DOI: 10.14750/ME.2026.012

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR

RUGALMAS GYÁRTÓRENDSZEREK TERVEZÉSI MÓDSZEREINEK TOVÁBBFEJLESZTÉSE IPAR 4.0 ESZKÖZÖK ALKALMAZÁSÁVAL

PH.D. ÉRTEKEZÉS

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

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Tartalomjegyzék

Nyilatkozat 4

Köszönetnyilvánítás 5

Témavezetői ajánlás 6

Terminológia és rövidítés szótár 7

1 Bevezetés és motiváció 9

2 Irodalmi áttekintés 11

3 Kapcsolódó területek és módszerek áttekintése 21

3.1 Rugalmas gyártórendszerek áttekintése 21

3.2 Termék életciklus matematikai leképezése 26

3.3 Szisztematikus elrendezés-tervezés 27

3.4 Döntési táblák 33

3.5 Digitális iker és szimuláció 34

3.6 Neurális hálók használata szimulációval 37

4 Rugalmas gyártórendszerek tervezésének eljárása 39

4.1 Rugalmas gyártórendszerek tervezésének kihívásai 39

4.2 Rugalmas gyártórendszerek tervezési eljárása 41

4.3 Tervezési adatok 45

4.4 Életciklus és kapacitás elemzése 47

4.4.1 Rugalmas gyártórendszerek üzleti és életciklus vizsgálata 47

4.4.2 Kapacitásszükséglet meghatározása életciklus alapján 54

4.5 Aktivitás helyek és honnan-hova táblázat 58

4.6 Gépek méretezése 58

4.7 Elrendezés-tervezés 60

4.8 Logisztikai méretezés 65

4.8.1 Puffer méretezése 66

4.8.2 AGV méretezés 71

DOI: 10.14750/ME.2026.012

4.9 Információáram 79
4.10 Vezérlő rendszerek tervezése 80
4.10.1 Döntési táblák 80
4.10.2 Neurális hálók használata a vezérlésben 82
4.10.3 Döntési táblák és neurális hálók kapcsolata 86
4.11 Energiahatékonyság 88
4.12 Informatikai biztonságra tervezés 89
4.13 Karbonlábnyom elemzése 91
4.14 Rugalmas gyártórendszerek komplexitásának mérőszáma 91
4.15 Rugalmas gyártórendszer tervezési projekt kezelése 93
5 Az értekezés tézisei 95
6 Thesis of the Dissertation 96
7 Összefoglalás, további kutatási lehetőségek 97
8 Summary and further research directions 99
9 Mellékletek 101
9.1 Alkalmazási példa 1. – Szükséges gyártási kapacitás meghatározása 101
9.2 Alkalmazási példa 2. – Döntési tábla alkalmazása 104
9.3 Alkalmazási példa 3. – Puffer méretezés 107
9.4 Alkalmazási példa 4. – AGV méretezés 112
9.5 Alkalmazási példa 5. – Neurális háló és döntési tábla vezérlési logikában 116
10 Irodalomjegyzék 122
11 Saját irodalomjegyzék 128
12 Ábrajegyzék 129
13 Táblázatjegyzék 131

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Nyilatkozat

Alulírott Molnár Zsolt kijelentem, hogy ezt a doktori értekezést magam készítettem, és abban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint vagy azonos tartalommal, de átfogalmazva más forrásból átvettem vagy felhasználtam, egyértelműen a forrás megjelölésével láttam el és hivatkoztam.

Budapest, 2025. november 10.

……..

Molnár Zsolt

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Köszönetnyilvánítás

A jelen doktori értekezés a Miskolci Egyetem Logisztikai Intézetében készült a Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola képzésének keretein belül. Szakmai és emberi támogatásukért köszönetem illeti témavezetőimet, Dr. Illés Béla és Dr. Tamás Péter professzor urakat. Emellett köszönöm az intézet minden kollégájának támogatását, akik segítették munkámat. Természetesen a legnagyobb köszönet édesanyámat Dr. Petes Alizt illeti, akitől a tudás iránti fogékonyságomat örököltem, és aki végig mindenben támogatott ennek a doktori értekezésnek az elkészülte során.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Témavezetői ajánlás

Molnár Zsolt „Rugalmas gyártórendszerek tervezési módszereinek továbbfejlesztése Ipar 4.0 eszközök alkalmazásával" című PhD-értekezéséhez

Molnár Zsolt a Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola Anyagáramlási rendszerek és logisztikai informatika tématerületéhez kapcsolódóan kezdte meg PhD-tanulmányait. Az értekezés témája a rugalmas gyártórendszerek tervezési módszereinek korszerűsítése és továbbfejlesztése a digitális iker, a szimulációs technológiák és az Ipar 4.0 eszköztárának integrációjával.

A kutatási téma kijelölésében fontos szerepet játszott Molnár Zsolt több mint húsz éves ipari tapasztalata a digitális gyártási rendszerek bevezetése és támogatása terén. A jelölt szakmai háttere és motivációja jelentős mértékben hozzájárult ahhoz, hogy a gyártórendszerek tervezéséhez kapcsolódó módszertani hiányosságokat tudományos igényességgel és gyakorlatorientált módon közelítse meg.

Kutatási munkájának alapját az SLP (Systematic Layout Planning) módszer korszerű értelmezése és kiterjesztése adja, amelyet a digitális eszközökkel támogatott tervezési eljárásokkal ötvözött. A dolgozat újszerűsége a rugalmas gyártórendszerek életciklus-alapú kapacitástervezésében, az Ipar 4.0 megoldások integrációjában, a logisztikai és vezérlési folyamatok továbbfejlesztésében, valamint a neurális hálók és szimulációs eszközök alkalmazásában érhető tetten.

Az értekezés eredményei között kiemelhetők:

- a rugalmas gyártórendszerek tervezési keretrendszerének továbbfejlesztése,
- digitális ikerhez kapcsolódó tervezési és ellenőrzési modulok bemutatása,
- logisztikai kapacitás- és anyagmozgatási tervezési módszerek továbbfejlesztése,
- neurális hálók és döntési táblák integrációja a vezérlési logika támogatására,
- ipari példákon keresztüli módszertani validálás.

Molnár Zsolt a kutatómunka során nagy önállósággal, következetesen és magas színvonalon dolgozott. Tudományos tevékenysége publikációkban és konferenciaszereplésekben is tükröződik, valamint erős ipari kapcsolódással rendelkezik. A kidolgozott eljárásrendszer mind elméleti, mind gyakorlati szempontból releváns, és hozzájárul a hazai gyártási rendszerek digitalizációjához. A benyújtott értekezés a PhD fokozatszerzés követelményeinek megfelel, így témavezetőként a dolgozat nyilvános védésre bocsátását támogatom.

Miskolc, 2025.10.14.

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

Prof. Dr. habil. Illés Béla
professor emeritus

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Terminológia és rövidítés szótár

Ebben a szószedetben gyűjtöttem össze az értekezésben használt angol nyelvű kifejezéseket és azok általam használt és javasolt magyar terminológiát.

Az értekezésben, ahol lehetett a megfelelő magyar kifejezést használtam.

Angol	**Magyar**
Action	Tevékenység
Activity area	Aktivitás terület/tevékenység terület
Activity relationship diagram	Aktivitás kapcsolati diagram
Artificial Neural Network (ANN)	Mesterséges neurális háló
Artificial intelligence (AI)	Mesterséges intelligencia (MI)
Automated guided vehicle (AGV)	Automatizáltan irányított jármű
Availability	Rendelkezésre állás
Battery degradation	Akkumulátor öregedés
Bill of Material (BOM)	Darabjegyzék vagy tételjegyzék
Bill of Process (BOP)	Műveleti vagy folyamat jegyzék
Condition	Feltétel
Control relationship diagram	Vezérlési kapcsolati diagram
Critical chain	Kritikus lánc
Critical path	Kritikus útvonal
Decision table	Döntési tábla
Discrete event based simulation (DES)	Diszkrét esemény vezérelt szimuláció
From-to Chart	Honnan-hová táblázat
Flexible Manufacturing	Rugalmas gyártás
Flexible Manufacturing System (FMS)	Rugalmas gyártórendszer
Information flow diagram	Információ áram diagram
In-line layout	Soros elrendezés
Ladder layout	Létra elrendezés
Layout	Elrendezés
Level of Detail (LOD)	Részletességi szint
Loop layout	Zárt hurok vagy hurok elrendezés
Mean Time between Failures (MTBF)	Meghibásodások közötti átlagos idő
Mean Time to Repair (MTTR)	Átlagos javítási idő
Neural Network (NN)	Neurális háló
Open field layout	Nyitott terű elrendezés
Process Chart	Folyamat grafikon
Processing time	Műveleti idő
Relationship diagram	Kapcsolati diagram
Robot centric layout	Robot központú elrendezés
Routing	Termék útvonal vagy Útvonal
Programmable logic controller (PLC)	Programozható logikai vezérlő

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Rule	Szabály
Space relationship diagram	Hely kapcsolati diagram
Systematic Handling Analysis (SHA)	Szisztematikus anyagkezelés
Systematic Layout Plannig (SLP)	Szisztematikus elrendezés-tervezés
Systematic Literature Review	Szisztematikus irodalomkutatás

DOI: 10.14750/ME.2026.012

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, autóipari 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. Chicagoban 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 pici múzeumában található.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

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 célomat 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 haló 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.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

2 Irodalmi áttekintés

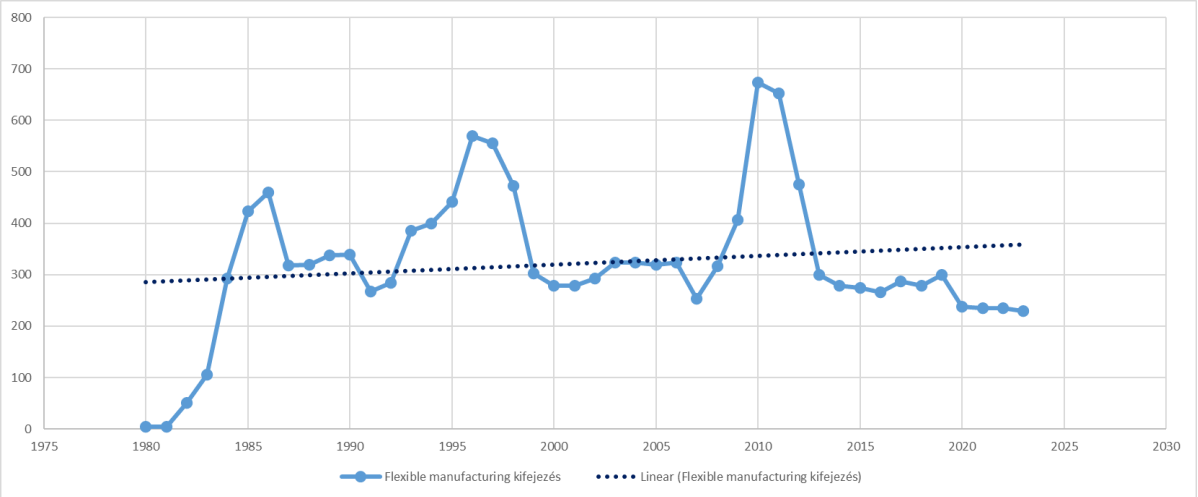
Az irodalomkutatás során, a kutatás alapjául szolgáló területeket és azok szakirodalmát tekintettem át. A szakirodalmi kutatás során elsődleges forrásként a Scopus adatbázisra támaszkodtam. A kutatás évei alatt többször áttekintettem a rendelkezésre álló szakirodalmi forrásokat, a jelen összefoglalásban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

Az irodalmi áttekintésben követtem a szisztematikus irodalomkutatás lépéseit [1] [2], amelyek összefoglalva az 1. ábrán láthatók.

1. ábra A szisztematikus irodalomkutatás folyamata

Az első keresési kifejezés, amit megvizsgáltam a „flexible manufacturing” volt, amely a grafikonon látható keresési eredményt adta (2. ábra). Jól látható, hogy a fogalom gyakran használt, a terület igen széles körű szakirodalommal rendelkezik. A vizsgált időszak az 1980 és 2023 közötti időszak volt.

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



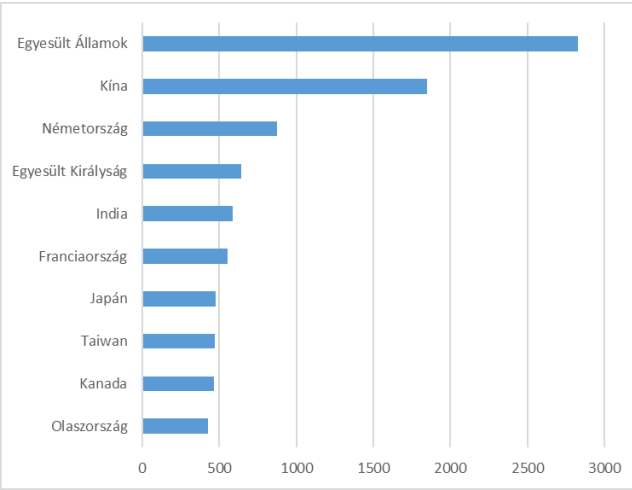
2. ábra Találatok éves bontásban a "Flexible manufacturing" kifejezésre a Scopus adatbázisban

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

DOI: 10.14750/ME.2026.012

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.

A rugalmas gyártórendszer jellegű termelő területekre szoktak agilis és újra konfigurálható gyártó rendszerekként is hivatkozni. Véleményem szerint azok a fogalmak mást takarnak és nem feleltethetők meg egyértelműen a rugalmas gyártórendszer fogalmának. Ennek megfelelően azokkal kapcsolatos kereséseket nem végeztem.



Ország	Helyezés
Kína	1
Egyesült Államok	2
Japán	3
Németország	4
India	5
Dél-Korea	6
Olaszország	7
Franciaország	8
Egyesült Királyság	9
Indonézia	10

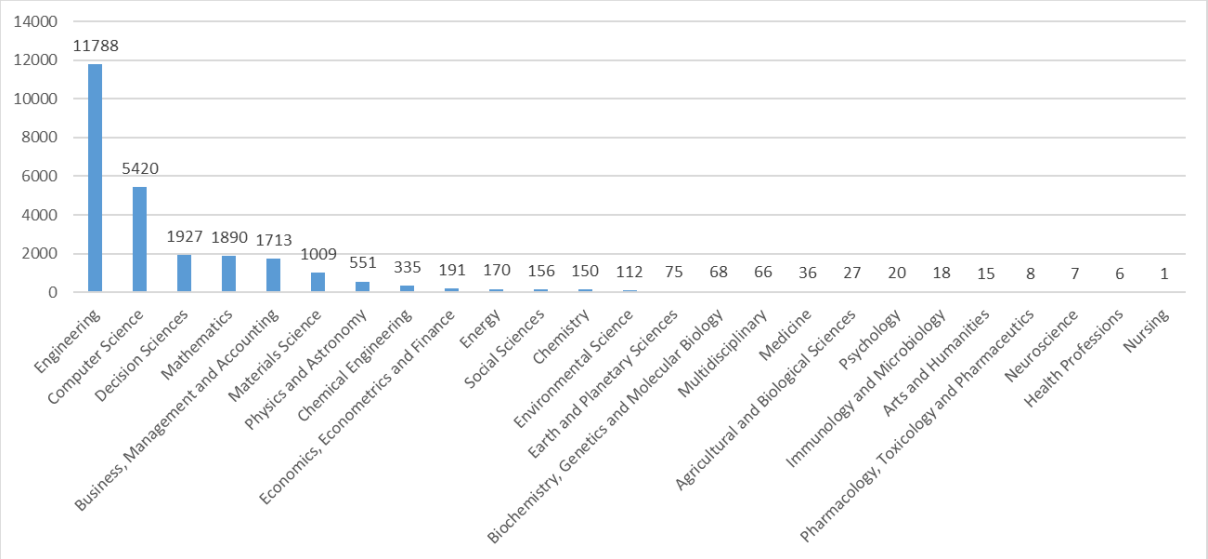
3. ábra Vonatkozó publikációk és ipari termelés kapcsolata országonként

A rugalmas gyártórendszerek kutatásának fontosságát alátámasztja az is, hogy a kutatások száma hogyan viszonyul az országok ipari-gyártási fejlettségéhez. A 3. ábra mutatja, hogy mely országokban készült a legtöbb publikáció a rugalmas gyártórendszerekkel kapcsolatban. Az ábra jobb oldala a 10 legnagyobb gyártó országot mutatja 2023-ból [3]. Láthatóan a 10 legnagyobb gyártó ország közül 8 ország rajta van a rugalmas gyártórendszerekkel kapcsolatban legtöbbet publikáló országok között,

DOI: 10.14750/ME.2026.012

amelyek az ábra bal oldalán találhatók. Tény, hogy a legnagyobb gazdasági erővel rendelkező országok szinte egyértelműen megjelennek egy ilyen listán, de nem lehet nem felfigyelni arra, hogy például Olaszország és Japán is megtalálható mindkét listán, ezek pedig a nagy gyártó országokhoz képest jóval kisebb országok, ám fejlett iparral rendelkeznek.

