

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



RUGALMAS GYÁRTÓRENDSZEREK TERVEZÉSI
MÓDSZEREINEK TOVÁBBFEJLESZTÉSE IPAR 4.0
ESZKÖZÖK ALKALMAZÁSÁVAL

PH.D. ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Készítette

Molnár Zsolt

okleveles gépészmérnök, mérnök-tanár (MSc)

HATVANY JÓZSEF INFORMATIKAI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
ANYAGÁRAMLÁSI RENDSZEREK ÉS LOGISZTIKAI INFORMATIKA
TÉMATERÜLET
LOGISZTIKAI INTÉZET

Doktori iskola vezető

Prof. Dr. habil. Kovács László
egyetemi tanár

Tématerület vezető

Prof. Dr. habil. Illés Béla
professor emeritus

Témavezető

Prof. Dr. habil. Tamás Péter
intézetigazgató, egyetemi tanár

Társ témavezető

Prof. Dr. habil. Illés Béla
professor emeritus

Miskolc
2025

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés és motiváció	3
2	Irodalmi áttekintés	5
3	Kutatási eredmények.....	9
3.1	Rugalmas gyártórendszerek tervezési eljárása	9
3.2	Életciklus és kapacitás elemzése	12
3.2.1	Rugalmas gyártórendszerek üzleti és életciklus vizsgálata	12
3.2.2	Kapacitásszükséglet meghatározása életciklus alapján	14
3.3	Logisztikai méretezés	17
3.3.1	Puffer méretezése	17
3.3.2	AGV méretezés	20
3.4	Vezérlő rendszerek tervezése	23
3.4.1	Döntési táblák.....	23
3.4.2	Neurális hálók használata a vezérlésben	24
3.4.3	Döntési táblák és neurális hálók kapcsolata	26
4	Új tudományos eredmények.....	29
5	New scientific results	30
6	Összefoglalás, további kutatási lehetőségek	31
7	Summary and further research directions	32
8	Irodalomjegyzék	33
9	Saját irodalomjegyzék.....	39

1 Bevezetés és motiváció

Szakmai munkám során konzultánsként dolgozom digitális gyártáshoz kapcsolódó szoftvermegoldások (főleg Siemens megoldások) támogatásában, bevezetésében. Ennek köszönhetően számos ipari céggel volt alkalmam az elmúlt évtizedek során együtt dolgozni. A gyártás rugalmassága iránti törekvés mindig jelen volt a vállalatok életében, de stratégiai célként az elmúlt pár évben jelent meg a legtöbb cég esetében. Ennek fő oka a vevők növekvő igénye a rugalmas kiszolgálásra és egyre inkább az egyedi termékekre. A rugalmasság iránti igényt tovább fokozza a gyártó cégek közötti verseny növekedése. A költségek csökkentése, a jobb erőforrás-kihasználás kulcsfontosságúvá vált a vállalatok számára. Ezt a folyamatot az elmúlt évek gazdasági válsághelyzetei (pandémia, autóiipari válság, globális konfliktusok) tovább gyorsították. Mindezek pedig együtt, a rugalmas gyártás iránti érdeklődés növekedésével jártak. Természetesen rugalmas gyártás nem képzelhető el a kapcsolódó logisztika rugalmassága nélkül.

A gyártósorok és elrendezések tervezése jelentős üzleti probléma a vállalatok számára, mivel magába foglalja a készletek, az átfutási idő és a helyhasználat csökkentését, az üzem alkalmazkodóképességét a jövőbeni változásokhoz, valamint egészséges, kényelmes és biztonságos környezet biztosítását a munkavállalók számára. A termelő és logisztikai terület megfelelő kihasználása minden gyár számára fontos működési tényező, mivel az anyagáramlás és az értéklánc meghatározásával az elrendezés közvetlen hatással van a szervezetre és a vállalat profitabilitására.

A munkám kapcsán gyakran szembesülök azzal, hogy a gyártó cégeknél milyen gyakran hiányzik a gyártórendszerek, és ezen belül kiemelten a komplexebb, rugalmas gyártórendszerek tervezéséhez kapcsolódó tudás és tapasztalat.

Néhány évvel ezelőtt sikerült megismernem a Richard Muther által kifejlesztett SLP (Systematic Layout Planning - Szisztematikus elrendezés-tervezés) módszert, amely gyártóhelyek tervezésére nyújt eljárást.

A módszer érdekes magyar vonatkozása, hogy amikor a kutatás részeként felvettem a kapcsolatot az SLP módszert jelenleg gondozó Richard Muther & Associates szervezettel, kiderült, hogy Magyarországról én voltam az első érdeklődő. Megosztottak velem egy kalandos történetet, ami az SLP módszerhez kapcsolódik és magyar vonatkozása is van. Egy magyar mérnök, Nick Racz 1956-ban egy kisméretű bőrönddel menekült először Ausztriába, majd egy évvel később Chicagoba. A bőröndben pár személyes tárgy mellett egy könyvtári példány volt Muther Systematic Layout Planning könyvéből. Chicagóban az első állásinterjún szóba került, hogy ismeri a módszert, és különös egybeesés révén az interjúztatója Mr. Al Booth, Muther egyetemi szobatársa volt. Mr. Racz így kapta meg az első állását az Egyesült Államokban. Később találkozott Mr. Mutherrel, akinek odaajándékozta az eredeti könyvet, ami azóta is a Richard Muther & Associates kicsi múzeumában található.

A módszernek két fő előnye van a gyakorlati alkalmazhatóság szempontjából. Az első, ami a nevében is szerepel, hogy egy olyan szisztematikus módszert ad, amely jól definiált lépéseken vezeti végig a tervezőt. A második, hogy a módszer technikai megvalósítása főleg táblázatos adatokra támaszkodik, így digitális eszközökkel jól feldolgozható.

A fentiek alapján a kutatási célokat úgy definiáltam, hogy egy olyan tervezési eljárást fogok kidolgozni, amely támaszkodik gyakorlatias szemléletében az SLP módszerre, de megoldást nyújt a komplex, rugalmas gyártórendszerek tervezésére, úgy, hogy mindeközben támogatja a modern Ipar 4.0 technológiákat, eszközöket. Az értekezés felépítése is a fenti célt tükrözi.

A második fejezet egy olyan irodalmi áttekintés, amely bemutatja a rugalmas gyártórendszerek tervezésével kapcsolatos nemzetközi kutatásokat és a kutatási téma aktualitását. A harmadik fejezet azokat az alapismereteket és irodalmat foglalja össze, amelyre a kapcsolódó kutatás támaszkodik. Ezek az SLP módszer, a termék életciklussal kapcsolatos alapismeretek, a döntési táblák, a digitális iker és a neurális hálók kapcsolata a digitális ikerhez.

A negyedik fejezet tartalmazza a kutatási munkát, amelyben kidolgoztam a rugalmas gyártórendszerek tervezési eljárását. Először a saját kutatási, és ipari tapasztalataim alapján áttekintem a rugalmas gyártórendszerek tervezési problémáit és azokat a feladatokat, amelyeket a tervezés során meg kell oldani. Utána részletesen bemutatom a kidolgozott eljárást, a fontosabb eredményeket tézisek formájában kiemelve. A kutatás során vizsgáltam a rugalmas gyártórendszerek életciklusát, az életciklus matematikai leírása alapján a kapacitásának meghatározásának módját. A kutatás része volt a kritikus gép és logisztikai berendezések méretezése és az ahhoz kapcsolódó eljárás kidolgozása. A komponensek méretezése után, eljárást dolgoztam ki a vezérlési logika leképzésére és vizsgáltam a neurális háló alapú vezérlési logikák integrációjának lehetőségét. Az elért tudományos eredményeket négy tézisben foglaltam össze.

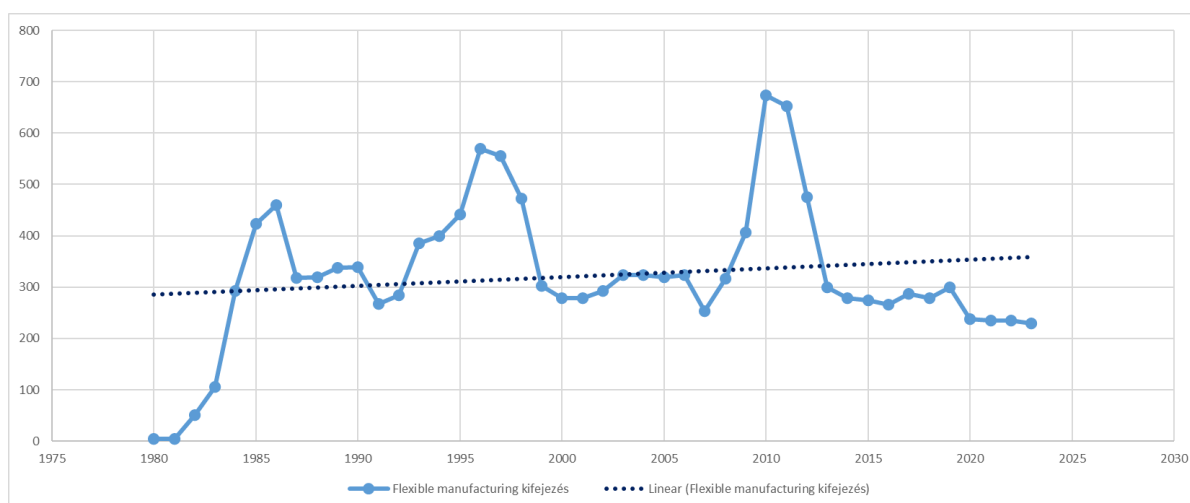
A mellékletben öt ipari példán keresztül bemutatom a módszer használatát.

A kutatás során többféle módszerrel dolgoztam. Terepkutatásnak tekinthető az a több, mint 20 éves tapasztalat és gyakorlat, amit a gyártó cégekkel történő együttműködés során szereztem. Számos esetben analitikai módszereket vezettem be a kutatás lépései során, illetve az eredmények és a kutatás kiterjesztése során numerikus szimulációkat végeztem. A különböző kutatási módszerek jól kiegészítették egymást.

2 Irodalmi áttekintés

Az irodalomkutatás során, a kutatás alapjául szolgáló területeket és azok szakirodalmát tekintettem át. A szakirodalmi kutatás során elsődleges forrásként a Scopus adatbázisra támaszkodtam. A kutatás éve alatt többször áttekintettem a rendelkezésre álló szakirodalmi forrásokat, a jelen összefoglalásban a 2023. december végi adatok találhatók. A keresések során a kulcsszavak között kerestem.

A „flexible manufacturing” kifejezés az 1950-es években jelent meg először, amikor Jerome Hall először készített olyan gyártórendszert, amelyet számítógép jellegű chippek vezéreltek. Magát a leírást Theo Williamson készítette el, és fejlesztette tovább a rendszert, ezzel egyidőben 1965-ben.



1. ábra Találatok éves bontásban a "Flexible manufacturing" kifejezésre a Scopus adatbázisban

Jól látható a grafikonon, hogy a rugalmas gyártórendszerek kutatása az 1980-as évek óta folyamatosan kutatott, releváns terület. A téma folyamatos aktualitását az a változás biztosítja, hogy a világ gyártása az elmúlt fél évszázadban fokozatosan a kevés, de nagy mennyiségben gyártott termékek helyett, mára már a nagy variációban és kisebb mennyiségben gyártott termékek irányába mozdult el. A grafikonra egy lineáris trendvonalat illesztve látható, hogy a trendvonal szerint is lassú, de folyamatos növekedés látható a releváns publikációk esetében. Szintén globális trend, amely a rugalmas gyártórendszerek szükségességét erősíti, hogy a termékek életciklusa - tehát az a periódus, ami a termék fejlesztésétől a piacról történő kivonásig tart - jelentősen lecsökkent. Az új technológiák megjelenése és a gazdasági válságok minden esetben a kutatások aktívabbá válását okozták. Ez figyelhető meg az 1980-as években, amikor a számítástechnika előretörésével a rugalmas gyártórendszerek megvalósítása jelentősen egyszerűbbé vált. Az 1990-es évek kutatási felfutása mögött, valószínűleg a piac jelentősebb globalizációja, a növekvő versenyhelyzet és az automatizálás fejlődése áll. Hasonló növekedés látható a kutatásokhoz kapcsolódó publikációk számában a 2010-es években, ami a vevői igények rugalmasságának növekedésével és az egyre fejlettebb és egyre inkább összekapcsolt informatikai-automatizálási környezet megjelenésével magyarázható. Véleményem szerint, a mesterséges

intelligencia és az automatizálás egyre növekvő mértéke, és az automatizálásban az új eszközök elterjedése (pl. AGV-k, drónok) miatt, a következő években ismét kiemelt kutatási területté válnak a rugalmas gyártórendszerek.

