl. Sci.-Basel.* 12 (10), 1-15, 2022. ISSN: 2076-3417.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app12105012>  
IF: 2.838 (2021)

#### Idegén nyelvű konferencia közlemények (1)

4. **Pusztai, L. P.**, Kocsi, B., Budai, I., Nagy, L.: Industrial process modelling with operations research method.  
In: The 11th Conference of PhD Students in Computer Science : volume of short papers : CS2, University of Szeged, Institute of Informatics, Szeged, 106-109, 2018.





**További közlemények**

Idegen nyelvű, hazai könyvrészletek (1)

5. Matonya, M. M., Kocsi, B., **Pusztai, L. P.**, Budai, I.: Production Planning, Scheduling and Risk Analysis in Manufacturing Operations by Robotic Process Automation.  
In: Proceedings of the 11th International Conference on Applied Informatics (ICAI 2020) : Eger, Hungary, January 29-31, 2020. Eds.: Gergely Kovásznai, István Fazekas, Tibor Tórnács, [CEUR Workshop Proceedings], Eger, 232-241, 2020, (CEUR Workshop Proceedings, ISSN 1613-0073 ; 2650.)

Magyar nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (4)

6. Törő, L., **Pusztai, L. P.**: Előrejelzési módszerek elemzése és összehasonlítása egy kisvállalat számára.  
*Int. J. Eng. Manag. Sci.* 5 (1), 14-21, 2020. EISSN: 2498-700X.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2020.1.2>
7. Csipkés, M., **Pusztai, L. P.**, Nagy, L.: Energiamenedzsment térhódítása Magyarországon = The importance of energy management in Hungary.  
*Int. J. Eng. Manag. Sci.* 3 (1), 72-79, 2018. EISSN: 2498-700X.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2018.1.9>
8. Oláh, J., Nagy, L., Popp, J., Füzesi, I., **Pusztai, L. P.**: A készlettervezés és az előrejelzési modellek kapcsolata.  
*Acta Carolus Robertus.* 7 (2), 115-132, 2017. ISSN: 2062-8269.
9. **Pusztai, L. P.**, Kocsi, B.: Talajlazító mezőgazdasági vontatmány összeszerelési folyamatának fejlesztése = Product assembly process improvement of agricultural cultivator trailers.  
*IJEMS.* 2 (1), 59-62, 2017. EISSN: 2498-700X.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2017.1.11>

Idegen nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (4)

10. **Pusztai, L. P.**, Kocsi, B., Budai, I.: Making engineering projects more thoughtful with the use of fuzzy value-based project planning.  
*Pollack Period.* 14 (1), 25-34, 2019. ISSN: 1788-1994.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1556/606.2019.14.1.3>
11. **Pusztai, L. P.**, Kocsi, B., Budai, I., Nagy, L.: Analysis of activity times in the process of a wooden box manufacturing.  
*Int. J. Eng. Manag. Sci.* 3 (4), 475-484, 2018. EISSN: 2498-700X.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2018.4.39>





12. Nagy, L., **Pusztai, L. P.**, Csipkés, M.: Application of the multiple objective programming in the optimization of production structure of an agricultural holding.  
*J. Agricult. Inf.* 9 (2), 54-65, 2018. ISSN: 2061-862X.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.17700/jai.2018.9.2.441>

13. **Pusztai, L. P.**, Kocsi, B., Budai, I.: Business process development with the application of simulation technique.  
*IJEMS.* 2 (3), 109-118, 2017. EISSN: 2498-700X.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2017.3.11>.

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (1)

14. Kocsi, B., Matonya, M. M., **Pusztai, L. P.**, Budai, I.: Real-Time Decision-Support System for High-Mix Low-Volume Production Scheduling in Industry 4.0.  
*Processes.* 8 (8), 1-26, 2020. EISSN: 2227-9717.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/pr8080912>  
IF: 2.847

Egyéb folyóiratközlemények (2)

15. **Pusztai, L. P.**, Kocsi, B., Budai, I., Nagy, L.: Material Flow Optimization with The Application of Generalized Network Flow Model. Utánközlés nyelvi változat,  
*Műsz. tud. közl. = PTS.* 9 (1), 203-206, 2018. ISSN: 2601-5773.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.33894/mtk-2018.09.46>
16. **Pusztai, L. P.**, Kocsi, B.: Esettanulmány üzleti folyamatfejlesztésre - ipari folyamat racionalizálása = Business process improvement - a case study - rationalisation of industry process. Utánközlés másodközlés,  
*Műsz. tud. közl. = PTS.* 7, 343-347, 2017. ISSN: 2601-5773.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.33895/mtk-2017.07.78>

Magyar nyelvű konferencia közlemények (2)

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





Idegen nyelvű konferencia közlemények (2)

19. Kocsi, B., **Pusztai, L. P.**, Budai, I.: New approach for resource allocation in digital healthcare 4.0.  
In: 5th CARPE Conference : Horizon Europe and beyond. Eds.: Javier Orozco Messana, Juan Miguel Martínez Rubio, Editorial Universitat Politècnica de Valencia - UPV, Valencia, 244-251, 2019. ISBN: 9788490487891
20. Kocsi, B., **Pusztai, L. P.**, Budai, I., Szűcs, E.: How to build our houses in order to consume the minimum energy.  
In: 12th Conference on Advanced Building Skins, Advanced Building Skins GmbH, Sarnen, 399-405, 2017. ISBN: 9783952488317

Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (3)

21. Kovács, I., **Pusztai, L. P.**: Exploratory research on motivation of foreign engineer students of the University of Debrecen.  
In: Abstract book for the 14th Miklós Iványi International PhD & DLA Symposium : Architectural, Engineering and Information Sciences. Eds.: Attila Fülöp, Péter Iványi, Pollack Press, Pécs, aer 53, 2018. ISBN: 9789634292845
22. **Pusztai, L. P.**, Budai, I., Nagy, L.: Multi period production planning under uncertainty.  
In: Abstract book for the 14th Miklós Iványi International PhD & DLA Symposium : Architectural, Engineering and Information Sciences. Eds.: Attila Fülöp, Péter Iványi, Pollack Press, Pécs, aer 80, 2018. ISBN: 9789634292845
23. Kocsi, B., **Pusztai, L. P.**, Budai, I.: Total process time prediction in complex manufacturing environment.  
In: Abstract book for the 14th Miklós Iványi International PhD & DLA Symposium : Architectural, Engineering and Information Sciences. Eds.: Attila Fülöp, Péter Iványi, Pollack Press, Pécs, , 2018. ISBN: 9789634292845

**A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 9,574**

**A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre): 6,727**

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

Debrecen, 2022.12.09.



## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretném megköszönni konzulensem, Dr. Budai István áldozatos munkáját, aki megteremtette a kutatásom elvégzéséhez szükséges forrásokat, óriási segítséget nyújtott a kutatómunkához, a cikkeim valamint a disszertációm megírásához.

Hálával tartozok feleségemnek, családomnak, valamint barátaimnak, akik biztatásukkal valamint türelmükkel hozzájárultak a dolgozatom elkészüléséhez. Köszönettel tartozom Dr. Nagy Lajos és Dr. Kocsi Balázsnak, akik szakmai iránymutatásukkal támogatták a munkámat, új perspektívákat mutattak nekem a választott tudományos témában, amelyre alapozni tudtam a kutatásomat.