A 4. ábra alapján látható, hogy a rugalmas gyártórendszerekhez kapcsolódó dokumentumok számos tudományághoz kapcsolódnak. Ennek részben az az oka, hogy a téma igen szerteágazó, mivel minden tudományág (egészségügy, energia szektor, mezőgazdaság stb.) számára kell gyártani, és a gyártás rugalmassága minden iparág számára fontos.



4. ábra Rugalmas gyártórendszerrel kapcsolatos kutatások tudományágak szerint

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 megközelítésem 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

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Az Immer által kidolgozott alaplépések módszere (Immer's Basic Steps) (1950) a gyártósorok elterjedésének idejében jelent meg, nem véletlen, hogy azok tervezésére valósít meg egy módszert. A módszer három lépése a következő [4]:

1. A problémás folyamat papírra vetése
2. Anyagáram irányok felrajzolása
3. Anyagáram irányok helyettesítése konvejorokkal

Nadler ideális rendszere (Nadler's Ideal System Approach) (1961) egy olyan egymásra épülő megközelítést alkalmaz, amely:

1. megcéloz egy elméletileg ideális rendszert,
2. koncepciót készít, egy végcél ideális rendszert,
3. megtervez egy technológiailag működőképes ideális rendszert és
4. telepít egy javasolt rendszert [4].

Összességében törekszik a legjobb megoldásra, de lépésről lépésre a megvalósíthatóság céljából enged az eredeti elméletileg ideális rendszerből.

Az előző módszerrel egy időben publikált Reed gyár elrendezés módszere (Reed's Plant Layout Procedure) (1961) a következő lépéseket javasolja az elrendezés-tervezés során [4]:

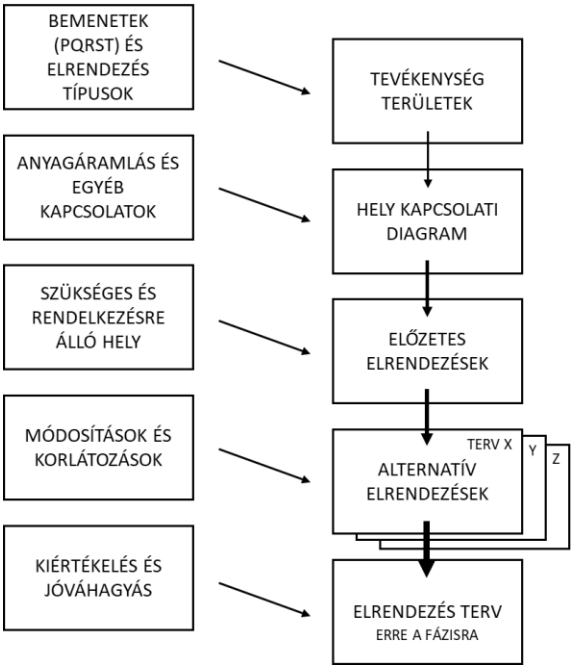
1. A gyártandó termék elemzése
2. A gyártási folyamat meghatározása
3. Elrendezés-tervezési grafikonok elkészítése
4. Munkahelyek tervezése
5. Tárolóhely igény elemzése
6. Minimális közlekedési folyosó szélességének meghatározása
7. Irodai terület igények meghatározása
8. Személyzeti helyiség és szolgáltatási igények meghatározása
9. Üzemi szolgáltatások felmérése
10. További fejlesztések biztosítása

Reed kiemeli, hogy a hatékony tervezéshez fontos, hogy a műveleti idők sztenderdek legyenek, illetve, hogy a folyamat során a gép és a dolgozói igény legyen kiegyensúlyozva.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

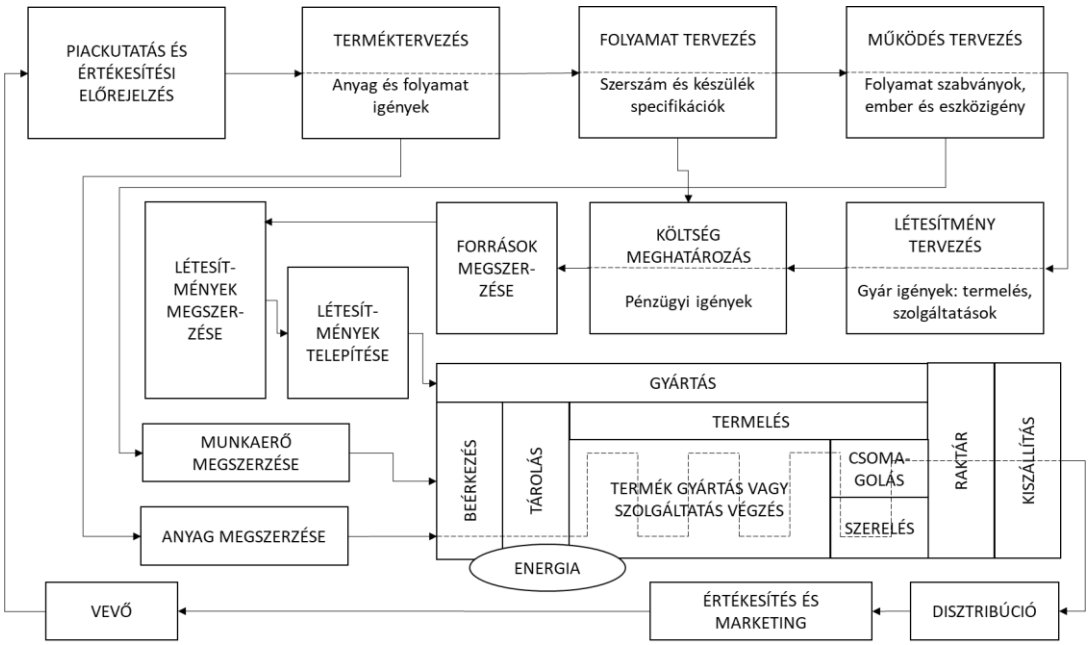
Muther szisztematikus elrendezés-tervezés módszere (Muther's Systematic Layout Planning) (1961) az alábbi lépéseket követi [5]:

1. Alapadatok és aktivitások összegyűjtése
2. Anyagáram elemzése
3. Aktivitás-kapcsolat diagram elkészítése
4. Kapcsolat diagram elkészítése
5. Hely igény felmérése
6. Rendelkezésre álló hely felmérése
7. Hely kapcsolat diagram elkészítése, előzetes elrendezések elkészítése
8. Kényszerek és gyakorlati korlátok figyelembevétele
9. Elrendezés alternatívák készítése
10. Kiértékelés



5. ábra A Systematic layout Planning módszer folyamata [5]

Apple gyár elrendezés eljárása (Apple's Plant Layout Procedure) (1977) [6] hasonló folyamatot követ, mint Muther, azonban szélesebb körben foglalkozik a kapcsolódó menedzsment feladatokkal, és kevésbé mélyen foglalkozik a tervezés műszaki aspektusaival (6. ábra).



6. ábra Az Apple-féle gyár elrendezés-tervezési folyamat [6]

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Ennek a módszernek a lépései a következők:

1. Alapadatok összegyűjtése
2. Alapadatok elemzése
3. Gyártási folyamat felépítése
4. Anyagáramminta megtervezése
5. Általános anyagmozgatási terv készítése
6. Berendezésdarabszám-szükséglet meghatározása
7. Az egyes munkahelyek, állomások megtervezése
8. Az anyagmozgató eszközök pontos kiválasztása
9. Műveletek csoportokba szervezése
10. Aktivitás kapcsolatok tervezése
11. Tárolóhely-szükséglet elemzése
12. Szolgáltatások és kiegészítő tevékenységek tervezése
13. Helyszükséglet elemzése
14. Aktivitások hozzárendelése a teljes területhez
15. Épülettípusok átgondolása
16. Mester elrendezés átgondolása
17. Elrendezés kiértékelése, igazítása és ellenőrzése
18. Jóváhagyás
19. Telepítés
20. Az elrendezés karbantartása és életciklusának követése

Apple is kiemeli, akárcsak a többi módszer, hogy a lépések nem feltétlenül a fenti sorrendben követik egymást, és az egyes lépések között, időben átfedés is lehet. Szintén fontos, hogy bizonyos részei a tervezési folyamatnak iteratívak. Egy adott lépés eredményétől függően elképzelhető, hogy egy korábbi lépésre vissza kell lépni a módosításhoz.

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 fedi 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

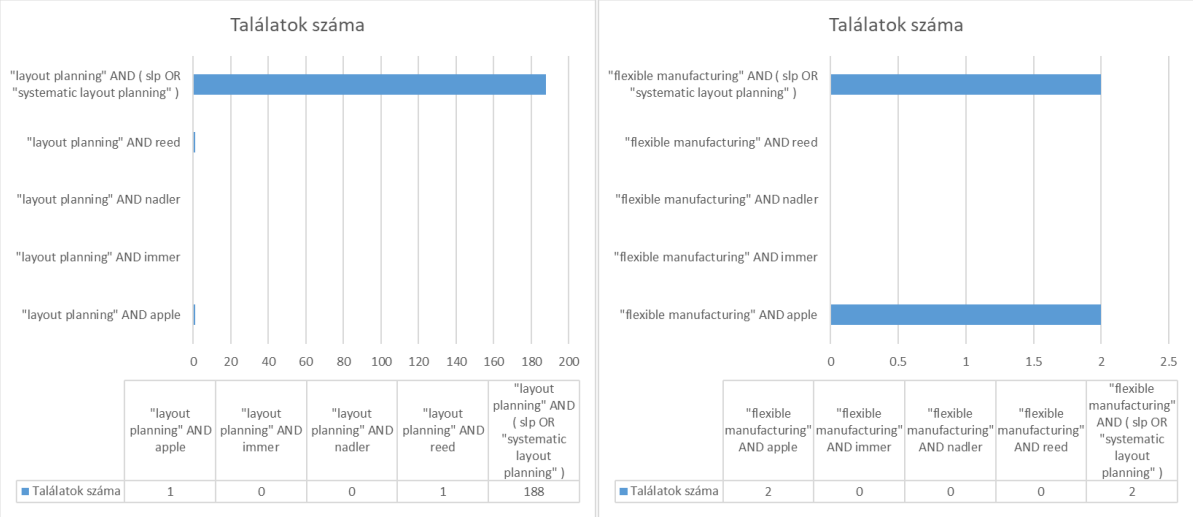
DOI: 10.14750/ME.2026.012

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, ezek a további fejlesztések és az anyagkezelési szempontok figyelembevétele.

Az irodalom feldolgozása során ezeken túlmenően vizsgáltam, hogy a korábban leírt elrendezés-tervezési módszertanokat mennyire használtak kutatás céljára, melyek azok, amelyeket kutatók kibővítettek vagy továbbfejlesztettek (7. ábra).



7. 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.

A 145 dokumentumot további két nagy csoportba soroltam, a hagyományos alkalmazás és a digitális alkalmazás csoportokba. A dokumentumok áttekintése során látható, hogy az SLP módszer számos iparágban és területen használható.

A hagyományos alkalmazás csoportba kerültek azok a cikkek, összesen 96, amelyek az SLP módszert az eredeti papír alapú formájában alkalmazták. Ezek között több cikk is igyekezett más módszerekkel kombinálva továbbfejleszteni a módszert.

Az SLP módszer az 5S módszerrel került kiegészítésre [8] [9] azzal a céllal, hogy az elrendezésen belül a dolgozói munkahelyek jobban használhatók legyenek.

A módszert a CONWIP és a Kanban módszerek felhasználásával, a készletek csökkentése és a fölösleges dolgozói mozgás és anyagmozgatás csökkentése irányába fejlesztették tovább [9].

Az SLP módszert a Lean koncepcióval igyekeztek összevonva alkalmazni [10]. Így egy, már meglévő elrendezésen - a gyártási folyamatok standardizálásával - az 5S és a továbbfejlesztés érdekében több PDCA ciklust használva értek el jelentős eredményt, a teljes átfutási idő csökkentésével. A csökkenés legnagyobb része az elrendezés átalakításából, és ezzel a szállítási távolságok és idők csökkenéséből származott.

Több kutatás is foglalkozott az SLP módszer utolsó lépésében kapott elrendezés-alternatívák kiértékelésének módjával, pontozási rendszert [11] vagy több paraméteres súlyozott kritérium rendszert használtak [12] az elrendezés-alternatívák összevetésére.

Az SLP módszer alkalmazhatóságát logisztikai központ kiszolgálásának fejlesztésében is vizsgálták [13].

Az SLP módszert kiegészítették a kapcsolódó SHA (Systematic Handling Analysis) [14] módszerrel is az anyagmozgatási idők jobb meghatározása érdekében. Erre gyakorlati példa is készült [15] az SLP elrendezés tervezését együtt vizsgálva az anyagmozgatás SHA módszerrel történő leírásával, ami a vizsgált vállalat logisztikai kiszolgálási folyamatainak fejlesztésére szolgált. Hasonló példa készült [16] nagyobb kapacitású gyártásra is.

A digitális alkalmazás csoportba 49 dokumentum került. Ezek közös jellemzője az, hogy az SLP módszer alkalmazása során felhasználtak valamilyen digitális eszközt. A felhasznált digitális eszközök széles palettán mozogtak az Excel makrók és megoldóktól a komplett digitális iker létrehozására alkalmas diszkrét esemény vezérelt szimulációig. Ezek a kutatások számomra kiemelten fontosak voltak, mivel ezek is jól mutatják, hogy a gyártási folyamatok és az elrendezés-tervezés fontos része a digitális ikerpár és az ahhoz kapcsolódó vizsgálatok.

Vizsgálták azt, hogy az élelmiszeriparban az SLP módszer hogyan kapcsolható össze a Lean módszerekkel és azon keresztül a karbantartás tervezéssel [17]. A karbantartást (tisztítás) az

DOI: 10.14750/ME.2026.012

élelmiszeriparban bevett gyakorlatnak megfelelően a sztenderd folyamat részeként kezelték. A kidolgozott módszerhez a gyártási sorrendet szimulációs modellben hozták létre, és így tesztelték az eredményeket egy COVID előtti és a COVID által érintett üzleti környezetben.

Genetikus algoritmus alapú módszert többen [18] [19] használtak elrendezés-tervezés részfeladatainak vizsgálatára. A genetikus algoritmushoz szinte kivétel nélkül valamilyen eseményvezérelt szimulációs szoftvert használtak a kutatók (Matlab, Plant Simulation, Simul8, Excel megoldó, Flexsim,…).

Alkalmazott példaként egy ipari projektben a manuális gép és gépcsoport lokáció kiválasztásának felgyorsítására alkalmaztak genetikus algoritmust [18].

Egy másik ipari példában [19] az optimalizálást az egyes gyártóhelyek pozíciójának változtatására és ezzel a szállítási útvonal csökkentésére használták.