Kutatásom célja az volt, hogy egy könnyen áttekinthető és gyorsan alkalmazható módszert dolgozzak ki a rugalmas gyártórendszerek tervezésére. Mivel már léteznek gyártósori elrendezés módszerek, ezért a megközelítem az volt, hogy egy már létező módszer alapjait szeretném felhasználni.

Így az irodalomkutatás következő részében áttekintettem a leginkább ismert elrendezés-tervezési procedurális módszereket. A vizsgálatba azok a módszerek kerültek bele, amelyek megfeleltek az alábbi kritériumoknak:

- annyira részletesen dokumentált, hogy a lépései reprodukálhatók
- gyakorlatias, mérnökök számára készült
- megoldást nyújt a teljes elrendezés-tervezési folyamatra

Ezen kritériumok alapján az alábbi elrendezés-tervezési módszereket tekintettem át részletesen:

- Immer alap lépések módszere (Immer's Basic Steps) (1950)
- Nadler ideális rendszere (Nadler's Ideal System Approach) (1961)
- Reed gyár elrendezés módszere (Reed's Plant Layout Procedure) (1961)
- Muther szisztematikus elrendezés tervezés módszere (Muther's Systematic Layout Planning) (1961)
- Apple gyár elrendezés eljárása (Apple's Plant Layout Procedure) (1977)

Prasad és Srivastava cikkében [7] összehasonlította a fenti eljárásokat. A cikk 7 szempont alapján végezte az összehasonlítást, és az eredmény azt tükrözi, hogy az adott módszer mennyire teljeskörűen fedeti le egy elrendezés-tervezési projekt feladatait.

A hét szempont a következő volt:

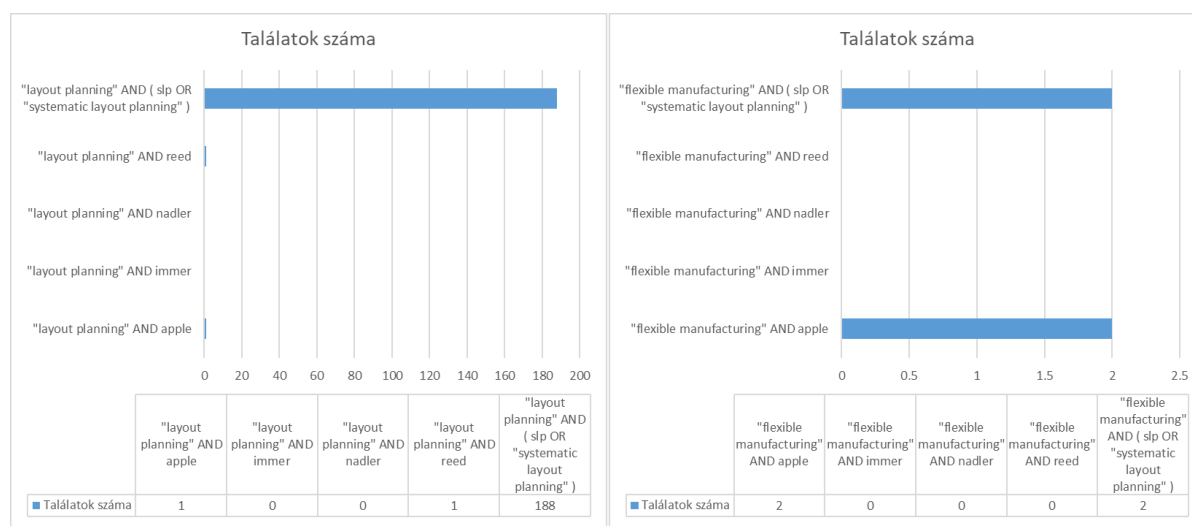
1. Szükséges bemeneti adatok
2. Grafikonok használata
3. Gráfok és diagramok használata
4. További fejlesztések figyelembevétele
5. Kényszerek figyelembevétele
6. Folyamat alkalmazhatósága
7. Anyagkezelési szempontok figyelembevétele

Ezek alapján az alábbi sorrend jött létre arra vonatkozóan, hogy mennyire átfogó megoldást nyújt az elrendezés tervezésre az adott módszer:

1. Muther szisztematikus elrendezés-tervezés módszere
2. Apple gyár elrendezés eljárása
3. Reed gyár elrendezés módszere
4. Nadler ideális rendszere
5. Immer alap lépések módszere

Az összehasonlításban a Muther módszer magasan a legjobb eredményt érte el. Két kiértékelési szempont esetében kapott gyenge pontszámot kapott, ezek a további fejlesztések és az anyagkezelési szempontok figyelembevétele.

Az irodalom feldolgozása során ezeken túlmenően vizsgáltam, hogy a korábban leírt elrendezés-tervezési módszertanokat mennyire használták kutatás céljára, melyek azok, amelyeket kutatók kibővítettek vagy továbbfejlesztettek (2. ábra).



2. ábra Elrendezés-tervezési módszerek és a kapcsolódó kutatási dokumentumok száma

Vizsgálatom alapján más kutatók is leginkább a Muther-féle szisztematikus elrendezés-tervezési módszerre építve végeztek kutatásokat. Annak érdekében, hogy meggyőződjek arról, hogy az enyémhez hasonló kutatást nem végeztek még a találati listában szereplő cikkeket áttekintettem, összefoglalásuk az alábbiakban található. A Scopus adatbázis az SLP OR „systematic layout planning” keresésre 188 darab dokumentumot adott vissza. Ezeket átnézve 43 tételt zártam ki. A kizárások oka az volt, hogy az adott cikk nem gyártással kapcsolatban foglalkozott az SLP módszerrel, hanem például építőipar, oktatás vagy egészségügy területén. A megmaradt 145 dokumentumot részletesen áttekintettem a téma, az alkalmazási terület és különös tekintettel a rugalmas gyártórendszerekkel való kapcsolat alapján.

Ezeknek a kutatásoknak közös jellemzőjük, hogy az eredeti SLP módszert változatlanul hagyták, annak egyes fázisait korszerűbb számítási eszközökkel támogatták.

Az irodalom áttekintési folyamatot PRISMA folyamatábrában [2] foglaltam össze (3. ábra).



3. ábra A szakirodalom kiválasztási folyamatábrája a PRISMA modell alapján

Mivel a kutatás során erősen támaszkodtam a Systematic Layout Planning (SLP) módszerre, ezért ezzel kapcsolatban is megvizsgáltam a releváns irodalmat. Itt a keresési kifejezés az SLP OR „systematic layout planning” kifejezés volt. Mivel több tudományág is használja az SLP betűszót különböző fogalmak rövidítéseként, ezért a találati listát leszűrtem az „Engineering” területre. Mivel még a mérnöki területen is különböző fogalmakra használják az SLP rövidítést (pl. stable link prediction), ezért a további szűrést már manuálisan kellett elvégezni főleg a cím és az absztrakt alapján.

Mivel a fenti két szakirodalmi terület vizsgálata során a kettő között átfedést nem találtam, ezért közvetlen kereséssel ezt is megvizsgáltam. A „flexible manufacturing” AND „SLP” illetve a „flexible manufacturing” AND „systematic layout planning” kifejezésekre a Scopus adatbázisban mindössze 2 darab publikáció található.

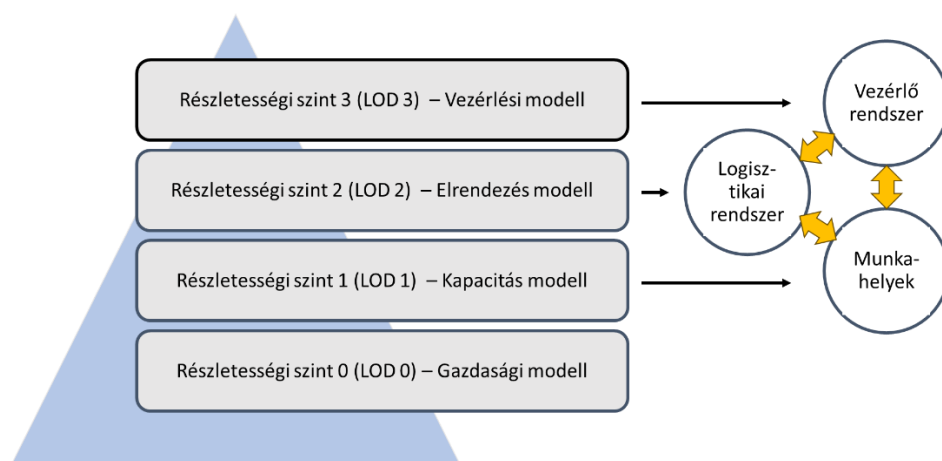
A fenti irodalom áttekintésből is látható, hogy a kutatási területem releváns, s emellett megállapítható, hogy az általam választott kutatási irány jelenleg nincs lefedve kutatásokkal és azokból származó eredményekkel.

3 Kutatási eredmények

Ebben a fejezetben bemutatom a rugalmas gyártórendszerek tervezésére kidolgozott eljárásom felépítését, lépéseit és az egyes lépésekben a tervezés során végrehajtandó feladatokat, tevékenységeket, illetve részletesebben bemutatom azokat az eljárásokat, amelyeket tézisként fogalmaztam meg. A kidolgozott eljárás általánosan használható a rugalmas gyártórendszerek tervezésére. Az eljárás diszkrét gyártásra vonatkozik, és feltételezi, hogy a gyártósor helye már adott, ismert a rendelkezésre álló terület.

3.1 Rugalmas gyártórendszerek tervezési eljárása

Mivel a rugalmas gyártórendszerek drágák, az életciklusuk hosszú, ezért a tervezésük során sokkal körültekintőbben kell eljárni. A tervezési hibák hatása sokkal költségesebb és hosszabb időn keresztül érezhető a sor teljesítményében, működésében. Ennek érdekében a kidolgozott tervezési folyamatot szintekre bontottam, ahol jól definiált ellenőrzési pontokkal lehet továbblépni a tervezés következő fázisára. A tervezési folyamatot négy szintre bontottam fel (4. ábra).



4. ábra A kidolgozott tervezési eljárás szintjei és kapcsolódásai a fő komponensekhez

A szintek rövidítésére a LOD (level of detail – részletességi szint) kifejezést használtam, mert az nagyon jól tükrözi, hogy az egyes szinteken előre haladva egyre több információ áll rendelkezésre a tervezéshez és ezzel egy időben egyre több részlet is elkészül a gyártórendszer tervéből.

A tervezési folyamatban 4 szintet különítettem el, mindegyik végén egy döntési ponttal, amelynek jóváhagyása esetén a következő szintre lehet továbblépni, viszont elvetése esetén vissza kell lépni egy tervezési szintet. Komolyabb problémák esetén elképzelhető, hogy nem elég egy szintet visszalépni a probléma megoldásához. Olyankor szintenként érdemes visszalépni és megvizsgálni, hogy az adott szinten megoldható-e a későbbi probléma?

Az egyes tervezési szintekhez a megfelelő digitális iker eszközt érdemes kiválasztani. A kidolgozott eljárás egyes lépései statikus számítással is elvégezhetőek, de a tervezés előrehaladtával a komplexitás növekedésével érdemes egy átfogó digitális iker modellt felépíteni a teljeskörű tervezéshez és

elemzéshez. Érdemes ezért olyan eszközt választani, amely mind a négy tervezési szintet egy környezetben belül tudja támogatni. A legtöbb modern diszkrét esemény vezérelt szimulációs szoftvermegoldás ilyen.