A genetikus algoritmus alapú erőforrás helyzet optimalizálást többen is használták [20] [21] [22] [23], általában felhasználva az adott szoftvereszközben készen meglévő genetikus algoritmust.

Többen a raktározási részfeladatokat és raktár elrendezési feladatokat vizsgáltak ilyen módon, például egy disztribúciós központ elrendezését elemezve [24], az anyagáram elemek pozícióját helyezve a központba.

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 [25] foglaltam össze (8. ábra).

8. 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

DOI: 10.14750/ME.2026.012

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 [26] [27].

A fenti irodalmi 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.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

3 Kapcsolódó területek és módszerek áttekintése

A kutatás során számos terület tudásanyagára és korábbi eredményeire támaszkodtam. Ezeknek a kutatás szempontjából fontos, főbb elemeit foglalja össze ez a fejezet.

3.1 Rugalmas gyártórendszerek áttekintése

A vevői igények az elmúlt évtizedekben nagyon sokat változtak. Számos gyártó esetében egy autó rendelésekor annak szinte minden paraméterét külön lehet konfigurálni. A DELL volt a számítógépes gyártók közül az első, aki lehetővé tette az ügyfelek számára a számítógépek konfigurálását a rendeléskor. Még ezen is továbblépett a NIKE, amikor színében, mintájában, cipőfűző jellemzőiben teljesen konfigurálható cipőket kezdett árulni. Ezek az üzleti modellek sikeresek lettek, hiszen mindenki szeret egyedi lenni, és az egyediség által kifejezni a személyiségét. Ráadásul az egyediséget a vásárlók gyorsan és olcsón szeretnék. Bár a vevők boldogok ezekkel az új rugalmas vásárlási lehetőségekkel, közben komoly kihívások elé állítják a gyártó cégeket, akiknek ezeket az egyedi igényeket kell megvalósítaniuk a sorozatgyártásban.

A legfontosabb trendeket az alábbi három pontban lehet összefoglalni a gyártásban:

- növekvő termék komplexitás, összetettség,
- növekvő nyomás a költségek csökkentésére,
- rövidebb piacra kerülési idő és lerövidült termék életciklus.

Az igények rugalmasságának növekedésére egyértelműen csak a kiszolgálás rugalmasságával lehet válaszolni, ami magával vonja a gyártás rugalmasságának igényét.

A vállalatoknak az egyre erősebb versenyben előbb-utóbb management szinten ki kell választaniuk néhány olyan kompetenciát, amelyben az adott vállalat képes versenyezni, amelyik területen a versenytársainál jobb teljesítményt tud nyújtani. Ilyen kompetenciák lehetnek az ár, a minőség, extra szolgáltatások stb. Azzal, hogy a vevői igények egyre inkább rugalmassá válnak egyre több vállalat érzi úgy, hogy ilyen kulcs kompetencia a rugalmasság. Gyártó cégek esetében a rugalmasságnak két fő típusát különböztethetjük meg:

- termék rugalmassága (konfiguráció alapon széles termékpaletta gyártásának képessége)
- kapacitás rugalmassága (a kereslet mennyiségi változásaira való reagálás)

Az igazi rugalmasság, ha a gyártó cég mindkét típusú rugalmasságot teljesíteni tudja.

Mindezek miatt egyre fontosabbá válik, hogy a gyártósorok minél rugalmasabbak legyenek. A rugalmasság fő szempontja, hogy a lehető legrövidebb idő alatt és a lehető legalacsonyabb költség mellett lehessen új terméket bevezetni az adott gyártósorra. Számos olyan technológia tört előre az elmúlt években, amely nagy mértékben támogatja a gyártósorok rugalmasságát. Ezek többek között:

DOI: 10.14750/ME.2026.012

- a növekvő automatizáltsági szint, főleg a szerelés területén
- az additív megmunkálási technológiák előretörése, amelyek nem csupán egyszerűsítik a folyamatokat, hanem növelik azok stabilitását is
- az ipari automatizálási eszközök fejlődésének köszönhetően komplex vezérlési logikák megvalósíthatósága, szükség esetén neurális háló alapú mesterséges intelligencia komponensek integrálásának lehetősége

Fontos kiemelni, hogy a rugalmas gyártórendszerek a termékek sokfélesége és rövid életciklusa miatt sokkal jellemzőbbek a diszkrét gyártásra, mint a folyamatalapú gyártásra. Ennek megfelelően ebben az értekezésben a diszkrét gyártással foglalkozom.

A rugalmas gyártórendszerek (Flexible Manufacturing Systems, rövidítve FMS) eredete az 1960-as évekre vezethető vissza, amikor az első számítógéppel vezérelt gépeket fejlesztették ki a gyártásban való felhasználásra. Ezek a gépek sokféle feladat elvégzésére voltak képesek, és sokkal rugalmasabbak voltak, mint a hagyományos gyártóberendezések. Az FMS a termelési folyamatok nagyobb alkalmazkodóképességének és hatékonyságának igényére adott válaszként fejlődött ki.

A rugalmas gyártással kapcsolatban Jerome H. Lemelson, amerikai ipari mérnök és feltaláló dolgozta ki az alapokat és az 1950-es évek elején számos kapcsolódó szabadalmat nyújtott be. Eredeti terve egy robot alapú rendszer volt, amely képes hegeszteni, szegecselni, szállítani és ellenőrizni az iparcikkeket.

Az első valódi FMS a Molins Company által az Egyesült Királyságban 1967-ben készített gép volt, amelynek tervezése David Theodore Nelson Williamson nevéhez fűződik [28]. Ez a rendszer a System-24 nevet, a napi 24 órában való felügyelet nélküli működési képessége miatt kapta. A rendszer a Molins cég számára készült és a fejlesztést szabványként is bejegyezték [29].

A szabvány bevezetőjében Williamson így foglalja össze a találmányának a lényegét [29]: „Egy rendszer, amely több numerikus vezérlésű szerszámgépet tartalmaz, amelyekben különböző a munkadarabok a megfelelő sorrendben a megfelelő műveletekkel kerülnek gyártásra úgy, hogy a darabokat egységes paletták juttatják el a gépekbe. Szállítóeszközök juttatják el a palettákat a szerszámgépekhez, a tárolókhoz és a munka vezérlő állomásokhoz, ahol a darabok a tárolókból felkerülnek a palettákra. A szerszámtárakból is szállítóeszköz juttatja el a szerszámokat a gépekhez. A szállítási és a megmunkálási műveletek számítógépes vezérlésűek, és folyamatos a visszajelzés a paletták, tárolók és szerszámok helyéről a rendszerben.” Ez a megfogalmazás a mai rugalmas gyártórendszerekre is igaz.

Ezzel a szemlélettel sikerült annak a korábbi elképzelésnek a megváltoztatása, hogy jó minőségű termékeket gyorsan és gazdaságosan csak tömeggyártással lehet készíteni.

A rugalmas gyártórendszerek fogalmának definíciójára számos megközelítés létezik [29] [30] [31] [32]. Véleményem szerint, a legjobb definíció maga az elnevezés. Olyan gyártórendszer, ami rugalmas. A

DOI: 10.14750/ME.2026.012

rugalmasság fogalma is változhat a gyártósorral kapcsolatos céltól függően [33], de a leginkább általános, hogy a gyártósor attól rugalmas, hogy a paramétereinek és komponenseinek rugalmassága révén különböző termék kombinációkat is az elvárt darabszámban tud gyártani.

Az FMS-ek fő célja, megközelíteni a tömeggyártás hatékonyságát, valamint fenntartani a kis és közepes sorozatnagyság adta rugalmasságot. A rugalmas gyártórendszerek termelékenységben, a dedikált gyártósorok és a műhely rendszerű gyártás között helyezkednek el. Alkalmasak arra, hogy viszonylag nagy termékvariációt gyártsanak és mindezt egy elfogadható sebességgel teszik.

Általánosságban elmondható, hogy azok a termékek integrálhatók hatékonyan egy gyártósorra, ahol a méretek hasonlóak, a felhasznált technológiai lépések nagymértékben közösek és a gyártási idejük hasonló. A hatékonyság ebben az esetben főleg azt jelenti, hogy a többféle típus gyártása nem okoz komoly extra veszteséget a dedikált gyártósorokhoz képest. Ennek az alapja az, hogy ha az állomásokon az egyes típusok közötti átállás (szerszámcsere, konfiguráció változtatás, program frissítést stb.) ideje minimális, közel nulla. Ez azt jelenti, hogy az átállásokkal, a típusváltásokkal a sor csak csekély kapacitást veszít.

A rugalmas gyártórendszerek másik nagy előnye, a szinte tetszőleges gyártási szekvencia, vagyis az a képesség, hogy szinte tetszőleges sorrendben indítható el a termékek gyártása, elméletben a gyártási egység méret 1 darab. Ez jellemzően azt is jelenti, hogy ezek a gyártórendszerek kisebb soron belüli készletekkel és rövidebb átfutási időkkel tudnak működni. Annak, ha egy gyártósoron több terméket is lehet gyártani, egy másik gazdasági előnye is van, jobban kihasználható a kapacitás. Ha az egyik termék iránt csökken a kereslet, akkor lehet a másikból többet gyártani vagy hasonlóan, mindig egy gazdaságos gyártási termékmixet összeállítani.

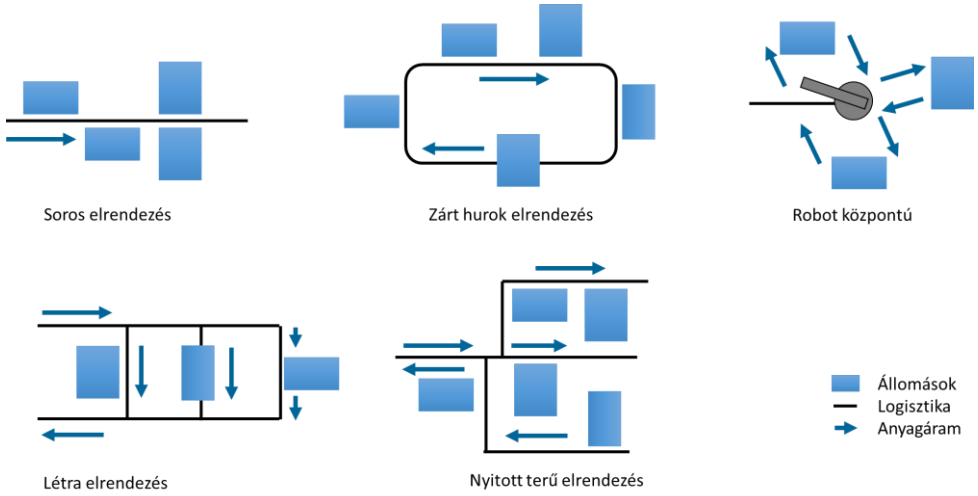
A rugalmas gyártórendszerek esetében a hangsúly a rendszer kifejezésen van. A rugalmas gyártórendszerek legnagyobb előnye ugyanis, hogy egy rendszert képeznek, rendszer szinten tekintenek rá és hajtják végre az adott termékek gyártását. Ebből a magas fokú rendszerszemléletből származik a rugalmasságuk, viszont ez okozza azt a komplexitást is, ami miatt a tervezésük kihívást jelent.

A rugalmas gyártórendszereknek a kialakításuktól függően 5 fő típusát különböztetjük meg [34] (9. ábra):

- progresszív vagy sor jellegű (in-line or progressive) – akkor alkalmazható, ha a darabok az egymást követő gépeken haladnak végig, és nincs visszafelé anyagáramlás. A felrakás a sor elején, a leszedés a sor végén történik. A darabok mozgatásához nem szükséges készülék vagy paletta. Kialakítástól függően a darabok mozgatása történhet robottal hetedik tengely mentén, portállal vagy AGV-vel.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

- hurok jellegű (loop) – a darabok egy irányba mozognak a hurok mentén, a gyártási folyamat a hurkon lévő állomásokon történő körbe haladással történik meg; a felrakás és a leszedés ugyanott történik. A darabok mozgatása palettán vagy AGV-vel történik.
- létra (ladder) jellegű – a folyamat lépései az egyes ágakon, mint létrán „felfelé" haladva történnek meg. Az elrendezés jellegéből adódóan jól használható olyan gyártási folyamatok esetén, ahol típustól függően a termékek kihagynak állomásokat. A felrakás és a leszedés ugyanott történik meg, mivel a bemenettel ellentétes oldalon lévő ág visszaviszi a darabokat a kezdeti pozícióba. A darabok mozgatása palettán vagy AGV-vel történik.
- nyitott (open field) jellegű – a folyamat lépéseken a darabok kötött vagy nem kötött pályán mozgó szállító eszközökkel haladnak végig; a felrakó és leszedő állomás a logisztikai szempontok miatt ugyanazon az oldalon található. Ez az elrendezés általában felbontható az előző három elrendezésnek megfelelő részekre. Az anyagmozgatás szinte kizárólag AGV-vel történik.
- robotos (robot centric) jellegű – egy vagy több robot végzi az anyagmozgatást a gépek között; a felrakás a sor elején, a leszedés a végén történik.



9. ábra Rugalmas gyártórendszerek típusai

A rugalmas gyártórendszerek esetében nem ritka a 20-40 együttműködő gép sem. Azokban az esetekben, amikor néhány gép dolgozik együtt (2-5) azokat inkább rugalmas gyártócelláknak nevezzük és leggyakrabban robotos jellegű a megvalósításuk.

A rugalmas gyártórendszerek az alábbi komponenseket tartalmazzák [34] [35] (10. ábra):

DOI: 10.14750/ME.2026.012

- munkahelyek (ezek lehetnek manuális vagy automata állomások, megmunkálógépek, ellenőrző állomások, robotok vagy bármilyen más tevékenységet végző berendezések)
- logisztikai rendszer: anyagkezelő és tároló rendszerek (ezek biztosítják a termékek, darabok tárolását és továbbítását az állomások és a tároló rendszerek között)
- vezérlő rendszer (ez biztosítja a teljes rendszer működését a benne leképezett vezérlési logika segítségével, jellemzően számítógépek és PLC elemek együttese alkotja ezt)

10. ábra Rugalmas gyártórendszerek fő elemei

A rugalmas gyártórendszerek esetében a gépek általában rendelkeznek egy, a darabok fogadására és leadására szolgáló felülettel, ezeket betöltő és kiadó (load és unload) állomásoknak nevezik. Kialakítástól függően ezek lehetnek a gépek részei vagy külön állomások [36].

A vezérlő rendszernek a fő feladatai az alábbiak lehetnek:

- munkahelyek kihasználtságának biztosítása megfelelő anyagellátással (anyagáram kontrollálása)
- rendszer elemei közötti kommunikáció kontrollálása, összehangolása
- a rendszer elemeinek kezelése nem várt események (hibák stb.) esetén (ütemezés) és a változásoknak megfelelő adaptív döntések meghozása
- minőségbiztosítás és selejt kezelése
- a rendszer elemeihez kapcsolódó teljesítménymutatók összesítése (adatgyűjtés és elemzés)

Előnyök	**Hátrányok**
Kevesebb selejt	Jellemzően alkatrészcsaládok gyártására használhatók
Kevesebb munkaállomás	Nem minden esetben gazdaságos
Gyorsabb átállások a termékek között	Dolgozói ellenállás az automatizálás miatt
Csökkentett állásidő	Magasabb beruházási költség
Jobb minőség	Hosszú megtérülési idő
Kevesebb dolgozó	Magas energiafogyasztás
Hatékonyabb gépkihasználtság	Magas informatikai támogatási igény
Kisebb folyamat közi készlet	Bonyolultabb rendszerintegráció
Nagyobb rugalmasság	
Rövid átfutási idő	
Automatizált anyagmozgatás	
Moduláris bővíthetőség	
Egy egységként kezelhető, könnyen költöztethető	

1. táblázat Rugalmas gyártórendszerek fő előnyei és hátrányai

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Összefoglalva a rugalmas gyártórendszerek előnyeit és hátrányait (1. táblázat), szembetűnő, hogy a jelentős előnyök miatt gyakorlatilag mindenhol érdemes ilyen rendszert használni, ahol a gyártósor magasabb költségei kitermelhetők.