Szintek	Eredmény, kimenet	Digitális iker modell jellege
LOD 0 – Részletesség 0 – Gazdasági modell	Döntés, hogy érdemes-e megcsinálni a gyártósort vagy módosítani a meglévőt?	Statikus pénzügyi kalkulációs modell.
LOD 1 – Részletesség 1 – Kapacitás modell	Döntés, hogy teljesíthető a projekttel a kívánt kapacitás, technológiailag megoldható a feladat?	Matematikai modell a termék életciklus görbék elemzésével
LOD2 – Részletesség 2 – Elrendezés modell	Döntés a rugalmas gyártósor elrendezéséről. Ez alapján lehet a részletes tervezést és a hozzá kapcsolódó vezérlést elkészíteni.	Szimulációs elrendezési modell, amely a fizikai helyigényt is figyelembe tudja venni.
LOD3 – Részletesség 3 – Vezérlési modell	Döntés, hogy a megtervezett gyártósor működése megfelelő? Ez alapján a modell alapján lehet a gyártósor valós működését tervezni.	Dinamikus modell, amely a gyártósor teljes valós viselkedését képes szimulálni.

1. táblázat A tervezési eljárás szintjei és kimenetei

A kidolgozott eljárás minden tervezési szintjéhez több tevékenység is kapcsolódik, ezeket a 5. ábra foglalja össze. Az ábrában szereplő tevékenységek a jellemző tevékenységek a rugalmas gyártórendszerek esetében, de a konkrét gyártósor tervezési projekteknél elképzelhető, hogy

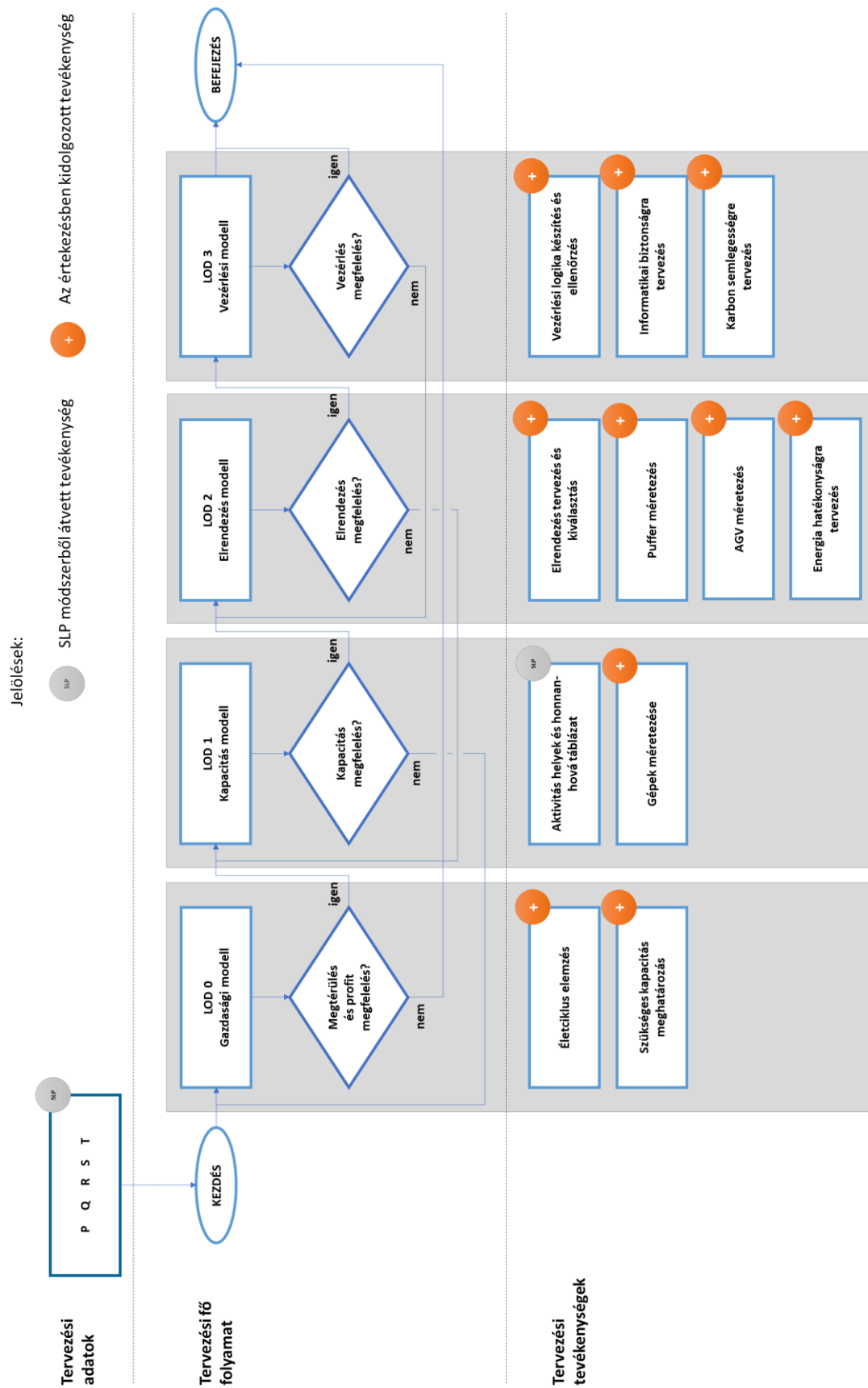
- egy tevékenység másik szinten történik meg,
- egy tevékenység több szinten is megtörténik vagy több szinten szétosztva történik, ahogy több tervezési adat áll rendelkezésre,
- további tevékenység is szükséges a gyártósor valamilyen speciális jellege miatt.

Az ábrán feltüntetett tevékenységek mindegyike szükséges azonban egy modern rugalmas gyártórendszer átfogó tervezéséhez.

Az elrendezés-tervezéshez természetesen minden esetben számos egyéb tevékenység is kapcsolódik (pénzügyek kezelése, menedzsment feladatok, beszállítói kapcsolatok stb.) azonban a kutatás és az értekezés során az elrendezés-tervezés mérnöki részével foglalkoztam.

A 5. ábrán emellett feltüntettem, hogy melyik alfejezet foglalkozik az adott területtel részletesebben. Szintén jelöltem, hogy mely tevékenység az, amelyet az SLP módszerből átvettem  és mely tevékenység az, amelyet a kutatás során én dolgoztam ki .

I. Tézis: A szisztematikus elrendezés-tervezés-módszer jelentős továbbfejlesztésével kidolgoztam egy olyan tervezési eljárást, amely lefedi a rugalmas gyártórendszer teljes tervezési folyamatát [S3] [S5] [S7]



5. ábra A kidolgozott tervezési eljárás felépítése

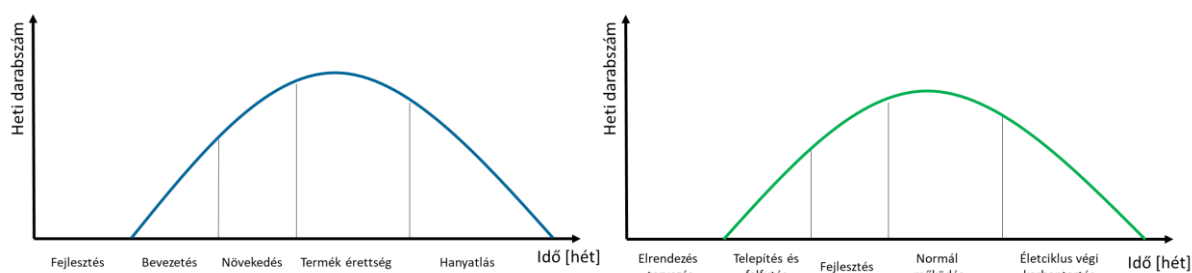
3.2 Életciklus és kapacitás elemzése

Egy vállalat számára az, hogy rugalmas gyártórendszert tervez vagy terveztet egy gyártási feladatra mindenekelőtt pénzügyi döntés. A gyártósornak profitot kell termelnie, tehát úgy kell azt megtervezni, hogy az életciklusa során biztosítsa a kívánt profitelvárást.

3.2.1 Rugalmas gyártórendszerek üzleti és életciklus vizsgálata

Saját ipari tapasztalatom alapján a rugalmas gyártórendszereket 5-10 éves élettartamra tervezik. Ilyen hosszú időtávra tervezés során, felelős döntést kell hozni a tervezés elkezdésével kapcsolatban. Üzleti oldalról a beruházási és a bevételi oldalt kell megvizsgálni a döntéshez. Mindkettőt érdemes a gyártósor életciklusa mentén megközelíteni.

A 6. ábra bal oldala mutatja egy termék életciklus görbáját, a tervezéstől, a piacra bevezetésen, majd növekedésen át, a piaci érettségen keresztül a termék hanyatlásáig, piaci kivonásáig. Ugyanezek az életciklus lépések a termék gyártására szolgáló gyártóhelyre is igazak (6. ábra jobb oldala). Ebben az esetben az életciklus a sor tervezésével kezdődik, majd a telepítés és a próbagyártás után elkezd a gyártott darabszám és ezen keresztül a termelt profit felfutni.



6. ábra Termék és gyártó terület életciklus görbe

Egy hagyományos gyártósor esetében az életcikluson belül a gyártósor költsége két fő tételből tevődik össze, a kezdeti költségből és az utána következő üzemeltetési költségből. A rugalmas gyártórendszerek esetében azzal, hogy kitolódik és hosszabb lesz a gyártósor élettartama, ez a profit termelési periódus jelentősen megnőhet.

A fentiek alapján egy sor életciklusának költsége felírható az alábbi módon:

$$ECK = PK + TK + EK + MK + KK + RK + HK + \sum_{i=1}^n UK_i + IK \quad (1)$$

ahol:

ECK – életciklus költség

PK – előkészítési és induló költség

TK – beszerzési és telepítési költség

HK – gépleállás, meghibásodás költsége

RK – kivonás és újrahasznosítás költsége

UK – új termék bevezetés költsége

EK – energia költség

MK – működési költség

KK – karbantartási költség

IK – egyéb, előre nem tervezhető költségek és kiadások

n – az új termék bevezetések száma a soron az életciklus során

A költségeket három kategóriába soroltam:

1. egyszeri költségek (jellemzően befektetések, de ilyen lehet például a csarnok elektromos hálózatának átalakítása)
2. időfüggő költségek (ezek azok a költségek, amelyek folyamatosan jelen vannak az életciklus, az üzemelés során, például a karbantartó fizetése, vagy az áramfogyasztás)
3. darabfüggő költségek (ezek azok a költségek, amelyek leoszthatók egy-egy darabra, például az egy darab alapanyag költsége, vagy az egy darab beépülő alkatrészeinek költsége)

A cél a profit adott tartományon belül tartása, ennek mértékének megállapítása üzleti, menedzsment feladat és döntés. Ideális esetben a termékek összegzett profitja minden időpillanatban az elvárt profittartományba esik.

$$Profit(t) = \sum_{i=1}^n Profit_i(t) \quad (2)$$

$$Elvárt\ profit\ minimum < Profit(t) < Elvárt\ profit\ maximum \quad (3)$$

ahol:

i – az i-edik termék

n – a t időpillanatban gyártott termékek száma

Életciklusra vetítve felírható az alábbi összefüggés:

$$Profit = Bevétel - ECK \quad (4)$$

ahol,

Bevétel – a gyártósor teljes életciklusa során termelt bevétel

ECK – a teljes életciklus költség

Profit – a gyártósor teljes életciklusa során termelt profit

A profit paraméterek alapján pedig üzleti-műszaki döntés, hogy rugalmas gyártórendszert érdemes-e tervezni és használni.

3.2.2 Kapacitásszükséglet meghatározása életciklus alapján

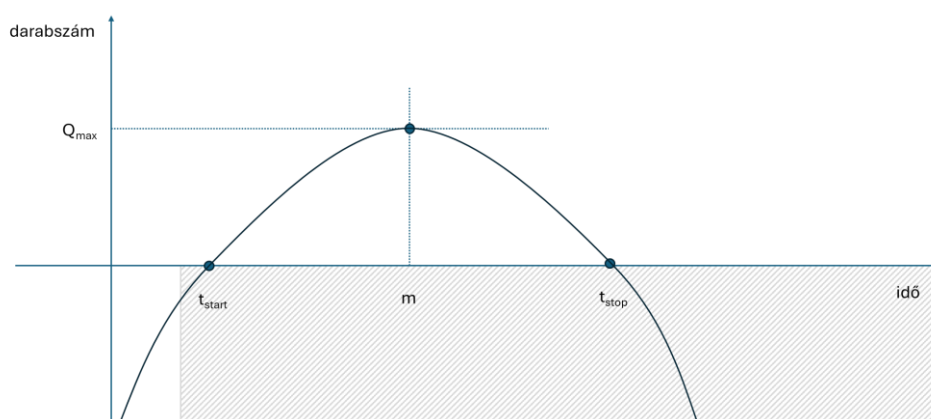
A rugalmas gyártórendszerek esetében az életciklus hossza miatt már annak meghatározása sem egyszerű, hogy milyen kapacitással kell rendelkeznie a sornak, azaz hány darab legyártására kell képesnek lennie egy adott időszakban. Az alábbiakban részletezett – általam kidolgozott - eljárás erre nyújt megoldást.

Elfogadva Cox [37] megközelítését a termék életciklus matematikai leírásáról, az életciklus parabola egy lefelé nyitott parabola, amelynek a koordináta-rendszerében a vízszintes tengely az idő, a függőleges tengely pedig a profit vagy a darabszám. A tervezés szempontjából a darabszámra tervezés egyszerűbb, ezért a továbbiakban darabszámot kezelek, feltételezve, hogy a profit és a darabszám arányban áll egymással. Ez a feltételezés azért is helytálló, mert a rugalmas gyártórendszerek esetében a termékek hasonlósága miatt a termékeken lévő profit is hasonló.

Tapasztalatom alapján a tervezés ezen fázisában a rendelkezésre álló információk az alábbiak

- A gyártósor várható teljes életciklusának hossza (LC)
- Termékenként
 - a termék valamilyen megnevezése, hivatkozási száma, cikkszama, amely alkalmas az adott termék azonosítására,
 - a gyártásának várható kezdeti időpontja (t_{start}),
 - a gyártásának várható befejezési időpontja (t_{stop}),
 - a maximális mennyiség, a várható igény az életciklusának a csúcán (Q_{max}).

Ezek alapján azonban a termék életciklusára vonatkozó parabola görbe felrajzolható (7. ábra).



7. ábra Egy termék életciklusának parabola görbéje

A gyártás kezdeti és befejezési időpontjában gyártott darabszám nulla. Azzal, hogy a termékek életciklusa egyre rövidebb, feltételezem, hogy a felfutási és lecsengési fázisok hossza megegyezik, vagyis a parabola szimmetrikus a termékre vonatkozó maximális gyártási mennyiség időpontjára.

Mivel gyártósor esetében a gyártott darabszám mindenképpen nulla vagy pozitív szám, a vizsgált és érvényes tartomány a

$$t_{start} \leq t \leq t_{stop} \quad (5)$$

ugyanis ebben tartományban pozitív a gyártott mennyiség, vagyis ebben a tartományban történik gyártás, azaz:

$$\begin{aligned} Q(t) &\geq 0 \text{ és} \\ t_{start} &> 0 \text{ és } t_{stop} > 0 \end{aligned} \quad (6)$$

A görbe jellegzetes pontja, ami az életciklus csúcspontja, az érvényes tartomány felénél van, vagyis:

$$m = t_{start} + \frac{t_{stop} - t_{start}}{2} \quad (7)$$

Ez az adott termékből az életciklus alatt adott időperiódusban gyártott maximális darabszám.

Egy termékre az életciklus görbe felírható az alábbi alakban:

$$Q(t) = -at^2 + 2a m t + (Q_{max} - am^2) \quad (8)$$

Mivel a t^2 együtthatója negatív ezért a parabola lefelé nyitott lesz.

Ugyanez kanonikus alakban így írható fel:

$$Q(t) = -a(t - m)^2 + Q_{max} \quad (9)$$

ahol,

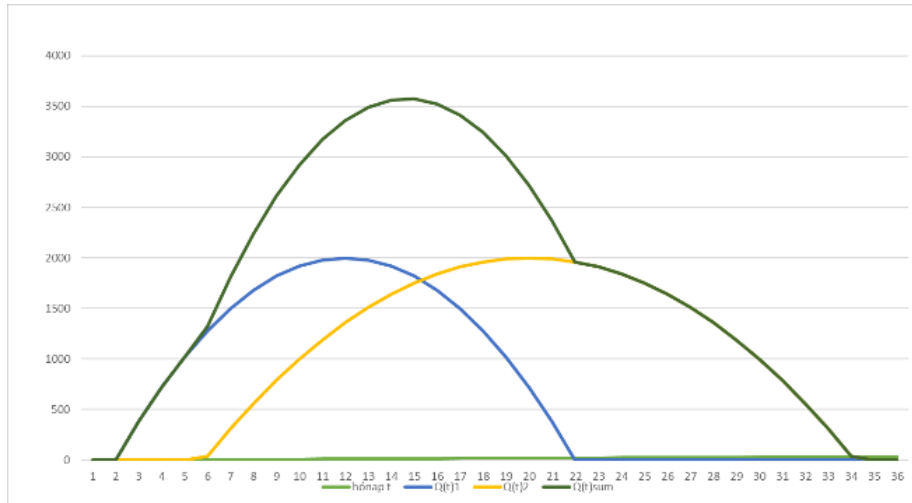
$Q(t)$ – a termék gyártott mennyisége a t időszakaszban

Q_{max} – a maximális gyártási mennyiség a termék életciklusának csúcán

m – a termék maximális gyártási mennyiségéhez tartozó időpillanat

a – egy olyan tényező, amely a termék felfutási sebességét mutatja, $a > 0$ minden esetben mivel a gyakorlatban olyan esettel nem foglalkozunk, hogy olyan termék kerül gyártásba, aminek lefelé görbül a keresleti görbéje, azaz már a termék kezdeti fázisában is csökkenő rá a kereslet.

Mivel gyártásról van szó, ezért csak a görbe azon szakasza értelmezhető, ahol $Q(t) > 0$, hiszen negatív darabszám nem gyártható. A 8. ábrán két termék életciklus görbéje látható (kék és sárga görbe) és azok eredője (zöld). A pozitív életciklus darabszám értékeket figyelembe véve az eredő egy „felhő” alakú, szakaszonként másodfokú görbe lesz. Az ábrán a vízszintes tengelyen az életciklus hónapjai, a függőleges tengelyen a darabszám található.



8. ábra Két termék életciklus görbéje és eredőjük számítása

A kapcsolat a két alak között az alábbi módon írható fel:

$$a = a \quad b = -2ap \quad c = ap^2 + q \quad (10)$$

A termékek darabszámát leíró függvény:

$$Q_i(t) = a_i t^2 + b_i t + c_i \quad i = 1, \dots, n \text{ és ahol } Q_i(t) > 0 \quad (11)$$

ahol,

i – az i-edik termék

Ekkor az összege felírható a termékek darabszámának az alábbi módon:

$$S(t) = \sum_{i=1}^n Q_i(t) \quad Q_i(t) > 0 \quad (12)$$

A maximális gyártási mennyiség pedig, amelyre a rugalmas gyártórendszert tervezni kell, pedig:

$$C = \text{MAX}(S(t)) \quad (13)$$

ahol,

C – a gyártósor szükséges kapacitása darabszámban

Összefoglalva az eljárás lépései:

1. Kvadratikus alakból általános másodfokú alak létrehozása
2. Hónapok behelyettesítésével a havi termékenkénti gyártott darabszám kiszámítása és egész számmá kerekítése
3. A negatív gyártási mennyiségek nullázása
4. A maximális igényelt havi gyártási darabszám meghatározása a termékenkénti havi mennyiségek összegzésével és azokból a legnagyobb érték kiválasztásával

A kidolgozott eljárás alkalmazásának feltételei:

- a termékek életciklus görbéje jól közelíthető parabolával,
- az életciklushoz kapcsolódó mérőszám a gyártandó darabszám,
- a gyártás nulla darabbal indul és nulla darabbal fejeződik be,
- az életciklus időszakonként kerül vizsgálatra (pl. hónap), ami egybevághat azzal, hogy a termelést és az ahhoz kapcsolódó pénzügyi kalkulációkat is időszakokra végzik a gyártó cégek,
- a termékek gyártási ideje hasonló.

Az eljárásból az alábbi eredmények számíthatók:

- szükséges kapacitás
- pillanatnyi termékmix
- életciklus alatt gyártandó mennyiség

II. Tézis: Feltártam a rugalmas gyártórendszerek életciklusához kapcsolódó egyedi sajátosságokat, és kidolgoztam azt a matematikai modellt, amely alapján már a tervezés korai fázisában meghatározható a szükséges kapacitás. A kidolgozott modellt esettanulmány során is alkalmaztam [S1] [S2] [S4]

3.3 Logisztikai méretezés

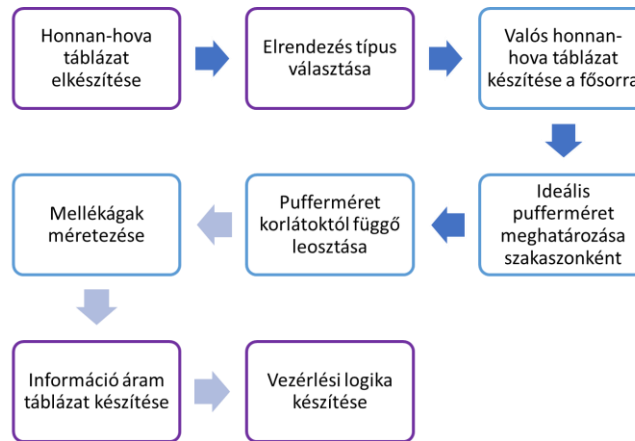
Egy rugalmas gyártórendszer, ahogy a nevében is szerepel, egy rendszer. Bár a gyártósor tervezés során a legtöbb tervezési-méretezési feladat különálló komponensekre történik, a végén ezeknek a különálló komponenseknek rendszerként kell működniük. A rugalmas gyártórendszerek esetében a logisztika (anyagmozgatás és tárolás) a rendszer szerves része.

Ebben a részben a rugalmas gyártórendszerek logisztikai komponenseivel foglalkozom. Bár a méretezés statikus módszereken alapszik több olyan szempontot elemzek, amelynek a hatása a digitális iker modellben elemezhető részletesen.

3.3.1 Puffer méretezése

A gyártósorok esetében a pufferek legfontosabb célja a különböző zavarok, meghibásodások, nem tervezett leállások hatásának csökkentése. Ilyen problémák az alábbiak lehetnek:

- műveleti idők szórása
- terméktípus átállás
- meghibásodások
- bármilyen, a folyamat indulását akadályozó tényező (hiányzó anyag, készülék, dolgozó stb.)



9. ábra Puffer méretezési eljárás

A kidolgozott puffer méretezési eljárás lépéseit a 9. ábra foglalja össze. Az eljárás feltételezi, hogy a korábbi tervezési lépések során elkészült a honnan-hova táblázat és kiválasztásra került a gyártósor elrendezése. Annak érdekében, hogy a puffer méretezésre ráépülő lépések is láthatók legyenek az ábrán megjelenik az információáram-táblázat készítése és a vezérlési logika készítés lépések is, amelyek nem részei a puffer méretezésnek, de követik azt a tervezés során.

A következő lépés a méretezés során az ideális pufferméret meghatározása. Az ideális pufferméret az a méret, amely az utána következő állomás meghibásodását teljes mértékben, a megelőző gépig történő feltorlódás nélkül tudja kompenzálni. A puffer a megelőző gép gyártási sebességével tud feltelni, ezért a pufferméret számítása:

$$P_i = \frac{MTTR_{G_i}}{t_{G_{i-1}}} \quad (14)$$

ahol,

$t_{G_{i-1}}$ - az i-1-edik gép műveleti ideje. Mivel a biztonság irányába történik a méretezés, ezért a $t_{G_{i-1}}$ érték azon a gépen áthaladó összes termék közül, a legkisebb gyártási idejű terméknek a műveleti ideje.

$MTTR_{G_i}$ - az i-edik gép meghibásodási ideje.

P_i – az i-edik gép előtti puffer mérete

Az ideális pufferméret ismeretében általában olyan nagy méretű pufferek kellenének a gyártósorra, amit egyéb korlátok miatt nem lehet megvalósítani. Ezért a következő tervezési lépés a pufferméret korlátoktól függő leosztása.

A soron kialakítható pufferméretet számos tényező befolyásolhatja, ezek közül a legjellemzőbb a rendelkezésre álló hely és a rendelkezésre álló összeg. Mivel a sori ideális pufferméreteinek meghatározása a sor globális viselkedésén alapul, ezért a korlátok figyelembevételével arányosan csökkentett pufferméreteket lehet használni.