3.2 Termék életciklus matematikai leképezése

William E. Cox Jr. marketingkutató már 1967-ben felismerte, hogy a termékek értékesítési görbéje gyakran jól közelíthető egy másodfokú (parabolikus) függvénnyel, szemben a bonyolultabb vagy kiszámíthatatlan mintázatokkal. Cox empirikus vizsgálatai kimutatták, hogy külső beavatkozások nélkül a tipikus értékesítési görbe egy konkáv lefele nyíló parabola alakját ölti, amelynek csúcsa a érettség fázis környékére esik. Ez azt jelenti, hogy a termék bevezetése után az eladások kezdetben gyorsan nőnek, majd egy maximumot (csúcsértéket) érnek el, utána pedig fokozatosan csökkennek.

Cox kutatása alapján a termék életciklus egyes szakaszai felírhatók az

$$Y = a + bx + cx^2 \tag{1}$$

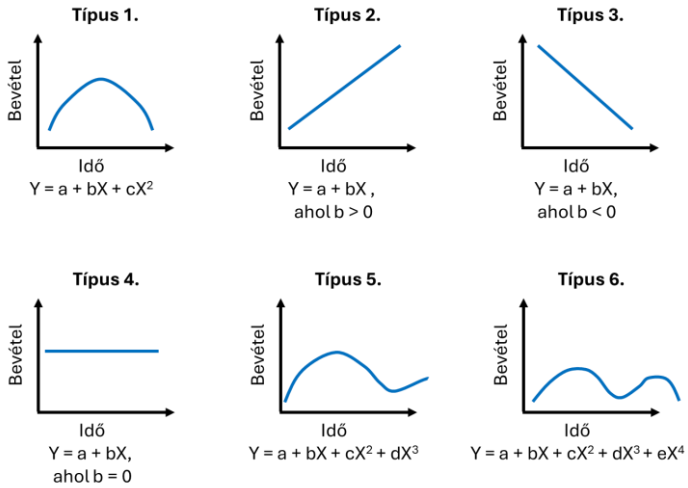
másodfokú egyenlet alakban [37], ahol

x - az idő

Y – a bevétel vagy darabszám

a, b, c – a görbét leíró paraméterek

Cox vizsgált további lehetséges életciklus görbéket is (11. ábra, [37]), azonban arra jutott, hogy a gépiparban és a diszkrét gyártásban az 1. típus a parabola forma a jellemző, azzal összhangban, hogy a gépipari termékek esetében a kezdeti felfutás után egy csúcspont elérését követően a kereslet jellemzően csökken.



11. ábra Termék életciklus görbék lehetséges alakjai [37]

DOI: 10.14750/ME.2026.012

A vizsgált életciklus görbék közül a második típus egy erősen idealizált folyamatos kereslet növekedést tükröző görbe, ami például egyes élelmiszeripari termékekre lehet jellemző, azzal a feltétellel, hogy végtelen növekedés nincs. A 3. típus a csökkenő kereslettel olyan termék esetében történhet meg, amelyik hirtelen megjelenik a piacon, de nagyon gyorsan lecsökken az érdeklődés iránta. A 4. típus szolgáltatás jellegű állandó igényt kielégítő termékek esetében jellemző. Az 5. és 6. típus pedig a különböző marketing, promóciós és „ráncfelvarrt" termékek leírására szolgálhat.

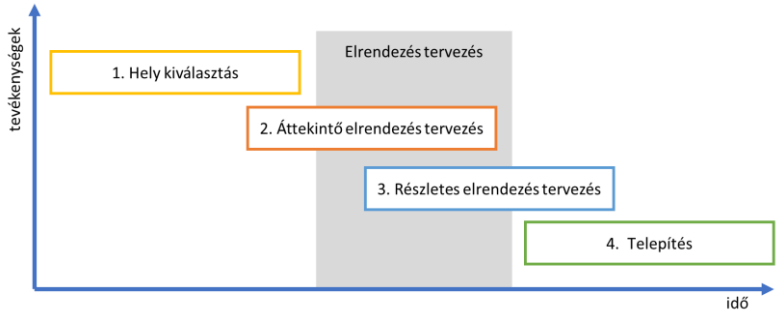
Cox szerint promóciós „rásegítés" nélkül a parabolikus alak a piac természetes válasza egy innovációra. Más szóval, az új termék iránti kereslet felfut majd kifullad, nagyjából szimmetrikus módon. Cox megfigyelte, hogy ha a cégek nem próbálják meg mesterségesen meghosszabbítani a termék életét (pl. árak csökkentésével vagy reklámköltés fokozásával érettség után), akkor a termék életciklusa alapvetően egy másodfokú görbével írható le.

Ezt a részt a 4.4.2, Kapacitásszükséglet meghatározása életciklus alapján fejezetben használom fel.

3.3 Szisztematikus elrendezés-tervezés

Az elrendezések tervezését sokféleképpen lehet végezni. Bár a módszerek különbözhetnek, a legfontosabb, hogy az elrendezés-tervezés egy strukturált folyamat legyen, amely végigvezeti a tervezésben résztvevőket a tervezés kezdeti lépéseitől a telepítésig, a teljes folyamaton. Az irodalomkutatás során látható volt, hogy a Muther-féle Szisztematikus elrendezés-tervezés (Systematic Layout Planning – SLP) módszer a leginkább kidogozott és leginkább nyitott módszer a továbbfejlesztésre.

Az elrendezés-tervezési folyamata onnan kezdődik, amikor a gyártóterület, a gyártósor helye már kiválasztásra került, az ehhez kapcsolódó paraméterek (épület, terület) is adottak. Ennek megfelelően nem témája az elrendezés tervezésnek az épület és gyártóhely építészeti és szerkezeti tervezése sem. A sor telepítésének kérdései sem részei az elrendezés-tervezésnek, azok túlmutatnak a tervezési módszerek keretein. Ennek megfelelően az elrendezés-tervezés hatóköre a sor áttekintő és részletes tervezése és annak folyamata (12. ábra).



12. ábra A gyártervezési folyamat fő lépései [5]

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Az első és legfontosabb lépés a tervezéshez szükséges adatok összegyűjtése. Erre az SLP módszer a könnyen megjegyezhető PQRST rövidítést használja, ahol az egyes betűk jelentése a következő:

- P(roduct): a gyártandó termék és annak jellemzői, beleértve az alapanyagot és a félkész vagy beépülő termékeket is.
- Q(uantity): a termék gyártandó mennyisége, illetve a felhasznált mennyisége az alapanyagoknak és a félkészeknek. Ez az adat szorosan kapcsolódik a termék darabjegyzékéhez (BOM – Bill of Material).
- R(outing): ebbe az információs kategóriába tartozik a gyártási folyamatterv, a gyártási sorrend (BOP – Bill of Process), illetve a gyártógépek fő jellemzői, amelyeken a termék gyártása történik.
- S(upporting services): a támogató tevékenységek legfontosabb része a gyártást támogató logisztikai folyamatok. Emellett ide tartoznak a karbantartási, vezérlési feladatok, amelyeknek szintén lehet a tervezés szempontjából fontos helyigénye, pl. a megbeszélő területek, az AGV töltőállomások stb.
- T(time): az időzítésbe beletartozik a gyártósor ritmusa a vevői igények alapján, és minden olyan időzítési kérdés, amely a sori működést befolyásolja.

A módszer támaszkodik arra, hogy minden gyártási elrendezés három alapon nyugszik:

1. Kapcsolatok (relationships) – az elemek között megkívánt közelség vagy távolság foka.
2. Hely (space) – a szükséges és a rendelkezésre álló hely közötti kompromisszum megtalálása
3. Finomítás (adjustment) – a különböző elrendezésváltozatok közötti iteráció, kiválasztás

Az SLP tervezési folyamat 5 lépésből áll, amelyeket a tervezés különböző szintjén egymásra épülve többször meg lehet ismételni. Ugyanezen lépések használhatók a csarnokon belül a gyártási területek helyének és kapcsolatának tervezésére és utána ugyanezen gyártási területeken belüli gépek és munkahelyek helyének és kapcsolatának részletes tervezéséhez.

A tervezési folyamat első lépése a bemeneti adatok (PQRST) feldolgozása. Ennek a lépésnek az eredménye a Tevékenység területek listája (részlegek, cellák, gépcsoportok, anyagátvevő területek stb.).

Az SLP módszer a termék (P) és mennyiség (Q) információkhoz kapcsolódóan fontosnak tartja a tervezés során ezek időbeni P-Q függvényének vizsgálatát is. A P-Q függvény úgy hozható létre, hogy a vízszintes tengelyre a termékek kerülnek csökkenő gyártási sorrendben, a függőleges tengelyen pedig a belőlük gyártandó mennyiség kerül ábrázolásra adott időszakra (év vagy hónap).

A P-Q arány hatással van annak kiválasztására, hogy milyen jellegű gyártósor kerül kialakításra. Ha például a P-Q arány azt jelzi, hogy csak 1-2 típust kell gyártani nagy darabszámban, akkor érdemes

DOI: 10.14750/ME.2026.012

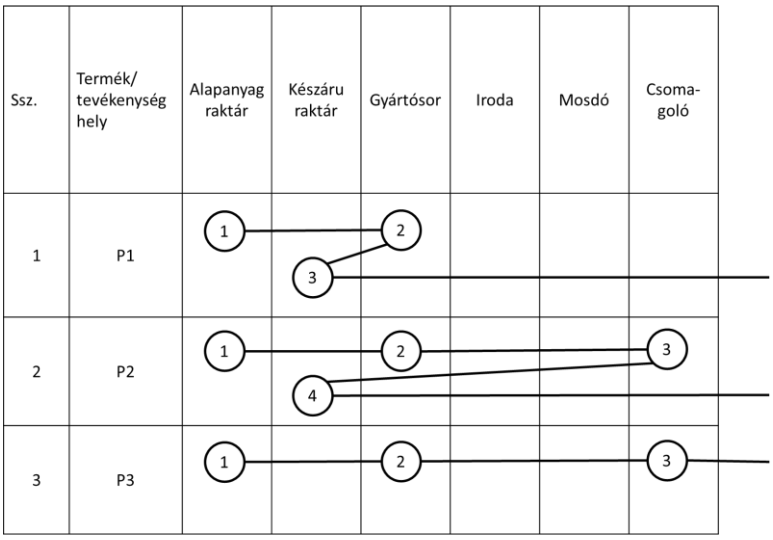
dedikált gyártósort készíteni ezekre. Ha a P-Q arányból az látszik, hogy sok különböző terméket kell gyártani kisebb darabszámban, akkor viszont valószínűleg egy műhely jellegű elrendezés a megfelelő.

Az alapadatokból meg kell határozni az ún. Tevékenység területeket (Activity areas). Ezek azok a területek, amelyek bármilyen szempontból fontosak a gyártás számára, ezek az alábbi főbb kategóriákba sorolhatók [5]:

- Termeléshez kapcsolódó részlegek (szerelés, festés, minőségellenőrzés, tesztelés, …)
- Személyzeti részlegek (étkező, pihenő, mosdó, öltöző, parkoló, …)
- Támogató részlegek (recepció, tárolók, raktárak, irodák, …)
- További részlegek (oktatótermek, ügyfélszolgálat, konferenciaterem, …)

A következőkben az SLP módszer használatát egy példán mutatom be, amely egy olyan csarnok tervezése, ahol az alábbi hat tevékenység területet definiáltam:

1. alapanyag raktár
2. készáru raktár
3. gyártósor
4. iroda
5. mosdó, öltöző
6. csomagoló



13. ábra Folyamat grafikon példa

A következő lépésben az anyagáramlás vizsgálata történik. Az anyagáramlás leírására két lehetőséget javasol a módszer. Az egyik a folyamat grafikon (13. ábra), a másik pedig a honnan-hova táblázat (2. táblázat). A folyamat grafikon termékközpontú és a folyamatlépéseket, a honnan-hova táblázat pedig az anyagáram mennyiségét helyezi a központba. A folyamat grafikon alkalmas az alternatív gyártási

DOI: 10.14750/ME.2026.012

útvonalak leírására is. Az anyagáram kvantitatív elemzésére a 2. táblázat szerinti honnan-hova táblázat jobban alkalmazható.

Az anyagáram vizsgálatának a javasolt SLP eszköze nagy számú, változatos termék esetén a honnan hova táblázat [5]. Az SLP terminológiát használva a honnan és a hova helyek megfeleltethetők a korábban összegyűjtött Tevékenység területeknek. A táblázatra példát a 2. táblázat mutat. Az egyes cellák az oszlopszám – sorszám állomások közötti anyagmozgást tartalmazzák. Ha az adott időszak alatt X mennyiségű terméket kell mozgatni az alapanyag raktárból a gyártósorra, akkor az alapanyag raktár sor és a gyártósor oszlop metszetébe kerül a mozgatandó mennyiség. A főátló alatti mezőkben a visszafelé történő anyagáramlás jeleníthető meg. A nem nulla bejegyzések összege mutatja, hogy hány, különböző anyagmozgás történik a folyamatban. Az anyagmozgatás mértékét egységes mértékrendszerben kell a táblázat minden mezőjébe beírni, ez lehet darab, csomagolási egység, vagy bármilyen – a folyamat során – egységesíthető anyagmozgatási mérték.

	Alapanyagr.	Készáru raktár	Gyártósor	Iroda	Mosdó	Csomagoló
Alapanyagr.	0	0	X	0	0	0
Készáru raktár	0	0	0	0	0	0
Gyártósor	0	0	0	0	0	X
Iroda	0	0	0	0	0	0
Mosdó	0	0	0	0	0	0
Csomagoló	0	X	0	0	0	0

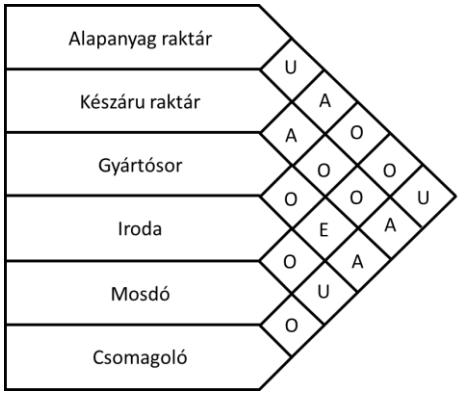
2. táblázat Honnan-hova táblázat példa

Az SLP módszer kifejti [5], hogy az anyagáram önmagában nem elégséges egy rendszer elrendezésének és működésének egyértelmű meghatározására. Az alábbi tényezők is fontosak:

- a támogató szolgáltatásokat (logisztika, szerszámellátás stb.) is integrálni kell a folyamatba, az anyagáramba
- lehetnek olyan tevékenység helyek, amelyekbe bár nem történik anyagáram, a közelségük a termeléshez fontos lehet (pl. egy iroda, ahonnan irányítják a termelést)

A fentiek figyelembevétele érdekében az SLP módszer bevezette a Kapcsolati diagramot (relationship chart), amely az egyes tevékenység területek kapcsolatának gyakran nem is számszerűsíthető paramétereit foglalja össze (14. ábra).

DOI: 10.14750/ME.2026.012



Ssz.		Alapanyag raktár	Készáru raktár	Gyártósor	Iroda	Mosdó	Csomagoló
1	Alapanyag raktár		U(1)	A	O	O	U
2	Készáru raktár			A	O	O	A
3	Gyártósor				O	E(2)	A
4	Iroda					O	U
5	Mosdó						O
6	Csomagoló						

14. ábra Kapcsolati diagram és táblázatos megjelenítése példa

A kapcsolati diagram megmutatja, hogy mely tevékenység területek kapcsolódnak, mely tevékenységi területekhez. Emellett súlyozza a fontosságát a területek egymáshoz való közelségének. A súlyozás kategóriák alapján történik.