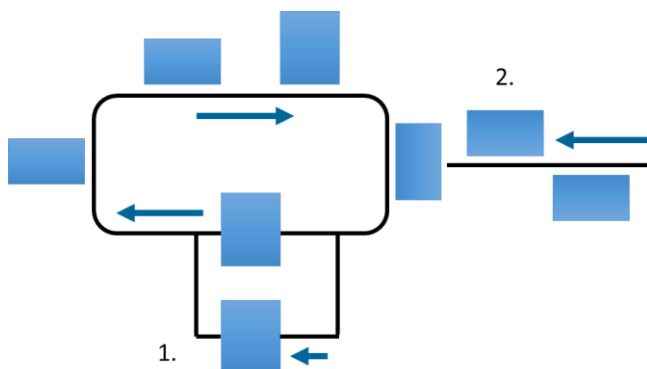
$$Puffer\ korlát\ arány = \frac{Maximális\ megvalósítható\ pufferméret}{\sum_{i=1}^n Ideális\ pufferméret_i} \quad (15)$$

Meghatározható az arányszám, amely megmutatja, hogy a sorra kiszámított teljes pufferkapacitás és a korlátok alapján megvalósítható pufferkapacitás hogyan aránylik egymáshoz. A kapott aránnyal kell csökkenteni az összes szakasz pufferméretét.

$$Pufferméret_i = Ideális\ pufferméret_i * Puffer\ korlát\ arány \quad (16)$$

Amennyiben a puffer korlát arány nagyon kicsi, elképzelhető, hogy egy adott állomás előtt a pufferméretnek 0,5-nél kisebb érték jön ki, ami kerekítve azt jelentené, hogy oda nem kerül puffer. Ennek ellenére tapasztalat alapján minden meghibásodással rendelkező állomás előtt érdemes akár csak 1 darab kapacitású puffert készíteni.

Ezzel a főág puffereinek méretezése elkészült. Azonban szükség lehet olyan mellékágakra, amelyek részei a sornak, de nem az alap elrendezés részei. A két legfontosabb típusa az ilyen mellékágaknak (10. ábra):



10. ábra Mellékágak két fő típusa

1. a kisorolás jellegű mellékág, amikor a darab általában tesztelésre, minőségellenőrzésre sorol ki a főágról
2. beépülőket szállító mellékág, amely a főágon beépülő alkatrészeket biztosítja a főág számára

Mindkét mellékág esetében a fontos, hogy ne akadályozza a főág működését. A méretezés megegyezik a főág szakaszok méretezésével. Mivel azonban itt kiemelkedően fontos, hogy a főágot ne blokkolja, törekedni kell, hogy a Puffer korlát arány minél közelebb legyen az 1-hez vagyis a puffer méret közelítsen az ideális mérethez.

A fenti kidolgozott módszer egy strukturált, adat alapú, jól kezelhető módszer a gyártósori pufferek elsődleges tervezési méretének meghatározására. Az eljárás további előnyei, hogy

- a pufferméret az AGV alapú gyártósorok esetében jó támpontot adhatnak a szükséges AGV darabszám meghatározásában is.

- a pufferméret a palettás gyártósorok esetében a palettaszám meghatározását is segítik, mivel a soron működőképes palettaszám = pufferméret + gépkapacitás összeg a soron, feltételezve, hogy a paletták bemozognak a gépekbe.

3.3.2 AGV méretezés

A rugalmas gyártórendszerek a logisztika területén is rugalmasságot igényelnek, nem véletlen, hogy a rugalmas gyártórendszerek öt elrendezés változatából három esetben is használhatók AGV-k az anyagmozgatásra (zárt hurok, létra és nyitott terű elrendezés).

Az AGV méretezés két részből áll:

- Az AGV szállítási darabszámának méretezése: mivel az AGV pufferként viselkedik a soron, ezért az előző fejezetben a pufferek méretezésére kidolgozott eljárás használható erre.
- Az AGV energia kapacitásának méretezése: ez a lépés a szükséges AGV töltési kapacitást határozza meg, ami megadja, hogy hány darab AGV-re van szükség, a töltés és az életciklus során történő akkumulátor degradáció során.

Így egy AGV műszakon belüli tevékenységéhez szükséges idő felírható az alábbi képlettel, ahol az összegzések az adott típusú tevékenységek idejeinek összege a vizsgált időszakra:

$$t_{AGV} = \sum t_{Felvétel} + \sum t_{Gyártás} + \sum t_{Leadás} + \sum t_{Darab\ szállítás} + \sum t_{Üres\ szállítás} + \sum t_{Töltés} \quad (17)$$

Gyakori megoldás, hogy az AGV miközben visz egy darabot egy állomásra, onnan el is viszi az időközben elkészült darabot. Könnyű belátni, hogy ebben az esetben, ha az új darab akkor érkezik az állomásra, amikor még nincs kész a korábbi, akkor várakoznia kell az AGV-nek, ami kapacitáskiesést okoz. Hasonlóan kapacitáskiesést okoz, ha a régi darab már készen van, és az új darab nem érkezett még oda az állomásra. Az első esetben az AGV vár, a második esetben maga az állomás. A várakozó AGV-k tulajdonképpen egy várakozási sort, puffert alkotnak a gép előtt.

A rugalmas gyártórendszerre szükséges AGV darabszám-meghatározás komplex feladat. Két megközelítést lehet rá alkalmazni, és azok eredményét kombinálni:

1. az AGV-k mennyiségének ki kell elégíteni az adott időszakra vonatkozó szállítási, darab mozgatási igényt, figyelembe véve az AGV-k akkumulátor kapacitás jellemzőit és a töltési helyzetet. Ebben az esetben az adott időszakra szükséges töltési kapacitás alapján végezzük a méretezést.

2. az AGV-k emellett puffer szerepet is töltenek be a gyártási folyamatban, így a korábban tárgyalt puffer méretezési megfontolásokat is figyelembe kell venni. Ebben az esetben a sorban álló AGV-k pufferként működnek, így alkalmazható rájuk a korábbi puffer méretezési módszer.

Fontos lépés a szállítási, anyagmozgatási kapacitás meghatározása. Egy AGV a gyártási-logisztikai folyamat során három állapotban lehet: vagy mozog, vagy áll, vagy töltés alatt van. A mozgást még érdemes lehet különválasztani terhelt állapotú mozgásra és nem terhelt (visszaszállítás, vagy üres) mozgásra. A méretezési módszer során az üzemidő használható, mint méretezési mérőszám. Mérnöki és gyártási szempontból a legjobban értelmezhető jellemzője a rendszernek.

A méretezés alapjául ki kell választani, hogy milyen időtartamot tekintünk egységnek. Diszkrét gyártás esetében az egy műszak megfelelő időegység. A minimális információ, amit gyakorlatilag minden gyártó megad az AGV-kkel kapcsolatban, hogy mennyi ideig működnek normál kondíciók mellett egy töltéssel, mennyi a töltési idejük és milyen sebességgel közlekednek.

Amennyiben csak ennyi adat áll rendelkezésünkre, akkor a méretezés lépései a következők lehetnek:

1. a korábban elkészített anyagáram-intenzitás táblázat alapján a műszakban az AGV-k által megteendő távolság meghatározása, ez az anyagáram intenzitás táblázat celláiban szereplő értékek összege:

$$D_{teljes} = \sum d_{x,y} \quad (18)$$

ahol,

D_{teljes} – a teljes megteendő távolság a műszakon belül. Itt érdemes a szállítás maximum értékeit használni, hogy a legnagyobb terhelésre legyen méretezve a rendszer.

$d_{x,y}$ – az anyagáram intenzitás táblázat x-edik oszlopában és y-adik sorában lévő érték

2. A teljes távolság és az AGV sebesség alapján meghatározható a szükséges szállítási idő:

$$t_{igény} = \frac{D_{teljes}}{v_{AGV}} \quad (19)$$

ahol,

$t_{igény}$ – a teljes szállítási időigénye

v_{AGV} – az AGV sebessége

3. A szállítási időigényt elosztva a műszak hosszával az eredmény a szükséges elméleti AGV darabszám:

$$N_{elm} = \frac{t_{igény}}{t_{műszak}} \quad (20)$$

ahol,

N_{elm} – az elméletileg szükséges AGV darabszám

$t_{\text{műszak}}$ – a műszak hossza

4. figyelembe vesszük az AGV-k műszakon belüli valós szállítási kapacitását.

$$N = \frac{t_{\text{igény}}}{t_{\text{műszak}} - N * t_{\text{töltés}}} \quad (21)$$

ahol,

N – az elméletileg szükséges AGV darabszám

$t_{\text{töltés}}$ – az AGV töltési ideje a műszakon belül

átalakítva egy másodfokú egyenletet kapunk:

$$-t_{\text{töltés}} * N^2 + t_{\text{műszak}} * N - t_{\text{teljes}} = 0 \quad (22)$$

aminek a megoldása:

$$N = \frac{-t_{\text{műszak}} \pm \sqrt{t_{\text{műszak}}^2 + 4 * t_{\text{töltés}} * t_{\text{teljes}}}}{-2 * t_{\text{töltés}}} \quad (23)$$

Az AGV-ket érdemes a teljes életciklusra méretezni, ahogy a degradációval csökken a kapacitásuk, a töltés sűrűbben történik, hosszabb töltési időt kell behelyettesíteni a fenti képletekbe. Ennek megfelelően a degradációval magasabb szükséges AGV szám fog kijönni.

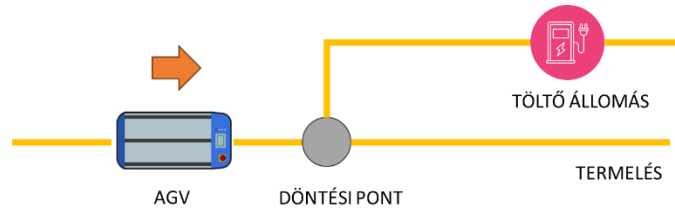
A szükséges töltőállomás szám a műszakra az alábbi módon számolható ki:

$$CN = N * \frac{t_{\text{töltés}}}{t_{\text{műszak}}} \quad (24)$$

ahol,

CN – a szükséges töltőszám

Ezek a számított értékek optimista számítások, a valós életben 10%-kal legalább érdemes több AGV-t használni. Az AGV szám pontos meghatározásához digitális iker építése szükséges.



11. ábra Töltési döntési pont kialakítása

A folyamatokban mindig lesz egy döntési pont (11. ábra), amikor eldől, hogy az adott AGV a töltő felé haladjon tovább, vagy folytathatja a munkáját a termelésben. Ezekre a 2. táblázatban lévő logikákat definiáltam.

Töltő puffer logika	Leírás
LILO	Level in Level out – adott lemerültségi szintnél, vagy alatta az AGV töltőre kerül és adott töltöttségi szintet elérve tovább megy
WILO	Lowest in Level out – a legalacsonyabb töltöttségi szinten álló AGV töltőre kerül és adott töltöttségi szintet elérve tovább megy
FXLO	First expired Level out - a mostantól legkorábban lemerülő AGV töltőre kerül és adott töltöttségi szintet elérve tovább megy
LIFO	Level in Full out – adott lemerültségi szintnél, vagy alatta az AGV töltőre kerül és teljesen feltöltve megy csak tovább
WIFO	Lowest in Full out – a legalacsonyabb töltöttségi szinten álló AGV-t választja ki a felszabadult töltőállomásra és ha teljesen feltöltődik, akkor küldi tovább
FXFU	First expired Full out – a mostantól legkorábban lemerülő AGV-t választja ki a felszabadult töltőállomásra és ha teljesen feltöltődik, akkor küldi tovább

2. táblázat AGV töltő puffer stratégiák

III. Tézis: Kidolgoztam a rugalmas gyártórendszerek kritikus logisztikai paramétereinek (pufferek mérete, anyagmozgató eszközök mennyisége) méretezésére szolgáló eljárást, melynek gyakorlati alkalmazhatóságát esettanulmány formájában igazoltam [S8] [S9]

3.4 Vezérlő rendszerek tervezése

A rugalmas gyártórendszerek esetében a három fő komponense a gépek, a logisztika és a vezérlés, amely tulajdonképpen a működéshez szükséges vezérlési logikát jelenti. Ennek működésének átgondolása a gyártórendszer tervezésének elengedhetetlen része. A rugalmas gyártórendszerek esetében a vezérlési logika nagyon szorosan kapcsolódik a rendszer logisztikájához.