Kapcsolati diagram metszéspontjaihoz szokás indoklást is fűzni, a közelség kategória mellé. Mivel a metszéspont mezőkben elférő információ erősen korlátozott, ezért ezeket sorszámokkal, és külön kigyűjtött sorszám és indoklás mezőket tartalmazó listákkal lehet leírni. Például a fenti példában az alábbi két megjegyzés kapcsolódik a kapcsolati diagramhoz:

(1) bár az alapanyag raktár és a készáru raktárnak nem szükséges egymáshoz közel lenni, mivel funkciójuk nem kapcsolódik, és direkt anyagáramlás nem történik közöttük. Érdemes azonban meggondolni a két raktárterület lehetséges összevonását, amely nagyobb logisztikai rugalmasságot adhat, azzal, hogy a két raktárat összevonva a kapacitásuk az alapanyag és a készáru között rugalmasan változtatható.
(2) a gyártósor és a mosdó terület közelsége a gyártási technológia tisztaság igénye miatt fontos.

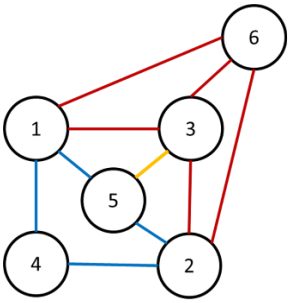
A kapcsolati diagramot még egy információval kell kiegészíteni, ez az adott tevékenység helyhez szükséges terület nagysága (15. ábra).

Szükséges terület		Alapanyag raktár	Készáru raktár	Gyártósor	Iroda	Mosdó	Csomagoló
100 m2	Alapanyag raktár		U	A	O	O	U
200 m2	Készáru raktár			A	O	O	A
150 m2	Gyártósor				O	E	A
50 m2	Iroda					O	U
30 m2	Mosdó						O
60 m2	Csomagoló						
Össz.: 590 m2							

15. ábra Kapcsolati diagram kiegészítve a szükséges területtel

DOI: 10.14750/ME.2026.012

A kapcsolati diagramot vizualizálni lehet aktivitás kapcsolati diagram formájában is (16. ábra). Ennek az ábrának a felrajzolásánál törekedni kell a vonalak kereszteződésének elkerülésére, mert azok kereszteződések lesznek a később megvalósított elrendezésben is. Az ábrán láthatóak a kategóriák és azok jelölései is.

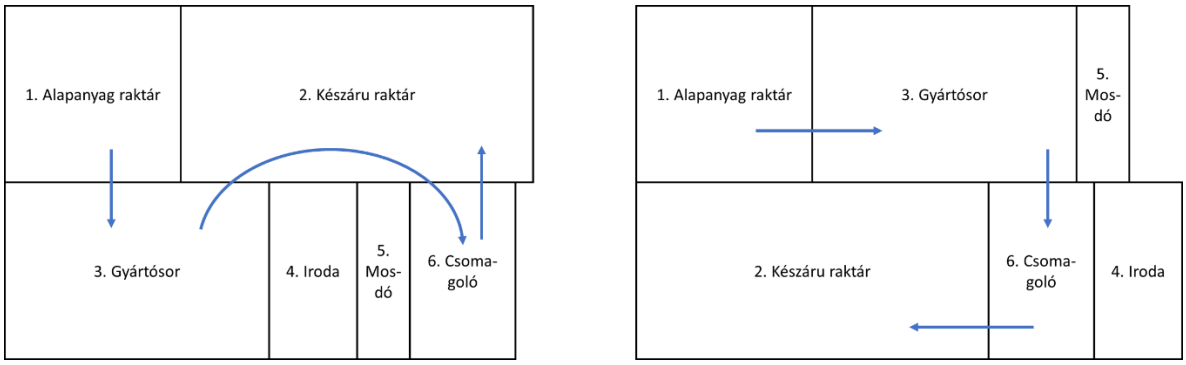


Kategória jelölés	Elnevezés	Színkód	Vonal jelölés
A	Absolutely necessary (abszolút fontos)	piros	
E	Especially important (elengedhetetlenül fontos)	narancs	
I	Important (igazán fontos)	zöld	
O	Ordinary (ott pont jó lesz)	kék	
U	Unimportant (úgy is jó lesz)	nem jelölt	
X	Not desirable (nem kell figyelembe venni)	barna	

16. ábra Aktivitás kapcsolat diagram és közelségi kategória színjelölései

Az aktivitás kapcsolat diagram (16. ábra), tartalmazza az aktivitás pontokat, az összekötő vonalakkal reprezentálja a közelségi viszonyukat. Az egyes aktivitás pontokhoz szükséges területet (négyzetméterben mért befoglaló méret) rendelve különböző elrendezés variációk készíthetők. A 17. ábrán két példa elrendezés látható annak bemutatására, hogy ugyanazon alapadatok alapján már egy egyszerű példa esetében is több elrendezés változat készíthető. A két változat különbözőségét kiemelik a berajzolt anyagáram irányok.

Az elrendezés-tervezés egyik legnagyobb kihívása, hogy számos olyan tényezőt kell figyelembe venni, ami miatt kompromisszumot kell kötni a tervezés során. Ilyen lehet például az oszlopok helye a csarnokban, az energia és alapanyag eljuttatásának korlátai, biztonsági előírások, stb.



17. ábra Elrendezés változatok ugyanazon alapadatok alapján

Az így készített elrendezés változatok alapján a projektben érintett csoport több tagjának részvételével történik a kiértékelés, ami alapján a megvalósítandó elrendezés kiválasztásra kerül. A kiértékelés során bármilyen, a megvalósítás szempontjából releváns szempont figyelembe vehető, pl. logisztika, költségek, építészeti adottságok, közlekedési útvonalak stb.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

A szisztematikus elrendezés-tervezés következő elemeit használom fel a rugalmas gyártórendszerek tervezési eljárásának kidolgozása során: alapadatok, tevékenység-területek, honnan hová táblázat.

3.4 Döntési táblák

„A döntési táblázat a rendszerben előforduló állapotfeltételek és az ezek megléte esetén szükséges tevékenységek kombinációinak ábrázolására szolgáló táblázatos ábra.” [38] A definíció tökéletesen leírja, hogy a döntési táblázatok egymásra épülő logikai kapcsolatok leírására szolgálnak. Az 1960-as években fejlesztették ki őket, a túl bonyolult folyamatábrák helyett, egy strukturáltabb, jobban áttekinthető leírási módként. Hasznossága miatt bekerült többek között a német szabványok közé is (DIN 66241 - [39]). A döntési táblázatoknak megvalósítástól függően több fajtája lehet, itt most az egyik legegyszerűbb, de a mérnöki feladatokra jól használható változatot mutatom be.

A döntés táblázatok felépítése a 3. táblázat szerint épül fel. A táblázat a tagolt felépítése miatt jól áttekinthető, könnyen értelmezhető. A táblázatos leírás egyszerűvé teszi az informatikai leképezését is.

A felső részben a feltételekben található a probléma összes feltétele, míg az alsó részben találhatók a feltételek teljesülése, vagy nem teljesülése esetén megtörténő tevékenységek. A szabályok foglalják össze az adott esetben vizsgálandó eseteket (nem feltétlenül az összes kombinációt, mivel a feladattól függően bizonyos kombinációk értelmezhetetlenek lehetnek). A döntési táblázatot fentről lefelé és balról jobbra kell olvasni.

	Szabály$_1$	**Szabály$_2$**	**Szabály$_3$**	**…**	**…**	**Szabály$_n$**
Feltételek						
Feltétel$_1$	Igen	Igen				
Feltétel$_2$	Igen	Nem				
…						
Feltétel$_i$						
Tevékenységek						
Tevékenység$_1$	X					
Tevékenység$_2$		X				
…						
Tevékenység$_j$						

3. táblázat Döntési táblázat formátuma

A 3. táblázat esetében a Feltétel$_1$ és a Feltétel$_2$ teljesülése esetén a Tevékenység$_1$ kell, hogy megtörténjen és ezt a Szabály$_1$ adja meg. Hasonlóan a Feltétel$_1$ teljesülése és a Feltétel$_2$ nem teljesülése esetén pedig a Tevékenység$_2$, aminek meg kell történnie a Szabály$_2$ alapján.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

A döntési táblák komplexitását, méretét jól leírja a CAR szám, ami a három komponens angol neveiből származik C(ondition), A(ction) és R(ule). A három adat között nincs közvetlen összefüggés [38]. A három szám összege azonban mindenképpen jelzi a táblázat bonyolultságát.

$$CAR = n + i + j \tag{2}$$

ahol:

n – a feltételek száma,

i – a tevékenységek száma,

j – a szabályok száma.

A legtöbb döntési táblában a feltételek között ÉS kapcsolat van.

A feltételek állapota többféle lehet, a leggyakoribb az Igen, a Nem és a kötőjel (nem értelmezhető az adott feltétel). A teljesülő tevékenységeket X jelzi. Az ilyen módon felépített táblákat korlátozott bejegyzésű táblázatnak nevezzük.

A feltételek egymáshoz való viszonya négyféle lehet, kizáró, függő, független és vegyes [38]. A kizáró esetben csak egy feltétel lehet egy időben igaz. A függő esetben minden feltétel állapot minden kombinációja előfordul. A független esetben egy szabálynak csak egy esetben van érvényes állapota, de táblán belül többféle állapotuk is fellép. A vegyes esetben tetszőleges állapot előállhat, tehát egy döntési táblán belül többféle feltétel állapot is kombinálható.

Általánosságban egy döntési tábla az alábbi lépésekben készíthető el:

- Probléma megértése
- Feltételek elkészítése
- Tevékenységek elkészítése
- Szabályok létrehozása
- Táblázat ellenőrzése teljesség és ellentmondás mentesség szempontjából

A döntési táblákat a kutatás 4.10 Vezérlő rendszerek tervezése fejezetben használom fel.

3.5 Digitális iker és szimuláció

Viszonylag ismert tény, hogy a digitális iker fogalmát a NASA alkotta meg. Az első digitális iker az Apollo 13 volt, amelyhez 15 szimulátort készítettek az űrhajósok és a földi vezérlőszemélyzet képzéséhez. A digitális iker akkori NASA definíciója a következő volt: „A digitális iker egy integrált többfizikai, többléptékű, valószínűségi szimuláció egy létező járműhöz vagy rendszerhez, amely az elérhető legjobb fizikai modelleket, érzékelőfrissítéseket, repülési történetet stb. használja, hogy tükrözze a hozzá tartozó repülő iker életét.” [40]

DOI: 10.14750/ME.2026.012

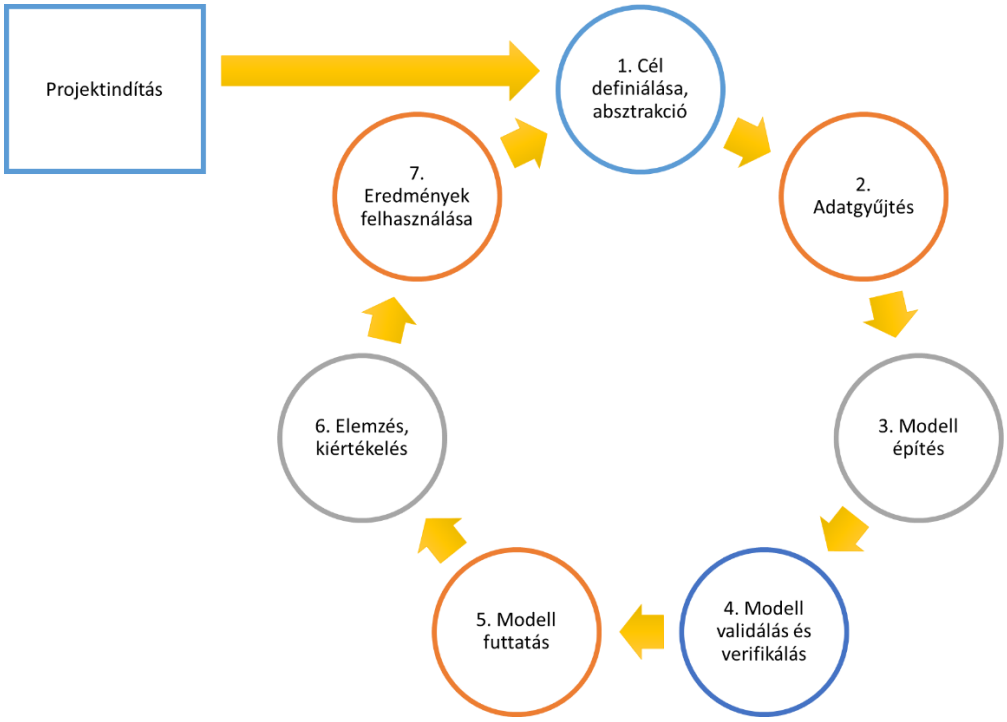
Azóta számos egyéb definíció született [41] [42] a digitális iker fogalmára, de az alapja nem változott. A digitális iker egy meglévő rendszer olyan szintű leképezése, amely alkalmas arra, hogy ennek a digitális ikernek a tanulmányozásával a valós rendszerre vonatkozó következtetéseket vonhassunk le. A digitális iker két térben mozog, a fizikai és a virtuális térben és azokat kapcsolja össze.

A digitális iker elkészítésének a főbb kihívásai:

- nem megfelelően definiált cél a digitális iker modell elkészítésével
- hibás bemeneti paraméterek és specifikáció
- rosszul definiált kimenetek
- túl elnagyolt vagy túl részletes modellezés
- nem megfelelően validált modell

A szimuláció definíciója a német mérnök kamara megfogalmazásában: „A szimuláció egy rendszer leképezése dinamikus folyamataival együtt egy olyan modellben, amellyel kísérletezni lehet. Célja olyan eredmények szerzése, amelyek a valóságban felhasználhatók.” [43] A szimuláció, és ezen belül a diszkrét esemény vezérelt szimuláció a gyártással és logisztikával kapcsolatos feladatok elsődleges digitális iker készítési módszere [44].

A digitális iker készítésének a gyártási folyamatok leképezés esetén az egyik leginkább elterjedt módszer a diszkrét esemény vezérelt szimuláció (DES). Ezek a rendszerek tartalmazzák az anyagáram leképezéshez, a gyártási folyamat adatainak kezeléséhez szükséges építőelemeket és számos olyan eszközt is, amely a kapott eredmények kiértékelésére szolgál.



18. ábra Digitális iker készítésének lépései

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Digitális iker készítésének főbb lépései:

1. Cél meghatározása: a cél meghatározása amellett, hogy definiálja a digitális iker elvárt kimeneteit, meghatározza azt is, hogy milyen komplexitású digitális ikert szükséges készíteni. Amennyiben több célja is van a digitális iker készítésének, akkor a részletesség szintjének meghatározása még nagyobb körültekintést igényelhet. Az is elképzelhető, hogy több, különböző célt csak több, különböző digitális iker felépítésével lehet meghatározni.
2. Adatgyűjtés: egy digitális iker kimenete annyira lesz pontos, mint amennyire a bemeneti adatok pontosak. Az elrendezés tervezéshez használt digitális iker esetében a tervezési folyamat során a bemenő adatok fokozatosan válnak egyre pontosabbá.
3. Digitális modell felépítése: a modell felépítésének struktúráját, részletességét a cél határozza meg. A modell felépítése során érdemes a valósághoz hasonló struktúrát felépíteni a könnyebb értelmezhetőség érdekében.
4. Validálás és verifikálás: az elkészült digitális ikert két szempontból kell megvizsgálni, megfelel-e a felépítése az adatoknak (a valóságnak) és képes-e megválaszolni a cél meghatározás során feltett kérdéseket. Ha igen, akkor a modell érvényes és ellenőrzött. Amennyiben nem, akkor felül kell vizsgálni valamelyik korábbi lépést, vagy az adatgyűjtéshez és pontosabb adatokat gyűjteni, vagy a modellépítéshez és megtalálni, hogy hol nem megfelelő a leképezés.
5. Digitális iker modell futtatás: a modell adott időszakra történő futtatása. A futtatási időszakot úgy kell meghatározni, hogy lehetővé tegye a modellkészítés céljainak elérését. A modell futtatás során figyelembe kell venni a paraméterek sztochasztikusságát is, és annak megfelelő mennyiségű futtatást kell végrehajtani.
6. Elemzés: a digitális iker esetében az elemzés történhet egy esetre vagy számos különböző esetre. Az elrendezés-tervezés esetén az elemzés leginkább a tervezett rugalmas gyártórendszer áttekintő működésének vizsgálatára szolgál. A cél alapján fontos annak meghatározása, hogy milyen időperiódusra történjen a vizsgálat.
7. Eredmények felhasználása: amennyiben a cél meghatározása során felmerült kérdéseket az elemzés meg tudja válaszolni, akkor a kapott eredmények felhasználhatók. A gyártósor tervezés során ez azt jelenti, hogy a kapott eredmények alapján készül el a fizikailag telepített gyártósor.