A vezérlési logika egy döntési mechanizmus, alacsony szinten a vezérlő hardverben (pl. PLC) leprogramozva. A vezérlési logika kialakítása után a digitális iker kiemelt szerepet kap, mert azon keresztül lehet letesztelni a vezérlési logika működőképességét, és megtalálni az esetleges problémákat a vezérlésben.

3.4.1 Döntési táblák

Két gyártási elem közötti vezérlési kapcsolat leírására bevezettem a döntési táblákat. A döntési táblák kiváló eszközt nyújtanak vezérlési logikák leírására. A döntési táblák két fő részből állnak, a feltételekből a feltételek teljesülése esetén végrehajtandó akciókból. A feltételek és az akciók csoportjai a szabályok.

Döntési helyzetek a rugalmas gyártórendszerekben felmerülhetnek a következő helyeken:

- anyagáram elágazásnál
- gépbe darab érkezésnél
- gépből darab távozásnál
- egyéb a működési logika szempontjából szükséges helyeken (pl. szenzorok)

A döntési táblák felépítésére kidolgozott folyamat a következő:

- információ-áram táblázatból a kommunikációs pontok kigyűjtése
- mindegyik ponthoz egy döntési tábla definiálása
- a döntési táblákban a feltételek felírása, a lehetséges értékek meghatározásával
- a döntési táblákban a tevékenységek felírása az információ-áram pontok lehetséges kimeneteinek meghatározásával
- a feltételek és a tevékenységek lehetséges kombinációinak megállapítása
- a döntési táblák ellenőrzése a teljesség és az ellentmondás mentesség szempontjából

A vezérlési logikát leíró döntési tábláknak az alábbi kritériumoknak kell megfelelni:

- tartalmazzák az adott szituációt leíró összes lehetséges feltétel kombinációt (nem feltétlenül az összes szóba jöhető kombinációt),
- a feltétel kombinációk között nincsen ellentmondás,
- nem tartalmaznak redundáns szabályokat, amelyek ugyanazon feltételeket és tevékenységeket tartalmazzák.

A vezérlési logikák készítése során az alábbiakat is figyelembe kell venni:

- folyamatlépések, azok esetében mikor történik valami olyan esemény, ami vezérlést indít el (folyamat eleje, folyamat vége, esetleg folyamat közben)
- folyamatok közötti kapcsolatok
- biztonsági megfontolások (vészleállítások, károkozás nélküli leállítások)
- szükséges és minimális adatkommunikáció az optimalizált működés érdekében
- moduláris felépítés a folyamatlépések és funkciók mentén

A gyártósor tervezésének befejezése után pedig a telepítés során a PLC programozás és a termelés vezérlése során segít a tervezés során elkészített döntési táblákban lévő logika.

3.4.2 Neurális hálók használata a vezérlésben

A rugalmas gyártórendszerek vezérlésének tervezése sok esetben azért komplex, mert az új típusok és típusvariációk bevezetését nem minden esetben tudja a sori vezérlés átprogramozása követni, ami leálláshoz, gyártási problémákhoz vezethet.

A hiányzó adatok problémájára megoldás neurális háló alapú vezérlést készíteni, mivel akkor a vezérlési logika adathiányból adódó problémáit kiküszöböli a neurális háló a hiányzó adatok prediktív legenerálásával

A neurális háló alapú vezérlés kidolgozása minden olyan esetben releváns, ahol nem lehet a vezérlési feladatokra egyértelmű szabályrendszert alkotni. Neurális háló alapú vezérléssel irányítható a teljes sor vagy csupán egy része. Hasonlóan jól használható egy neurális háló alapú vezérlés abban az esetben is, ha a vezérlés túl komplex és nem egyértelmű, hogy minden egyedi, a termelésben előforduló esetet sikerül vele lekezelni.

Emellett alkalmazható neurális háló alapú vezérlésre az olyan öntanuló gyártási rendszerek esetében, ahol egy adott paraméter a korábbi tapasztalatok alapján már előre megmondható (predikció).

Neurális háló alapú vezérlési logika készítéséhez és teszteléséhez, mindenképpen valamilyen digitális módszerre, digitális ikerre van szükség. A legtöbb szimulációs rendszer integráltan tartalmaz mesterséges intelligencia komponenst, vagy könnyen integrálható az elterjedt mesterséges intelligencia rendszerekkel, környezetekkel.

A cél meghatározása adja meg, hogy mennyire részletes modellre van szükség. A részletesség befolyásolja a modell futási sebességét, ezen keresztül pedig a neurális háló tanulási sebességét.

Az adatgyűjtés során fontos az adatminőség és az adatok eloszlásfüggvényeinek pontos megfogalmazása, mert az adatminőség egyértelműen meghatározza a betanítás minőségét.

Az adatgyűjtés a modellből lépésben történik a modell futtatása a megfelelő bemeneti adatokkal és azok alapján a modell tanításhoz szükséges adatok kigyűjtése.

A digitális iker előnye, hogy az abból kapott adatok minősége elvileg megfelelő ahhoz, hogy minden torzítás kiküszöbölés és szerkesztés nélkül felhasználhatók legyenek. A digitális iker felépítés után a tulajdonképpen egy virtuális gyárból történik az adatgyűjtés. Ez a virtuális adatgyűjtő rendszer az alábbi adatokat gyűjtheti és használhatja fel a betanításhoz:

- rendelések és műveletek adatai, kezdési és befejezési időpontjai
- dolgozói adatok, tevékenység, szünetek
- anyagmozgási adatok, beleértve az alapanyagot és a félkész termékeket is
- gépadatok, működési állapotok, különös tekintettel a meghibásodásokra
- minőségi adatok, javítás és selejt kezelő folyamatok adatai
- termékek adatai, szükség esetén darab követéssel
- készülék adatok, szerszámok, karbantartások adatai

A futtatás és betanítás során fontos a megfelelő tanítási paraméterek és tanítási hossz meghatározása és az eredmények adott hibahatáron belül tartása.

A rugalmas gyártórendszerek sajátossága, hogy folyamatosan változnak a gyártott típusok és azoknak a technológiai paraméterei. Változás esetén meg kell vizsgálni, hogy a változásnak lehet-e hatása a modell működésére és ezen keresztül a modell által generált adatokra. Ha a válasz nem, akkor tovább használható a meglévő neurális háló modell. Ha a válasz igen, akkor vissza kell térni a modell építési fázisba és el kell készíteni a módosításokat. Természetesen a megváltozott modellt ugyanúgy validálni és verifikálni kell mielőtt az új tanítási ciklus elkezdődne. Az új tanítási ciklus után használható a frissített neurális háló modell, alkalmazás.

A digitális iker építési folyamat mellett fontos áttekinteni, hogy mikor milyen adat érhető el a modell építéséhez és betanításához. Ha valós adatgyűjtésről beszélünk, azt leghamarabb a sor telepítése és felfutása során lehet elkezdni. Nagyobb mennyiségű adat csupán a fejlődési periódusban áll rendelkezésre. Adatminőség szempontjából a felfutás során gyűjtött adatok minősége gyakran megkérdőjelezhető, mivel abban a fázisban jóval több a sor beüzemeléséből származó extra probléma, leállás. Amikor a sorra szeretnénk valamilyen mesterséges intelligencia alapú döntési elemet telepíteni, rövid idő alatt csapdába esünk, mivel neurálishálók működéséhez adat kell, de addig nincs adat, amíg nem működik üzemszerűen a rendszer. Ha egy, már régebben működő sorba szeretnénk neurális háló komponenszt integrálni, akkor könnyebb helyzetben vagyunk.

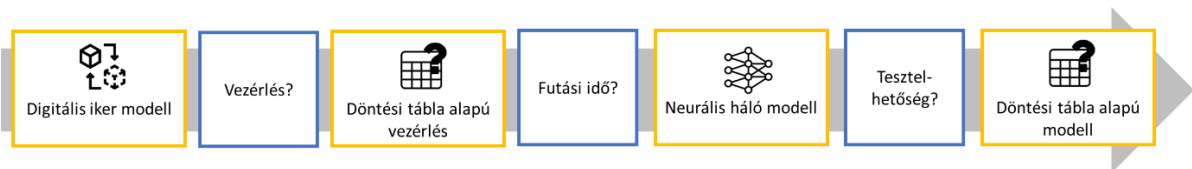
3.4.3 Döntési táblák és neurális hálók kapcsolata

Az előzőekben két fő komponensét vizsgáltam a vezérlési logikáknak, a döntési táblákat és a neurális hálókat. A döntési táblák olyan strukturált formátumok, amelyekben az input feltételek (bemeneti változók) és az ezekhez rendelt output akciók világos, táblázatos formában szerepelnek. A neurális hálók belső működése ezzel szemben általában egy "fekete doboz" analógiával írható le, amely komoly kihívásokat jelent a döntési logika, a hibakeresés, validáció szempontjából.

Az előzőekben tárgyalt két lehetőség akár egymást kiegészítve is használható az alábbi két módon:

1. A döntési táblák esetében bármely döntési feltételhez lehet hozzárendelni egy tevékenységet, amely egy neurális háló alapján ad meg értéket, végez el vezérlési feladatot.
2. Bár a modern sori vezérlőeszközök akár már közvetlenül is tudnak neurális hálót használni, amennyiben ez valamilyen okból nem lehetséges még mindig megoldható az, hogy a neurális hálót lekérdezve az összes bemeneti kombinációra, ami előfordulhat, az alapján felépíthető egy döntési tábla. Bár az ilyen táblázat nagyon nagy méretű is lehet több millió adattal, maga a neurális hálóból generálása és utána a vezérlés általi elérése megfelelően gyors lehet a diszkrét gyártás követelményeinek, és így a rugalmas gyártórendszerek számára.

A digitális iker modell felépítése során a fentieknél még összetettebb munkafolyamattal lehet a vezérlési logikát hatékonyan felépíteni (12. ábra)



12. ábra Döntési tábla és neurális háló használata a digitális ikerben

A 12. ábrán látható az általam kidolgozott munkafolyamat, amely az elkészült digitális iker modellel indul, amelyben benne vannak a gépek, a pufferek és minden berendezés. A következő lépés a vezérlési logika elkészítése, amelyre produktív és áttekinthető módszer a döntési táblák készítése. Az elkészült modell a vezérlési logikával tesztelni kell. Ebbe a tesztbe már az összes paramétere és korlátja szerepel a sornak (típusok, idők, meghibásodások stb.). Ebből adódóan ahhoz, hogy megbizonyosodjunk a sor megfelelő működéséről a digitális iker modellben, nem ritkán több ezer vagy akár millió futtatásra is szükség lehet, ami a mai modern eszközökkel is jelentős idő. A futási idő korlát problémája kiküszöbölhető azzal, ha nem az összes szimulációs eset kerül lefuttatásra, hanem annak egy keresztmetszete, és ez alapján betanításra kerül a vezérlési logika neurális hálójára. Az elkészült neurális háló gyors válasz idejeit utána fel lehet használni arra, hogy egy döntési táblába kerüljenek a bemeneti és kimeneti értékpárok, amelyek vezérelhetik a sort. Mivel a paraméterek száma diszkrét, így az összes szóba jöhető bemeneti kombinációhoz elkészíthető a kimenet. Ezzel egy olyan, a gyakorlatban is alkalmazható döntési tábla jön létre, amely hasonló válaszokat ad, mintha a folyamat elején az összes szimulációs futtatás megtörtént volna.

A kidolgozott eljárás előnyei:

- Gyorsan implementálható, és sori paraméterek változása esetén gyorsan újra végrehajtható.
- Bármilyen hálózati architektúrára alkalmazható – nem függ sem a rétegek számától/szerkezetétől, sem a háló tanítási algoritmustól.
- Tetszőleges input output típus használható, illetve segít “túl nagy” vagy “túl bonyolult” modellek közérthető visszafejtésében is.
- Az elkészült döntési tábla könnyen beépíthető adatbázisba vagy bármilyen döntés vezérlő vagy támogató rendszerbe.
- Lehetőséget ad globális és lokális vezérlő modellek létrehozására egyaránt.