A digitális iker készítése nem egy egyszeri folyamat. A digitális iker nem csupán a tervezés fázisában hasznos, hanem a gyártósor teljes életciklusa során, mivel segít annak fejlesztésében. Így a digitális iker készítésének lépései többször végrehajtódnak egy gyártósor életciklusa során. Amennyiben változás történik a gyártórendszerben, vagy a tervben, vagy új cél merül fel a gyártósorral kapcsolatban akkor érdemes az egész cikluson újra végighaladni, megvizsgálva, hogy a célt milyen módon kell módosítani, és annak megfelelően frissíteni az adatokat, módosítani, futtatni és kiértékelni a modellt [45] [46].

DOI: 10.14750/ME.2026.012

A digitális ikerrel kapcsolatos információk az alapjai az értekezésben kidolgozott tervezési eljárás digitális alkalmazásának.

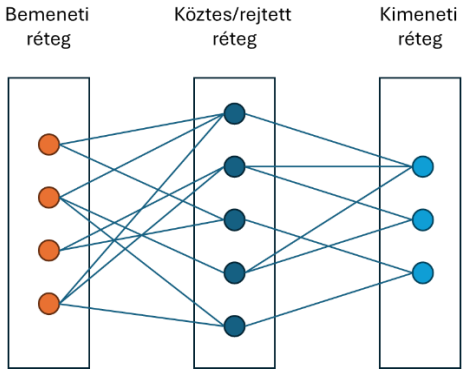
3.6 Neurális hálók használata szimulációval

A neurális háló egy olyan matematikai modell, amely a biológiai idegrendszer működését utánozza. Az alapvető elemek a neuronok, amelyek bemeneti jeleket fogadnak, feldolgozzák és kimeneti jeleket állítanak elő.

A modell felépítése általában három rétegből áll:

- Bemeneti réteg, mely a vizsgálat bemeneti paramétereit tartalmazza
- Rejtett réteg(ek), amely(ek) a feldolgozási műveleteket végzik
- Kimeneti réteg, amely a várt eredményeket reprezentálja

A legtöbb esetben egy rejtett réteg elegendő a kellően pontos modellezéshez. A réteg mérete szabadon állítható, és többféle konfiguráció kipróbálása ajánlott a legjobb eredmény eléréséhez.



19. ábra Neurális háló szerkezete

A 19. ábra egy háromrétegű neurális hálózatot mutat egy négydimenziós bemeneti réteggel és egy háromdimenziós kimeneti réteggel. A rejtett réteg ötdimenziós. A bemeneti értékek a bemeneti réteg csomópontjaihoz vannak rendelve. A kimeneti értékek a kimeneti réteg csomópontjaihoz vannak rendelve. A rejtett réteg a bemeneti értékekből származó kimeneti értékek kiszámításának köztes eredményeit tartalmazza. A tanulási algoritmusok elméleti vizsgálata kimutatta, hogy egy ilyen neurális hálózat képes észlelni és megtanulni a bemeneti értékek és a kimeneti értékek közötti bármilyen összefüggést, ha a rejtett réteg kellően nagy számú csomóponttal rendelkezik [47]. Azonban nem lehet megjósolni, hogy hány csomópont és betanítási lépés szükséges a kívánt pontossági szint eléréséhez. Másrészt nem akarjuk a zajt modellezni a mesterséges neurális hálózattal a szimulációs vizsgálatok értékelése során. A mesterséges neurális hálózat méretezése mindig kompromisszum lesz a lehető legkarcsúbb vagy legpontosabb modell között. A mesterséges neurális hálózatnak a bemeneti értékek és a kimeneti értékek közötti tipikus korrelációkat kell modelleznie egy olyan hálózatban, amely a

DOI: 10.14750/ME.2026.012

lehető legkevesebb csomóponttal rendelkezik. Ennek a korrelációnak az előállítása a neurális háló betanítása.

A modell méretezése kompromisszumot jelent a minimális struktúra és a maximális pontosság között. Cél, hogy a hálózat a bemenetek és kimenetek közötti tipikus korrelációkat modellezze, a lehető legkevesebb csomópont alkalmazásával – miközben minimalizálja a zajmodellezést.

Mérnöki problémák szempontjából a mesterséges neurális hálók (Artificial Neural Network – ANN) két legfontosabb számítási jellemzője az approximáció és a tanulás képessége. Az approximáció az a jellemző, hogy a neurális hálózatok képesek lineáris és nemlineáris függvények közelítésére. Ez lehetővé teszi, hogy komplex problémákat megoldjanak, mint például képfeldolgozás, alakfelismerés és osztályozási feladatok. A másik fontos jellemző a tanulás képessége, ami azt jelenti, hogy a hálózatok képesek tanulni a bemeneti és kimeneti adatok alapján, melynek köszönhetően javítják a teljesítményüket az idő múlásával [47].

A szimulációs vizsgálatok során a bemeneti paraméterekhez kimeneti értékek rendelhetők hozzá, melyek közötti összefüggések leírhatók regressziós modellekkel vagy tanított neurális hálózatokkal. A neurális hálózatok az agyban zajló információfeldolgozás alapelveit követik, és a disztributált reprezentáció révén képesek korrelálni a bemeneti és kimeneti értékeket, ami növeli a modell hibatűrését és stabilitását a klasszikus regresszióval szemben.

A neurális háló lehetővé teszi, hogy a modell olyan paraméterkombinációkra is előrejelzést adjon, amelyekkel korábban nem találkozott. Emellett a hálózat figyelembe tudja venni a szimulációs környezetben megjelenő véletlenszerű zavarokat és mérési hibákat is. Egy betanított neurális háló modell képes a bemeneti értékek halmazához tartozó kimeneteket előre jelezni – a szimuláció futtatása nélkül. Ehhez azonban szükséges, hogy elegendő mennyiségű adathalmaz álljon rendelkezésre, amit a kísérletkezelő modul biztosít. A szimulációban a többszintű kísérleti terv (futtatások) gondoskodik arról, hogy a bemeneti értékek egyenletesen oszoljanak el a vizsgált tartományban, ezáltal a tanulás megfelelő lefedettséget kap.

A szimulációban kapott és generált adatok elnevezése szintetikus adat [48] [49]. Az így létrehozott adatok előnye, hogy rövid idő alatt nagy mennyiségű adatot lehet generálni és a kapott adatok minősége jó, szennyeződéstől mentes [50] [51].

A neurális háló bemenetei általában megegyeznek a digitális iker bemeneteivel, a kimenetek pedig a kimenettel. Elképzelhető azonban olyan eset is, amikor a digitális iker bementek egy csoportjához tartozó kimenetek a neurális háló bemenetei és a digitális iker egy bemenetének a szükséges értékének a meghatározása a cél a neurális hálóval.

Az értékezésben a neurális hálókkal kapcsolatos információkat a 4.10, Vezérlő rendszerek tervezése fejezetben használom fel.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

4 Rugalmas gyártórendszerek tervezésének eljárása

Ebben a fejezetben bemutatom a rugalmas gyártórendszerek tervezésére kidolgozott eljárásom felépítését, lépéseit és az egyes lépésekben a tervezés során végrehajtandó feladatokat, tevékenységeket. Az eljárás egy általánosan használható eljárás a rugalmas gyártórendszerek tervezésére. A kidolgozott eljárás diszkrét gyártásra vonatkozik, és feltételezi, hogy a gyártósor helye már adott, ismert a rendelkezésre álló terület. A fejezet egyes alfejezetei alkotják az értekezés téziseit.

4.1 Rugalmas gyártórendszerek tervezésének kihívásai

A rugalmas gyártórendszerek a velük szemben támasztott magasabb elvárásokból adódóan jobban átgondolt tervezést és előkészítést igényelnek. A fejezetben összegyűjtöttem azokat a szempontokat, kihívásokat, amelyekkel a rugalmas gyártórendszerek tervezése során szembe kell nézni. A rugalmas gyártórendszerek fajlagosan kis helyen, magas szintű komplexitással készülnek, és így valósítanak meg egy produktív rendszert, amelynek minden eleme összehangoltan működik együtt a többivel. A komplexitásból és az elvárásokból adódóan az ilyen gyártórendszerek esetében kevesebb lehetőség van a későbbi fejlesztésre, elsőre jól kell működnie a rendszernek.

A tervezés során az első kihívás, annak az eldöntése, hogy egyáltalán szükség van-e rugalmas gyártórendszerre az adott termékek gyártásához? Egy új gyártósor vagy gyártórendszer elkészítése minden esetben komoly beruházást igényel, azonban soha nem elég ezt az oldalát vizsgálni a döntés előtt, hanem meg kell vizsgálni a megtérülés oldalát is. Ehhez pedig mindenképpen figyelembe kell venni azt, hogy az adott termékeknek milyen hosszú lesz az életciklusa. Mivel rugalmas gyártórendszerről van szó, meg kell azt is vizsgálni, hogy milyen új termékek kerülhetnek erre a gyártósorra a későbbiekben. Ezt pedig nem lehet elválasztani magának a gyártósornak az életciklusának a vizsgálatától. Mivel a rugalmas gyártórendszerek hosszabb időre, több termék-generációra készülnek, fontos, hogy az idővel változó tulajdonságú paraméterek szerepét is vizsgálni kell.

A tervezés során fontos elem az adatok elérhetősége. A tervezési feladat egyik nehézsége, hogy kezdetben minimális adat alapján kell elkezdeni a munkát és fokozatosan lesz elérhető annyi adat, amely a részletes tervezéshez szükséges. Ennek az az eredménye, hogy a tervezés későbbi fázisában is előállhat olyan korlát, ami miatt az adott lépés nem végezhető el, és vissza kell nyúlni a tervezés korábbi lépéséhez. Ez az iteratív jellegű tervezés növeli a tervezés komplexitását.

A következő kihívás annak eldöntése, hogy az elrendezések közül, melyik elrendezést érdemes megvalósítani. A különböző elrendezés fajták más jellegű működést és logisztikai támogatást igényelnek, s így közvetlen hatásuk lehet a beruházás mértékére is. Érdemes lehet több elrendezés variációt is megvizsgálni, mivel a gépek egymástól való távolsága, az áramlás és a hozzáférhetőség egyensúlyban tartása az anyagmozgatási távolságok meghatározása mellett kihívást jelent.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

A rugalmas gyártórendszerek logisztikai tervezése kiemelten fontos kihívás. Ellentétben a hagyományos gyártórendszerekkel, ahol a logisztikára sokszor „kiszolgáló” szerepként tekintenek, a rugalmas gyártórendszerek esetében a logisztika a gyártósor integrált része. A szerszámváltásnak, az alapanyag adagolásnak, a szállításnak a sor integrált részeként kell működnie, így a rugalmas gyártórendszerek tervezése nem csupán gyártó, hanem gyártó és logisztikai rendszer tervezése is egy időben. A kiválasztott elrendezéstől függően további logisztikai tervezési kihívás lehet a szállítóeszköz szám meghatározása, vagy a pufferek méretezése. A rugalmas gyártórendszerek legtöbbször puffereket használnak a munkaállomások közötti áramlás kezelésére. A pufferek típusának és méretének meghatározása fontos feladat. Ha túl kicsi, akkor szűk keresztmetszetek léphetnek fel; ha túl nagy, akkor többletkészlet halmozódik fel. Ezért ezeknek a megfelelő méretezése közvetlenül befolyásolja a rendszer teljesítményét.

Ha sikerült kiválasztani az elrendezés típusát, kiválasztani és méretezni a szükséges gépeket és logisztikai eszközöket, akkor foglalkozni kell a rendszer működésével is, vagyis létre kell hozni a vezérlést is. Mivel számos esetben különböző gyártók különböző elven működő rendszereit kell integrálni, ezért fontos, hogy legyen egy olyan leírás, amely mindegyikkel „kompatibilis”. A vezérlés a rendszer lelke, ezért annak részletes kidolgozása nagyon fontos a tervezés, de utána a fizikai megvalósítás során is.

A rugalmas gyártórendszerek automatizált vezérléssel rendelkeznek. Ez azt jelenti, hogy nem elég az anyagáram tervezésével foglalkozni, hanem végig kell gondolni az információáramlást is a rendszerben. Mivel a rugalmas gyártórendszerek informatikai szempontból is összetettek lehetnek ezért érdemes foglalkozni az informatikai biztonságukkal is.

A hosszú életciklus során a magas szintű automatizáltság és a fenntarthatóság miatt elkerülhetetlen a tervezés során figyelembe venni az energiahatékonyság és a karbonlábnyom hatás szempontjait is.

Ahogy a korábbiakban is látható volt a rugalmas gyártórendszerek komplexitása nő, ami egyre nehezebbé teszi a hagyományos módszerekkel történő tervezésüket. A fentieket figyelembe véve jó eredményt lehet elérni az első szintű tervezésben, de a pontos rendszer méretezéshez szükséges a rendszer dinamikájának figyelembevétele. Ezen kihívások kezelése érdekében a tervezés során a digitális iker modell létrehozása hatalmas segítséget tud nyújtani a rendszer méretezésében, a dinamikus viselkedésének vizsgálatában és a rendszer átfogó vezérlési logikájának felépítésében.

Láthatóan a rugalmas gyártórendszerek tervezése komoly kihívást igénylő feladat. A következő fejezetben ennek a támogatására az általam kidolgozott eljárást mutatom be.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

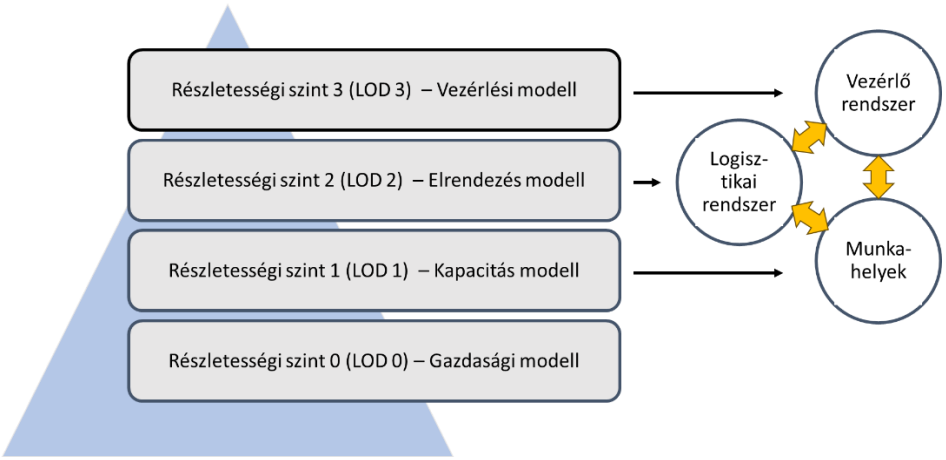
4.2 Rugalmas gyártórendszerek tervezési eljárása

Ennek a fejezetnek a célja, hogy bemutassa a kidolgozott eljárást a rugalmas gyártórendszerek tervezésére.

A rugalmas gyártórendszerek jellegzetessége, hogy a gyáron belüli elhelyezkedésük, a megvalósításukhoz rendelkezésre álló terület eléggé hamar adott, a csarnokban rendelkezésre álló hely révén. Mivel ezek a sorok egy külön, szeparált egységet képeznek, az általános működésük egy bemenet, ahol az alapanyag érkezik és egy kimenet, ahol a kész darabok elhagyják a sort (20. ábra). Maguk a sorok magas szinten automatizáltak. A kapcsolódó szolgáltatások és a logisztika a soron belül vannak megoldva, nem jellemző, hogy bármely soron belüli folyamat (kivéve a karbantartást) a gyár más részével megosztott erőforrást használna. A gyártósor az alapanyag és a készáru raktárhoz kapcsolódik.

20. ábra Rugalmas gyártórendszer kapcsolatai

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 (21 .ábra).



21. 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.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

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? A 4. táblázat összefoglalja a négy szintet és azok eredményét és kimenetét, illetve a hozzá készített digitális iker modell jellegét. Míg a 21. ábra a szintek egymásra épülését mutatja lentről felfelé, addig a 4. táblázat az egyes szintek elkészülési sorrendjét mutatja fentről lefelé. Az egyes szintek kapcsolódnak a rugalmas gyártórendszerek fő komponenseihez, a kapacitás modell segít a gépek kiválasztásában és definiálásában, az elrendezés modell a kapcsolódó logisztikai erőforrás igény meghatározásában, a vezérlési modell pedig a sor működtetéséért felelős vezérlés létrehozását támogatja.

A gyártósor tervezése során a kapcsolódó számítások végrehajtásához digitális iker modell készül. A digitális iker modell lehet akár egy táblázatkezelő vagy egy modern szimuláció egyaránt, amennyiben teljesül az, hogy leképezi a tervezett gyártósor adott jellemzőit, viselkedését, és belőle a gyakorlatban felhasználható eredményeket lehet kinyerni.

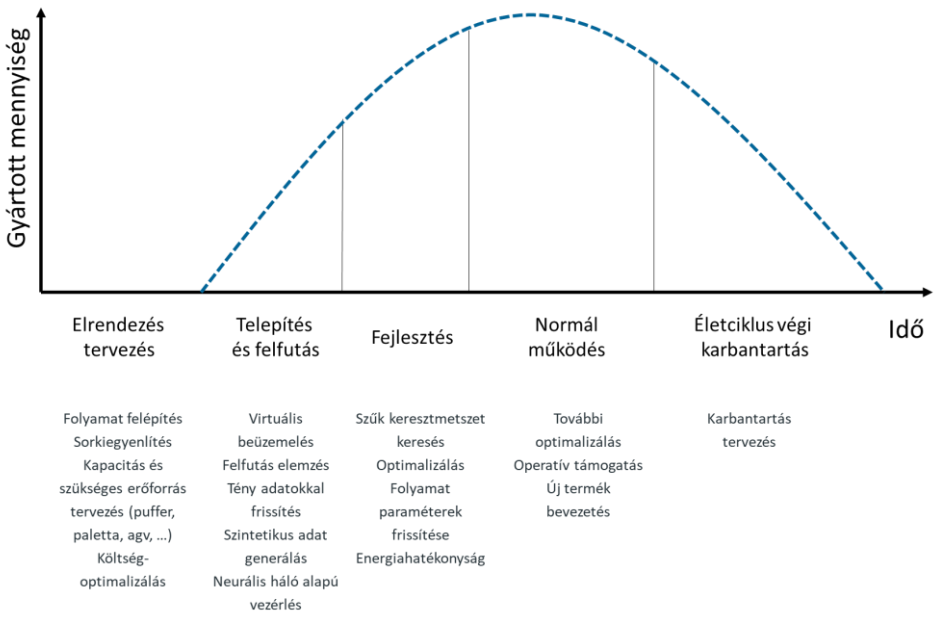
Az egyes tervezési szintekhez a megfelelő digitális iker eszközt érdemes kiválasztani. A kidolgozott eljárás egyes lépései statikus számítással is elvégezhetőek, de a tervezés előrehaladtával a komplexitás növekedésével érdemes egy átfogó digitális iker modellt felépíteni a teljeskörű tervezéshez és elemzéshez. Érdemes ezért olyan eszközt választani, amely mind a négy tervezési szintet egy környezeten 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.

4. táblázat A tervezési eljárás szintjei és kimenetei

A digitális iker modell további előnye, hogy nem csupán a tervezést, hanem a gyártósor teljes életciklusát támogathatja és a sor teljes életciklusa során nyújthat döntéstámogatást.

DOI: 10.14750/ME.2026.012



22. ábra Digitális iker felhasználási lehetőségei az életciklus mentén

A 22. ábra tartalmazza a rugalmas gyártórendszer életciklusa során azokat a legfontosabb területeket, amelyekkel kapcsolatos kérdésekre érdemes digitális iker modellt készíteni. Az értekezésben a digitális iker készítés egyik legelterjedtebb eszközét, a diszkrét esemény vezérelt szimulációt használom digitális iker készítésére.

A kidolgozott eljárás minden tervezési szintjéhez több tevékenység is kapcsolódik, ezeket a 23. ábra foglalja össze. Az ábrában szereplő tevékenységek a jellemző tevékenységek a rugalmas gyártórendszerek esetében, de a konkrét gyártósor tervezési projektekben elképzelhető, hogy

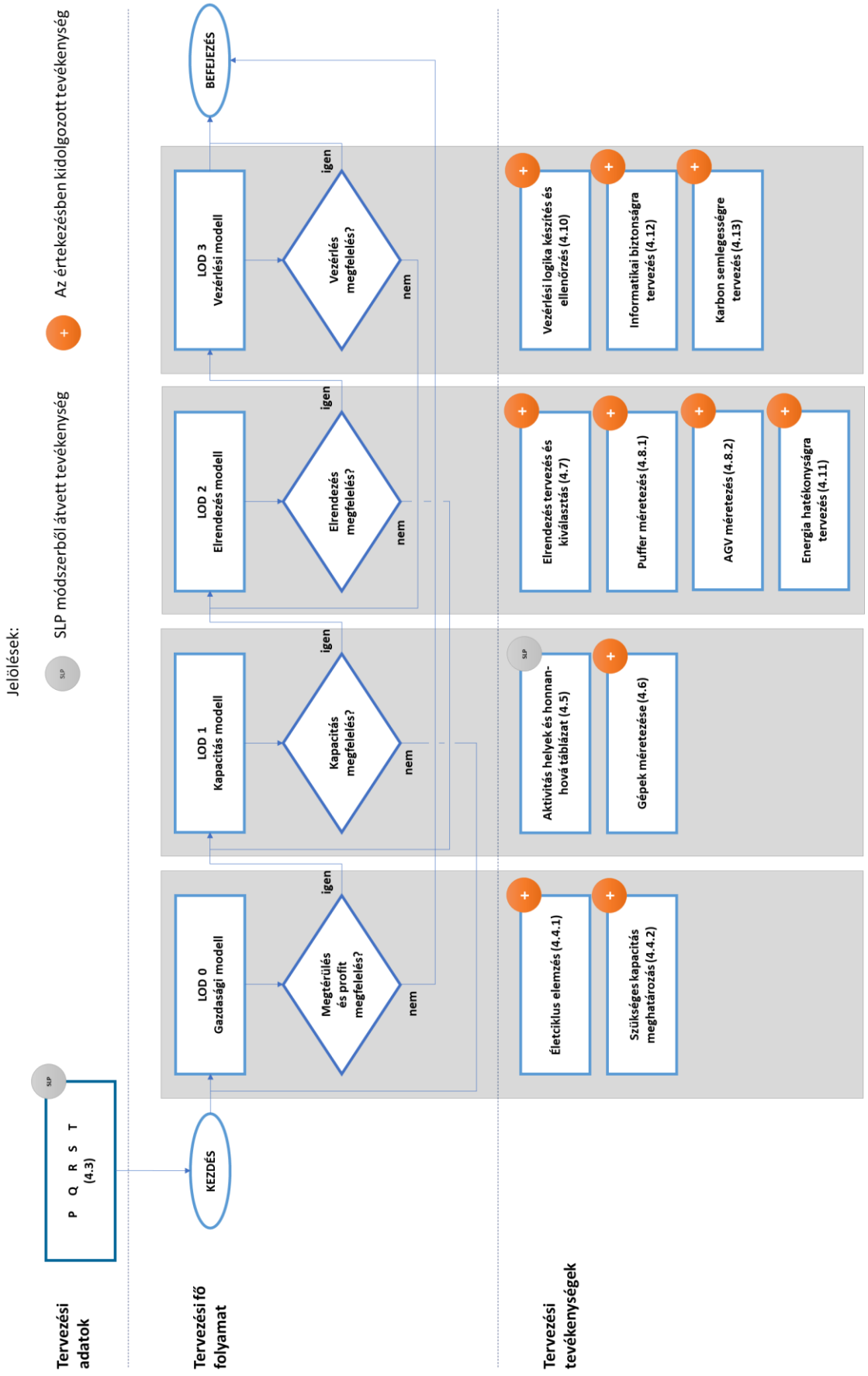
- egy tevékenység másik szinten történik meg,
- egy tevékenység több szinten is megtörténik vagy több szinten szétosztva történik, ahogy több tervezési adat áll rendelkezésre,
- további tevékenység is szükséges a gyártósor valamilyen speciális jellege miatt.

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

Az ábrán jól látható, hogy a szintek között egy-egy döntési pont van a tovább haladásról. A döntési folyamat, a jóváhagyás módja az adott vállalat és projekt csoport felépítésétől függően különböző lehet.

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.

DOI: 10.14750/ME.2026.012



23. ábra A kidolgozott tervezési eljárás felépítése

DOI: 10.14750/ME.2026.012

A 23. 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.

A fejezetben leírtak alapján az alábbi tézist fogalmaztam meg:

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]

4.3 Tervezési adatok

Egy jól működő gyártósor tervezéséhez számos bemenő adatra van szükség, és a tervezés eredményeképpen számos eredményt, kimeneti adatot várunk el. A bemenő adatoknak az összegyűjtése sem egyszerű, mivel azok a tervezés során változhatnak, vagy azért, mert a végleges gyártási idők a gépeket szállító cégektől származnak, vagy azért, mert a logisztikai időket jelentősen befolyásolhatja az, hogy melyik beszállító eszközei kerülnek a gyártósorra. Az SLP módszer a korábban részletezett PQRST szisztéma szerint gyűjti össze a tervezéshez szükséges alapadatokat. Ezt a struktúrát használtam én is, de részletesen kibontva a rugalmas gyártórendszerekhez kapcsolódó adatokra. A 5. táblázatban összefoglaltam a legfontosabb adatokat, amelyek leírnak egy rugalmas gyártórendszert. Emellett a táblázat azt is tartalmazza, hogy az adott tervezési paraméter statikus vagy sztochasztikus jellegű adat-e? A sztochasztikus adatok dinamikus jellege miatt, az adott paraméter hatását digitális ikerben is érdemes megvizsgálni. A táblázat utolsó oszlopában az szerepel, hogy az adott paraméter mikor, milyen módon áll rendelkezésre a tervezés során, ezek az alábbiak lehetnek:

- Alapadat: a tervezés elején rendelkezésre áll. Ilyenek lehetnek például a soron gyártani kívánt terméktípusok.
- Alapadat, módosulhat: a tervezés elején rendelkezésre áll egy tervezett, becsült vagy számított érték, de a sor részletes kidolgozása során ezt lehet, hogy felül kell vizsgálni. Ilyen lehet például a gyártási folyamat, amelyről van egy első elképzelés a tervezés elején. Ez a részletes tervezés során változhat az elérhető gépek képességeinek függvényében, így folyamatlépések összevonása, áthelyezése vagy szétválasztása is megtörténhet.
- Eredmény: a tervezés során kapott érték, ami később bemenete lehet egy másik tervezési lépésnek. Például a szükséges gépek számának meghatározása már bemenete lehet az AGV darabszám kalkulációnak.

Az eljárás kidolgozása során feltételeztem, hogy a termék adatai elérhetőek, a termékek gyárthatóság szempontjából megfelelőek, a technologizálás megtörtént, vagyis ismert, hogy milyen gyártási lépéseken kell a terméknek végighaladnia a gyártás során. A gyártósor tervezése során a fő működési paraméter, vagy mérőszám a gyártandó darabszám.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Kategória		Paraméter	Lehet sztochasz-tikus?	Megjegyzés	Alapadat, vagy eredmény?
P-Q	Termék	Típusok		Szükség esetén termékcsaládok alkotása, ha túl sok típusról van szó	Alapadat
		Darabszámok, termékmix	IGEN	Időbeni változással	Alapadat
		Fizikai jellemzők		Gyártás szempontjából fontos jellemzők (súly, méret, stb.)	Alapadat
		Gyártási folyamatlépések		Alternatívák, esetleges selejt kezelése, tesztelési hurkok	Alapadat, módosulhat
		Előrejelzések	IGEN	Időben megadva	Alapadat
R	Erőforrások	Gépek száma			Eredmény
		Gyártási idő (gépenként)	IGEN	Típusfüggő gépidők	Alapadat, módosulhat
		Meghibásodások (gépenként)	IGEN		Alapadat, módosulhat
		Átállási idő	IGEN	Típusfüggő átállási idők	Alapadat, módosulhat
		Továbbítási méretek (LOT)			Eredmény
		Puffer méretek			Eredmény
		Dolgozó szükséglet			Eredmény
		Karbantartás rendje			Alapadat, módosulhat
S	Készülékek, berendezések	Elektromos fogyasztás		Szerszámok, logisztikai tároló és anyagmozgató eszközök	Alapadat, módosulhat
		Karbon lábnyom		A gyártósor és a rajta gyártott termékek együttes környezeti hatása	Alapadat, módosulhat
S-T	Vezérlés	Gyártási program	IGEN	Felrakási terv, termékmix, gyártási sorrend	Alapadat, módosulhat
		Döntési pontok	IGEN		Eredmény
T	Idő	Életciklus hossza		Vizsgált időtartam	Alapadat, módosulhat
	Egyéb	Műszakrend		Munkaidő és szünetek	Alapadat, módosulhat

5. táblázat Rugalmas gyártórendszereket leíró paraméterek

A tervezés során az adatok minősége és pontossága fokozatosan javul, és ennek megfelelően elképzelhető, hogy bizonyos tervezési lépésekhez vissza kell lépni, azokat újra kell számolni az újabb információk birtokában. Például ilyen újabb információ lehet a gépgyártótól a gépek rendelkezésre állása, vagy a több típus közül kiválasztott AGV üzemi paraméterei. Ebből adódóan egy rugalmas

DOI: 10.14750/ME.2026.012

gyártórendszer tervezése nem lineáris folyamat, hanem számos iterációs ciklus szükséges a megfelelő terv elkészítéséhez.

4.4 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. A fejezet célja a rugalmas gyártórendszerek költségmodelljének vizsgálata az életciklusának elemzésével, majd a soron szükséges kapacitás számítás matematikai modelljének kidolgozása.

4.4.1 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.