A kidolgozott eljárás alkalmazása során az alábbiakra kell figyelni:

- a neurális háló paraméterezésére fontos az eredmény szempontjából, validálni kell a neurális háló válaszait,
- nagy mennyiségű szabály keletkezik a döntési táblában, ami bizonyos rendszereknél előnytelen lehet.

A fenti eljárás fontos eleme a neurális háló átalakítása döntési táblává. Bár a neurális háló belső struktúrája is tekinthető lenne döntési táblának, ilyen szinten a belső felépítésük a neurális háló könyvtáraknak általában nem ismert. Az eljárás során a kizárólag a neurális háló bemenet-kimenet párait használom a háló viselkedésének feltérképezésére és leképezésére. Az átalakítás lépései:

1. Bemeneti paraméterkombinációk összeállítása, legenerálása
2. Neurális háló meghívása az összes bemeneti kombinációval, kimenetek legenerálása
3. A bemeneti kombinációk felírása feltételként a döntési táblában
4. A kimenetek felírása tevékenységként a döntési táblában
5. Szabályokkal a feltételek és a tevékenységek összerendelése a döntési táblában a neurális háló válaszai alapján

A kidolgozott eljárás számos előnye mellett hátránya, hogy nagyon nagy méretű döntési táblák jöhetnek létre. Ezért az eljárás kiegészítő lépéseként érdemes megvizsgálni a táblázat egyszerűsítésének lehetőségét. Ennek legegyszerűbb módja, hogy azonos kimenetet eredményező szabályok egyesíthetők, és az eltérő, ám lényegtelen feltételeknél (-) jelölést alkalmazható. Másik lehetőség a szabálycsoportok létrehozása oly módon, hogy az azonos feltételeket OR (vagy) kapcsolattal és az azonos tevékenységeket AND (és) kapcsolattal összevonva és a csoportok metszetét alkotva jönnek létre „csoportszabályok”. A harmadik módszer lehet bemeneti vagy kimeneti csoportokat alkotni és azokat a döntési táblába átstrukturálni, ez különösen akkor lehet hasznos, ha pl. a csoportosítás során kiderül, hogy van olyan bemenet, aminek a változása minimális hatással van egy vagy több kimenet értékére.

IV. Tézis: Létrehoztam a döntési táblákon és neurális hálókön alapuló eljárást a rugalmas gyártórendszerek vezérlési logikájának leírására, valamint alkalmazási módszerét, mely a tervezési és a megvalósítási fázisban is alkalmazható [S6]

4 Új tudományos eredmények

I. Tézis: A szisztematikus elrendezés-tervezés-módszer jelentős továbbfejlesztésével kidolgoztam egy olyan tervezési eljárást, amely lefedi a rugalmas gyártórendszer teljes tervezési folyamatát. [S3] [S5] [S7] (4.2. fejezet)

II. Tézis: Feltártam a rugalmas gyártórendszerek életciklusához kapcsolódó egyedi sajátosságokat, és kidolgoztam azt a matematikai modellt, amely alapján már a tervezés korai fázisában meghatározható a szükséges kapacitás. A kidolgozott modellt esettanulmány során is alkalmaztam. [S1] [S2] [S4] (4.4. fejezet)

III. Tézis: Kidolgoztam a rugalmas gyártórendszerek kritikus logisztikai paramétereinek (pufferek mérete, anyagmozgató eszközök mennyisége) méretezésére szolgáló eljárást, melynek gyakorlati alkalmazhatóságát esettanulmány formájában igazoltam. [S8] [S9] (4.8. fejezet)

IV. Tézis: Létrehoztam a döntési táblákon és neurális hálókön alapuló eljárást a rugalmas gyártórendszerek vezérlési logikájának leírására, valamint alkalmazási módszerét, mely a tervezési és a megvalósítási fázisban is alkalmazható. [S6] (4.10. fejezet)

5 New scientific results

I. Thesis: By significantly further developing the systematic layout design method, I have developed a design process that covers the entire design process of the flexible manufacturing systems. [S3] [S5] [S7] (Chapter 4.2)

II. Thesis: I have explored the unique characteristics related to the life cycle of flexible manufacturing systems and have developed a mathematical model based on which the required capacity can be determined in the early phase of the design, I have also applied the developed model in a case study. [S1] [S2] [S4] (Chapter 4.4)

III. Thesis: I have developed a procedure for sizing the critical logistical parameters (buffer sizes, material transport equipment quantity) of flexible manufacturing systems, the practical applicability of which I have proven in the form of a case study. [S8] [S9] (Chapter 4.8)

IV. Thesis: I created and verified with a case study a design process of the control logic of flexible manufacturing systems based on decision tables and neural, which can be used in both the design and implementation phases. [S6] (Chapter 4.10)

6 Összefoglalás, további kutatási lehetőségek

Értekezésemben a rugalmas gyártórendszerek tervezési módszereinek továbbfejlesztésével foglalkoztam, kiegészítve azokat Ipar 4.0 eszközök használatával.

Az értekezésem első részében megvizsgáltam a vonatkozó szakirodalmat. A vizsgálat alapján kiderült, hogy a rugalmas gyártórendszerek tervezésének részelemeivel többen foglalkoztak, de átfogó tervezési eljárás kidolgozása még várat magára, és ennek a kutatásában nagy lehetőségek rejlenek.

Az értekezés további részében mutattam be a kidolgozott több lépésből álló tervezési eljárást a rugalmas gyártórendszerekre. A kidolgozott eljárás minden lépése alkalmas Ipar 4.0 eszközökkel való gyakorlati alkalmazásra. Ez az eljárás alkotja az első tézisemet.

Az értekezés következő részében feltártam a rugalmas gyártórendszerek életciklusához kapcsolódó sajátosságokat, és kidolgoztam egy olyan matematikai modellt, amely már a tervezés korai fázisában lehetővé teszi a szükséges gyártósor kapacitás meghatározását. Ez az eljárás a második tézisem.

A rugalmas gyártórendszerek esetében a logisztikai elemek integrált részei a rendszer működésének, ezért ezek méretezésével kiemelten foglalkoztam. Egy olyan folyamatot dolgoztam ki, amely a pufferek és az AGV-k méretezését támogatja már a tervezés korai fázisában is. Ez egyben a harmadik tézisem.

A negyedik tézisem és egyben az értekezés következő nagyobb egysége a rugalmas gyártórendszerek vezérlő rendszeréhez kapcsolódik. Itt sikerült egy olyan tervezési folyamatot létrehozni, amely rugalmasan képes alkalmazni a döntési táblákat a neurális hálókat és azok kombinációját a sori vezérlés kezelésére. Nagy hangsúlyt helyeztem arra is, hogy a létrehozott folyamat Ipar 4.0 eszközökkel hatékonyan kezelhető legyen.

A mellékletben minden tézishez kapcsolódóan konkrét ipari eseteken alapuló példákban mutattam be az értekezésben kidolgozott eljárások és folyamatok alkalmazhatóságát. Ezzel teljesítettem azt a kutatói célkitűzésemet is, hogy a kidolgozott értekezés az újszerű tervezési módszer mellett az ipari gyakorlatban azonnal használható eszköz is legyen.

A kutatás során fontos felismerés volt, hogy a kidolgozott eljárás nagy része nem csupán a rugalmas gyártórendszerek, hanem szinte bármilyen modern automatizált gyártó terület tervezése során alkalmazható. Meggyőződésem, hogy a jövő a rugalmas gyártórendszereken túlmenően a rugalmas gyáraké, ahol teljes gyárak tudnak rugalmasan és hatékonyan gyártani. A kutatás további iránya a módszer kiegészítése és kibővítése annak érdekében, hogy teljes körű tervezési támogatást tudjon nyújtani a modern automatizált gyárak és azok elemei számára (pl. raktárak és egyéb logisztikai területek) tervezéséhez. Komoly kutatási potenciált érzek a generatív elrendezés-tervezés lehetőségeinek alkalmazására is a rugalmas gyártórendszerek esetében. Ennek stabil alapot tudnak nyújtani az értekezésben elért eredményeim.

7 Summary and further research directions

In my dissertation, I focused on advancing the design methods for flexible manufacturing systems, supplementing them with the use of Industry 4.0 tools.

In the first part of my dissertation, I examined the relevant literature. The literature review revealed that several researchers have addressed elements of flexible manufacturing system design, but the development of a comprehensive design procedure has yet to be developed, and there is great potential in this research.

In the remaining part of the dissertation, I presented the developed multi-step design procedure for flexible manufacturing systems. Each step of the developed approach is suitable for practical application with Industry 4.0 tools. This procedure constitutes my first thesis.

In the next part of the dissertation, I explored the specificities related to the life cycle of flexible manufacturing systems and developed a mathematical model that enables the determination of the required production line capacity in the early phase of the design. This procedure is my second thesis.

In the case of flexible manufacturing systems, the logistics elements are an integral part of the system's operation, so I focused on their sizing. I developed a process that supports the sizing of buffers and AGVs even in the early design phase. This is also my third thesis.

My fourth thesis and the next major unit of the dissertation is related to the control system of flexible manufacturing systems. Here, I managed to create a design process that can flexibly apply decision tables, neural networks and their combination to handle line control. I also placed great emphasis on ensuring that the created process can be effectively handled with Industry 4.0 tools.

In the appendix, I presented the applicability of the procedures and processes developed in the dissertation in examples based on specific industrial cases related to each thesis. In this way, I also fulfilled my research objective that the developed dissertation should be a tool that can be used immediately in industrial practice in addition to being a novel design method.

An important realization during the research was that a large part of the developed method can be applied not only to flexible manufacturing systems, but also to almost any modern automated manufacturing area. I firmly believe that the future lies not only in flexible manufacturing systems, but also to flexible factories, where entire factories can produce flexibly and efficiently. A further direction of the research is to supplement and expand the method to provide full-scale design support for the design of modern automated factories and their elements (e.g. warehouses and other logistics areas). I also see serious research potential for applying the possibilities of generative layout design to flexible manufacturing systems. The results achieved in my dissertation can provide a solid foundation for this.

8 Irodalomjegyzék

- [1] D. Ridley, *The Literature Review*, London: SAGE Publications Lt, 2012.
- [2] B. Kitchenham and S. M. Charters, "Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering," Keele University, University of Durham, 2007.
- [3] "Safeguard Global," [Online]. Available: <https://www.safeguardglobal.com/resources/top-10-manufacturing-countries-in-the-world-2023/>. [Accessed 19 01 2024].
- [4] J. R. Immer, *Layout Planning Techniques*, McGraw-Hill, 1950.
- [5] R. & H. L. Muther, *Systematic Layout Planning*, Management & Industrial Research Publications, ISBN 978-0-933684-06-5, 2015.
- [6] J. M. Apple, *Plant Layout and Materials Handling*, Wiley, 1977.
- [7] B. Prasad and R. Srivastava, "Comparative Analysis of Procedural Approaches for Facility Layout design," *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 13, no. 9, pp. 238-243, 2018.
- [8] E. Ramos-Valle, A. Paulino, P. Chavez, J. Alvarez and S. Nallusamy, "Pilot Implementation of Innovative Proposal for Service Level Improvement in a Spare Parts Trading Company," *International Journal of Engineering Research in Africa*, vol. 62, pp. 173-187, 2022.
- [9] D. Diaz, Y. Garcia, G. Santivanez and E. Castaneda, "Optimization Model to Increase the Productive Flow, Applying SLP, 5s and Kanban-Conwip Hybrid System in Companies of the Metalworking Sector," *Proceedings - 2022 8th International Conference on Information Management, ICIM 2022*, pp. 186-190, 2022.
- [10] M. Alvarado-Pajares, D. Bautista-Choquehuanca and C. Leon-Chavarri, "Design of a Production System using 5S, SLP and Work Study to Increase Productivity at a Bakery SME," *Proceedings - 2022 8th International Conference on Information Management, ICIM 2022*, pp. 160-165, 2022.
- [11] Z. Li, J. Cao and J. Xiao, "Optimization design for production logistics system of corrugated box," *Advanced Materials Research*, pp. 962-966, 2012.

- [12] A. Qamar, O. Meanazel, A. Alalawin and H. Almomani, "Optimization of Plant Layout in Jordan Light Vehicle Manufacturing Company," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, vol. 101, no. 4, pp. 721-728, 2020.
- [13] Y. Liu and Q. Zhao, "Research on logistics center layout based on SLP," *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 286, pp. 17-28, 2015.
- [14] R. Muther, C. Jungthirapanic and R. Haney, *Simplified Systematic Handling Analysis*, Kansas City: Management and Industrial Research Publications, 1994.
- [15] J. Yang, "Design on layout rearrangement of plant logistics based on the combination of SLP and SHA," *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 58-60, pp. 932-937, 2011.
- [16] Y. Jianhua and P. Lijing, "Optimizing design of layout arrangement for workshop logistics system," *Journal of Convergence Information Technology*, vol. 7, no. 13, pp. 499-507, 2012.
- [17] F. Pacheco-Colcas, M. Medina-Torres and J. Quiroz-Flores, "Production Model based on Systematic Layout Planning and Total Productive Maintenance to increase Productivity in food manufacturing companies," *ACM International Conference Proceeding Series*, pp. 299-306, 2022.
- [18] E. Granda-Gutierrez, F. Sevilla, L. González and S. Arreola, "Incorporate data analytics tools to optimize the SLP method with application to a plant of a leading global company," *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2019.
- [19] G. Gao, Y. Feng, Z. Zhang, S. Wang and Z. Yang, "Integrating SLP with simulation to design and evaluate facility layout for industrial head lettuce production," *Annals of Operations Research*, vol. 321, no. 1, pp. 2029-240, 2023.
- [20] Y. Wang, Y. Li and Y. Zhou, "Research on the facilities layout planning in MTO manufacturing industry based on genetic algorithm," *Advanced Materials Research*, vol. 695, no. 702, p. 842, 2014.
- [21] G. Bermudez, L. Rojas and J. Rodriguez, "Optimization models in layout; [Modelos de optimización de la distribución en planta]," *Iberian Conference on Information Systems and Technologies, CISTI*, 2014.
- [22] Q. Li and L. Haidong, "Workshop facility layout optimization design based on SLP and flexsim," *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology*, vol. 17, no. 8, 2016.

- [23] S. Hosseini, S. Mirzapour and K. Wong, "Improving multi-floor facility layout problems using systematic layout planning and simulation," *Communications in Computer and Information Science*, vol. 409, pp. 58-69, 2013.
- [24] S. Zhang, Y. Zheng and G. Li, "Research on distribution center layout optimization based on genetic algorithm," *Journal of Physics: Conference Series*, no. 1, 1976.
- [25] D. Gough, S. Oliver and J. Thomas, *An Introduction to Systematic Reviews*, London: SAGE Publications Ltd, 2012.
- [26] D. P. Sly, E. Grajo and B. Montreuil, "Layout design & analysis software," *IIE Solutions*, vol. 28, no. 7, pp. 18 - 25, 1996.
- [27] Z. Zhang, Z. Zhu, J. Zhang and Z. Wang, "Construction of intelligent integrated model framework for the workshop manufacturing system via digital twin," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 118, no. 9-10, pp. 3119 - 3132, 2022.
- [28] R. S. Publishing, "David Theodore Nelson Williamson," 1995.
- [29] D. L. E. Williamson, "Automated Machine Installation and Method". United States Patent 4,621,410, 11 11 1986.
- [30] G. Evans and J. Haddock, "Modelling tools for flexible manufacturing systems," *Production Planning and Control*, vol. 3, no. 2, pp. 158-167, 1992.
- [31] L. Fűkö, B. Illés and G. Wágner, "A hagyományos és rugalmas gyártórendszerek logisztikai aspektusai," *Multidiszciplináris tudományok*, vol. 10, pp. 377-381, 2020.
- [32] J. Phillips Edward, "Flexible Manufacturing Systems: An Overview," *Fall Industrial Engineering Conference, American Institute of Industrial Engineers*, pp. 639-645, 1983.
- [33] M. Zubair, *Flexible Manufacturing Systems: Planning Issues and Solutions*, Garland Publishing Inc., 1994.
- [34] N. R. Greenwood, *Implementing Flexible Manufacturing Systems*, London: MACMILLAN EDUCATION LTD, 1988.
- [35] H. Shivanand, M. Benal and V. Koti, *Flexible Manufacturing System*, New Delhi: New Age International Limited, 2006.

- [36] R. Snader Kenneth, "Flexible Manufacturing Systems: An Industry Overview," *Production and inventory management Washington, D.C.*, vol. 27, no. 4, pp. 1-9., 1986.
- [37] J. William E. Cox, "Product Life Cycles as Marketing Models," *The Journal of Business*, vol. 40, no. 4, pp. pp. 375-384, 1967.
- [38] Z. T. Dr. Halassy Béla, *Döntési táblázatok, Magánkiadás*, 1973.
- [39] D. 66241, *Entscheidungstabelle*, 1979.
- [40] E. H. Glaessgen and D. Stargel, "The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles," in *Paper for the 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*.
- [41] S. Mohsen & Arezoo and R. Behrooz & Dastres, "Digital Twin for Smart Manufacturing, A Review. 10.1016/j.smse.2023.100017.," 2023.
- [42] F. Tao, M. Zhang and A. Nee, *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*, London: Academic Press, 2019..
- [43] V. D. I. e.V, *VDI 3633 Blatt 1 Simulation Von Logistik, Materialfluss und Produktionssystemen*, Verein Deutscher Ingenieure e.V, 2014.
- [44] E. Sujová, E. Střihavková and H. Čierna, "An Analysis of the Assembly Line Modernization by Using Simulation Software," *Manufacturing Technology, October 2018, Vol. 18, No. 5, ISSN 1213-2489*.
- [45] M. Musil, V. Laskovsky and P. Fialek, "Analysis of logistic processes using the software tecnomatix plant simulation," *13th International Conference on Industrial Logistics*, pp. 195-200, 2016.
- [46] M. Gubán, G. Kovács and S. Kot, "Simulation of Complex Logistical Service Processes," *Management and Production Engineering Review*, pp. 19-29., <https://doi.org/10.1515/mp-2017-0014>, 2017.
- [47] Siemens, *Plant Simulation version 2302 Help*, Siemens, 2023.
- [48] K. El Emam, L. Mosquera and R. Hoptroff, *Practical Synthetic Data Generation: Balancing Privacy and the Broad Availability of Data*, O'Reilly Media, 2020.

- [49] J. Jordon, F. Houssiau, L. Szpruch, M. Bottarelli, G. Cherubin, C. Maple, S. N. Cohen and A. Weller, "Synthetic Data - what, why and how?," The Alan Turing Institute, The Royal Society, London, 2022.
- [50] C. Ka & Rabaev and H. Marsel & Pratama, "Generation of synthetic manufacturing datasets for machine learning using discrete-event simulation," *Production & Manufacturing Research*, pp. 337-353. 10.1080/21693277.2022.2086642., 2022.
- [51] K. Abdulrahman, *Synthetic Data for Machine Learning: Revolutionize your approach to machine learning with this comprehensive conceptual guide*, Packt Publishing, 2023.
- [52] L. Jianxun & Cheng and K. K. & R. B. Wenjie & Lai, "Multi-AGV Flexible Manufacturing Cell Scheduling Considering Charging.," *Mathematics*. 10. 10.3390/math10193417., 2022.
- [53] H. Zhang, H. Li and L. Peh, "Study on Li-ion battery intelligent management system based on AGV," *Applied Mechanics and Materials*, pp. 1101-1104, <https://doi.com/10.4028/www.scientific.net/AMM.651-653.1101>, 2014.
- [54] B. Harit and C. R. K., "Thermal management systems for EV's and HEV's," *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, VOL. 14, NO. 1, JANUARY 2019, ISSN 1819-6608, pp. 265-269..
- [55] "AGV battery - Factors to consider before making a purchase," Tycorun Energy, [Online]. Available: <https://www.takomabattery.com/agv-battery/#Factors-affecting-the-performance-of-AGV-battery>. [Accessed 23 03 2024].
- [56] "ELB ENERGY GROUP (SHENZHEN) LIMITED," ELB ENERGY GROUP (SHENZHEN) LIMITED, [Online]. Available: <https://www.ecolithiumbattery.com/product/20ah-lto-battery/>. [Accessed 23 03 2024].
- [57] L. Timilsina, P. Badr, H. P.H., G. Ozkan, B. Papari and C. Edrington, "Battery Degradation in Electric and Hybrid Electric Vehicles: A Survey Study," *IEEE Access*, vol. 4, no. 11, pp. 42431 - 42462, 2016.
- [58] SAFELOG, "AGVM4 Automated Guided Vehicle Data Sheet," SAFELOG, Markt Schwaben, 2024.
- [59] R. Marsel & Pratama and K. Handy & Chan, "Leveraging Synthetic Data and Machine Learning for Shared Facility Scheduling," no. 10.1007/978-981-99-8324-7_34, 2024.

- [60] B. Vishnupriya & Chen and J. Cheng & Camelio, “Enhancing Manufacturing Operations with Synthetic Data: A Systematic Framework for Data Generation, Accuracy, and Utility,” *Frontiers in Manufacturing Technology*, no. 10.3389/fmtec.2024.1320166, 2024.
- [61] N. I. o. S. a. Technology, “Cybersecurity for Smart Manufacturing Systems,” National Institute of Standards and Technology, 17 12 2021. [Online]. Available: <https://www.nist.gov/programs-projects/cybersecurity-smart-manufacturing-systems>. [Accessed 09 05 2024].
- [62] C. a. I. S. Agency, “Critical Manufacturing Sector Security Guide,” CISA, 2020.
- [63] A. S. Bangsowmi, Tecnomatix Plant Simulation Modeling and Programming by Means of Examples, Second Edition, <https://doi.com/10.1007/978-3-030-41544-0>, 2020.
- [64] Sharp, “Smart AGV <XF Series>,” Sharp, [Online]. Available: https://global.sharp/business/en/agv/products/xf_series/. [Accessed 15 07 2023].

9 Saját irodalomjegyzék

- [S1] Gy. Czifra, Zs. Molnár, Covid-19 and Industry 4.0, Research Papers Faculty of Materials Science and Technology in Trnava, 2020, Volume 28, Number 46, <https://doi.org/10.2478/rput-2020-0005>
- [S2] Gy. Czifra, Zs. Molnár, M. Mlkva, P. Szabó, “Dehumilization and Humilization in the context of Industry 4.0 and Industry 5.0”, <https://doi.org/10.2478/rput-2023-0002>
- [S3] Zs. Molnár, P. Tamás, B. Illés, „Building a Reusable Data Model to Support Systematic Layout Planning with Discrete Event Simulation of Flexible Manufacturing Systems”, Hungarian Journal of Industry and Chemistry 49 : 2 pp. 97-100. , 4 p. (2021), <https://doi.org/10.33927/hjic-2021-29>
- [S4] Zs. Molnár, P. Tamás, B. Illés, „The Life cycle of the layouts of flexible and reconfigurable manufacturing areas and lines,” Advanced Logistic Systems – Theory and Practice, Vol. 15, No. 1 (2021), pp. 20-29., <https://doi.org/10.32971/als.2021.003>
- [S5] Zs. Molnár, P. Tamás, B. Illés, “Using the SLP method in the design of the Flexible Manufacturing Cells”, Cutting & Tools in Technological System, 2021, Edition 95, <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2021.95.03>
- [S6] Zs. Molnár, P. Tamás, B. Illés, “The always changing data problem of using AI in manufacturing – using synthetic data from the digital twin to feed AI models”, Advanced Logistic Systems –Theory and Practice, Vol. 18, No. 3 (2024), pp. 19-28, <https://doi.org/10.32971/als.2024.025>
- [S7] Zs. Molnár, P. Tamás, B. Illés, “Design methodology for the control logic of Flexible Production Systems and related logistics”, Advanced Logistic Systems – Theory and Practice, Vol. 18, No. 1 (2024), pp. 107-118., <https://doi.org/10.32971/als.2024.011>
- [S8] Zs. Molnár, P. Tamás, B. Illés, “Planning of flexible manufacturing lines with AGV material handling for the entire life cycle”, Acta logistica - International Scientific Journal about Logistics, Vol. 12. No. 1. (2025), pp. 11-19., <https://doi.org/10.22306/al.v12i1.563>
- [S9] Zs. Molnár, P. Tamás, „Kritikus lánc módszer alkalmazása rugalmas gyártórendszerek puffer méretének meghatározására”, Digitalizáció a logisztikában (2024), Miskolc-Egyetemváros, Magyarország : Miskolci Egyetem, Logisztikai Intézet (2024) pp. 50-57. , 8 p.