	1. év	**2. év**	**3. év**	**4. év**	**…**	**X. év**
P						
Q						
R						
S						
T						

	1. új termék	**2. új termék**	**3. új termék**	**4. új termék**	**…**	**Y. új termék**
P						
Q						
R						
S						
T						

24. ábra A PQRST adatok időbeni változásának vizsgálatára szolgáló tábla

Ahhoz, hogy a sori életciklust vizsgálni lehessen, érdemes megnézni, hogy az életciklus során hogyan változnak a bemenő (PQRST) adatok (24. ábra). A rugalmas gyártórendszerek esetében kiemelten fontos, hogyan változnak a termékek és a termékmix az életciklus során. Ez vonja magával a szükséges erőforrások (pl. extra állomás vagy gép az igény változás alapján) és a támogató szolgáltatások (pl. több szállító eszköz) változását is. A rugalmas gyártórendszerek esetében a legfontosabb – évek során változó – paraméter a termékek és azok gyártási mennyisége. Ezt a 24. ábrán látható módon kétféle struktúrában érdemes megvizsgálni. Egyrészt érdemes megnézni adott időszakonként a fő paraméterek változását, ilyenkor kiemelt szerepet kap a támogató eszközök és erőforrások korosodása (hosszabb karbantartások, akkumulátor degradáció). Másrészt, mivel a nagy változásokra új termék bevezetéskor

DOI: 10.14750/ME.2026.012

lehet szükség, a sornak ezeket az állapotváltozásait külön is meg kell vizsgálni. A termék-kivezetések esetében nem szokott meghatározó változás történni.

A gyártósor életciklusa alatt fontos, hogy a sor profitabilitását fenn lehessen tartani. A sor néhány típussal indul, aztán új típusokkal bővül a gyártott termékek száma, miközben idővel régebbi termékek gyártása megszűnik. A rugalmas gyártórendszerek esetében fontos, hogy a régebbi típusok kivezetése után is van általában lehetőség azok újra gyártására, például, ha cseredarabra, vagy pótalkatrészre van szükség.

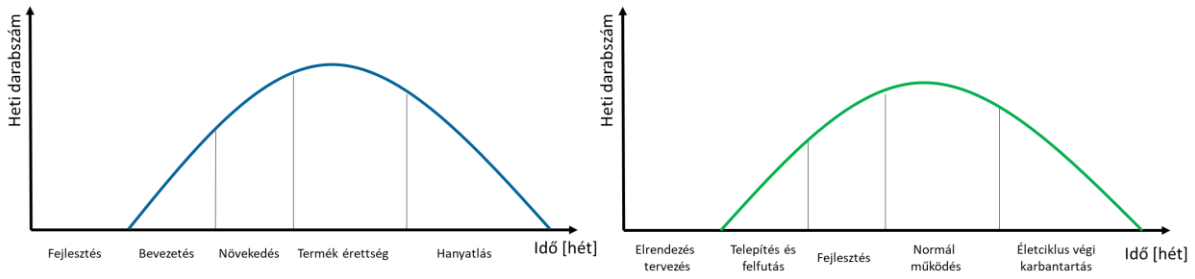
A rugalmas gyártórendszerek esetében különösen fontos az életciklus ismerete, hiszen ezek a rendszerek lehetővé teszik a termékek gyors cseréjét és párhuzamos gyártását, így a vállalat dinamikusan igazíthatja a termékportfolióját a különböző életciklus szakaszokhoz.

A gyártósor maga is egy termék. Egy hagyományos gyártósor életciklusa követi a rajta gyártott termék/termékek életciklusát. Egy rugalmas gyártórendszer életciklusa addig tart, amíg az utolsó terméktípus gyártása is kifut róla. Bár az elrendezés-tervezés első pillanatban pusztán mérnöki problémának tűnik, nem választható el azonban a pénzügyi/megtérülési döntésektől. Egy gyártósor célja, hogy az élettartama elején mihamarabb megtérüljön és az életciklusának jelentős részében profitot termeljen.

A 25. ábra bal oldala mutatja egy termék életciklus görbéjét, 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 (25. 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. A gyártás jellegzetessége, hogy a meglévő eszközökből mindig a legjobb teljesítményt szeretné kihozni, ezért a következő folyamatos gyártási fázisban a sor továbbfejlesztése történik. Ez történhet hagyományos pl. Lean módszerekkel vagy akár modern digitális megoldásokkal. A normál működési szakasz, amikor a kapacitáskorlátokat már sikerült elérni, az adott soron jelentős teljesítményjavulást már csak jelentős extra beruházásokkal vagy jelentős átalakítással lehetne elérni. Az életciklus végén már csak az okvetlenül szükséges karbantartás történik meg, ilyenkor csökken a darabszám, esetleg még az előírt garanciához szükséges cseredarab mennyiséget gyártja le a sor. Ilyen görbét akár a gyártósor minden egyes gépére, eszközére és a támogató logisztikai rendszerekre is lehet készíteni, a görbe jellege hasonló lesz.

A görbék esetében a vízszinten tengelyen az idő szerepel, a tervezési időtartamokra beosztott skálázással. Mivel a termelés tervezése gyakran heti szinten történik, az ábrákon is a hét szerepel időegységként. A függőleges tengelyen az adott időegységre vonatkoztatott gyártott darabszám található. Ez az ábrán a heti darabszám. A továbbiakban az életciklus görbék vízszintes tengelyén az idő, a függőlegesen a darabszám szerepel, de jelentése továbbra is megegyezik a 25. ábrán jelölttel.

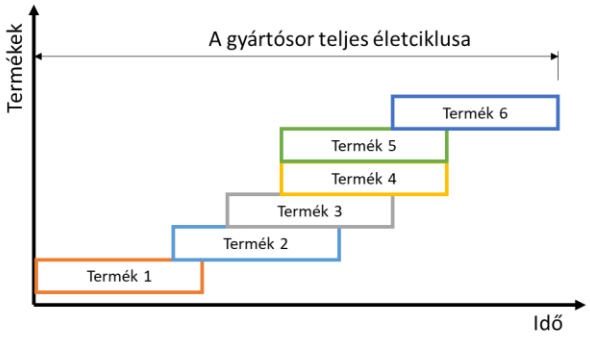
DOI: 10.14750/ME.2026.012



25. ábra Termék és gyártó terület életciklus görbe

A fenti leírás jól mutatja, hogy egy termék esetében hogyan néz ki a termék és a kapcsolódó gyártósor életciklusa. Abban az esetben azonban, hogyha egy gyártósoron több termék is fut, akkor már minden egyes termék külön-külön járja be ezt az életciklust, ami azt is jelenti, hogy a gyártósor életciklusa jóval hosszabb lesz, mint egy terméknek az életciklusa.

A 26. ábra azt mutatja, hogyan alakul az életciklusa egy rugalmas gyártósornak. Induláskor, jellemzően 1 vagy 2 terméktípussal indul a sor, a gyártandó és gyártható termékek száma az idő előrehaladtával bővül. Miközben új termékek kerülnek fel a gyártósorra, más termékek pedig elérik az életciklusuk végét, és befejeződik a gyártásuk. Ha szükséges, akkor a változásokat a gyártósor elrendezésének is követnie kell.



26. ábra Rugalmas gyártórendszeren új termék bevezetések az életciklus során

Az új termék bevezetések során két fő esetet különböztethetünk meg:

- Termékkonfigurációk: ebben az esetben egy meglévő termék paramétere változik. Sokszor csak néhány alkatrész cseréjét jelenti ez (pl. más színű burkolat). A termék útvonal ugyanaz, vagy minimálisan különbözik az egyes termékkonfigurációk között.
- Különböző termékek: ebben az esetben a soron több, egymástól jelentősen különböző termék gyártása történik. A termék útvonala különböző lehet, de a felhasznált technológiák között jelentős az átfedés. Általában logisztikai szempontból komplexebb kiszolgálást igényel.

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

DOI: 10.14750/ME.2026.012

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:

$$ECK = PK + TK + EK + MK + KK + RK + HK + \sum_{i=1}^{n} UK_i + IK \quad (3)$$

ahol:

ECK – életciklus költség
PK – előkészítési és induló költség
TK – beszerzési és telepítési költség
EK – energia költség
MK – működési költség
KK – karbantartási költség
HK – gépleállás, meghibásodás költsége
RK – kivonás és újrahasznosítás költsége
UK – új termék bevezetés költsége
IK – egyéb, előre nem tervezhető költségek és kiadások
n – az új termék bevezetések száma a soron az életciklus során

Amortizációval, vagyis a gépek és berendezések idővel történő értékcsökkenésével két ok miatt nem számoltam:

- a gépek sokáig vannak használva, gyakorlatilag értékük teljes leírásra kerülhet az életciklus alatt
- az életciklus hossza miatt a gépek a sor felszámolása után várhatóan már nem, vagy csak minimális áron értékesíthetők

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)

Bár a költségek nagy része nem feltétlenül lineáris, például az alapanyag költség is függhet a rendelt tételnagyságtól, ezek az eloszlást befolyásoló információk a sor tervezési fázisban még nem állnak rendelkezésre, különösen nem az életciklus többéves időintervallumára. Ezért a sor tervezése során feltételezem, a költségek lineáris eloszlását. Annak érdekében, hogy ne kelljen háromféle költségtípussal számolni, a továbbiakban az egyszeri költségeket és az időfüggő költségeket is átszámolom darabfüggő költségekre. Ennek az egységes számítás mellett az az előnye, hogy például,

DOI: 10.14750/ME.2026.012

ha veszünk egy drága gépet, és hiába írjuk azt le 5 évre, az a költség megjelenik akkor is, ha egy darabot sem gyártunk rajta. Ha azonban darabra írunk rá minden költséget, akkor sokkal pontosabb és összehasonlíthatóbb lesz a költségek struktúrája.

Az egyszeri költség átszámolása darabköltségre:

$$Egyszeri\ költség\ darabköltsége = \frac{Egyszeri\ költségtétel}{Időszak\ alatti\ darabszám} \tag{4}$$

Az időfüggő költség átszámítása darabköltségre:

$$Időfüggő\ költség\ darabköltsége = \frac{Adott\ időszakra\ vonatkozó\ költség}{Adott\ időszakra\ vonatkozó\ darabszám} \tag{5}$$

Az időszak mindkét esetben a teljes életciklusa a sornak.

A darabköltségek kezelésének még egy előnye, hogy az értékesítés során is darabár az eladási ár, így a költség és a kiadás, illetve az abból adódó profit közvetlenül számolható.

Az egyes költség összetevőkkel kapcsolatos főbb jellemzőket a 6. táblázatban foglaltam össze.

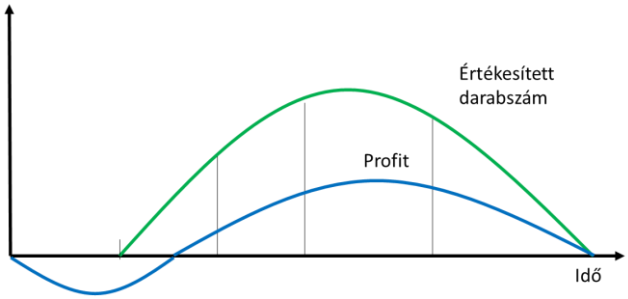
Költség összetevő	**Megjegyzés**	**Milyen jellegű költség?**
PK	Az előkészítési és induló költségbe tartoznak bele a tervezés, a projektkezelés költségei.	Egyszeri költség
TK	A beszerzési és telepítési költségek alkotják a tervezés alapján kiválasztott gépek, eszközök árát, és azok üzembehelyezési költségeit. Ennek a költségnek a specialitása, hogy az egyedi gépek szállítási határideje akár 6-9 hónap is lehet, így a tervezés során, amint döntés születik a gépekről, meg kell azokat rendelni.	Egyszeri költség
EK	A gépek, berendezések által használt energia költsége.	Időfüggő költség
MK	A működési költségek közé tartoznak a gyártás és a kapcsolódó logisztika költségei, a főbb tételek: - bérköltségek, (MKB) - képzési költségek, (MKK) - alap- és segédanyagok költségei, (MKM) - raktározási és szállítási költségek, (MKL) - minőség-ellenőrzés költsége, (MKQ) - illetve bármilyen más olyan nem egyszeri költség, amely a gyártási és logisztikai folyamatok működtetéséhez szükséges. (MKU)	Időfüggő és darabfüggő költségek
KK	A karbantartási költség, amelybe a rendszeres tervezett karbantartási tevékenység költsége tartozik bele. A karbantartás lehet folyamatos időfüggő vagy adott darabszámonkénti. A nem várt karbantartási költségek a HK költségkategóriába tartoznak.	Időfüggő vagy darab függő költség

DOI: 10.14750/ME.2026.012

RK	Kivonás és újrahasznosítás költsége, amelynek egy része egyszeri költség (pl. engedélyeztetés), majd utána a termelés volumenétől függő darabfüggő költség.	Egyszeri és darabfüggő költség
HK	Gépleállás, meghibásodás költsége egyszeri költségként jelenik meg, de adott időperiódusonként számítani lehet rá. A rendelkezésre álló adatoktól függően lehet egyszeri vagy időfüggő költségként kezelni.	Egyszeri vagy időfüggő költség
UK	Új termék bevezetés költsége, ami jellemzően valamilyen új berendezés vásárlása, a sor értékéhez képest kisebb összegű beruházásként jelenik meg.	Egyszeri költség
IK	Egyéb, előre nem tervezhető költségek és kiadások, ezek nagy része olyan egyszeri, nem várt kiadás, ami a projekt során felmerül.	Egyszeri költség

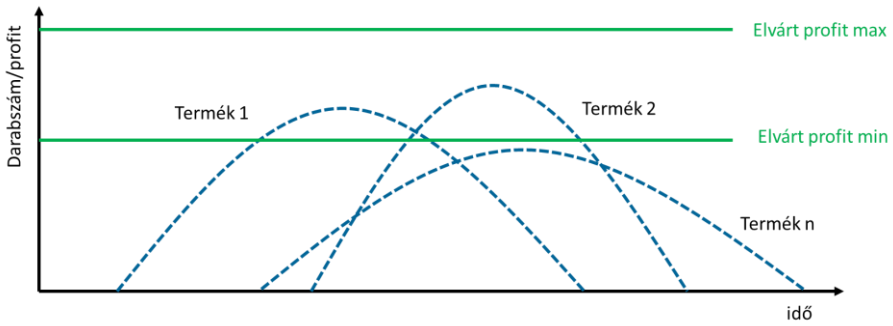
6. táblázat Költségtípusok és jellemzőik összefoglaló táblázata

Üzleti szempontból a termékek gyártási volumene, egyértelműen megfeleltethető az értékesítés volumenével (27. ábra). A profit a termék növekedési és érettségi fázisában megfelelő, azonban amint az adott termék értékesítése csökkenni kezd a profit is gyors csökkenésnek indul. A profit számításakor a fix és a változó költségekkel is számolni kell. A gyártási elrendezéshez kapcsolódó fix költségek lehetnek például a berendezések, gépek, telepítési költségek. A gyártási elrendezés döntésekhez kapcsolódó változó költségek például a karbantartási költségek, anyagmozgatási költségek stb.



27. ábra A termék életciklus értékesítési és profit görbéje

Hagyományos gyártósor esetén a profit csökkenése a gyártósor végét is jelenti. A rugalmas és konfigurálható gyártósorok esetében viszont ilyen esetekben megoldást jelent a gyártósorra egy új termék bevezetése, amivel ismét vissza lehet állítani a gyártási volument és ezzel együtt a profitabilitást.



28. ábra A profitabilitás megjelenése több termék életciklusánál

DOI: 10.14750/ME.2026.012

A megfelelően megtervezett új termék bevezetésekkel biztosítható a sor vagy gyártó terület folyamatos megfelelő profitszintje (28. ábra).

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.

$$Profit(t) = \sum_{i=1}^{n} Profit_i(t) \tag{6}$$

$$Elvárt\ profit\ minimum\ < Profit(t) < Elvárt\ profit\ maximum \tag{7}$$

ahol:

i – az i-edik termék

n – a t időpillanatban gyártott termékek száma

Bár a fenti képletekből úgy tűnhet, hogy minden egyes terméknek profitábilisnak kell lennie, ennek ellenére elképzelhető olyan szituáció, amikor $Profit_i < 0$, vagyis veszteséges az i-edik termék gyártása. Veszteséges lehet a termék teljes gyártási ciklusán vagy csupán egy adott időszakban. Ez üzleti döntés eredménye, például ilyen és ehhez hasonló esetekben:

- a terméket megéri minimális veszteséggel gyártani, mert a termék vevője kiemelten fontos és hosszútávú üzleti cél a megtartása,
- a terméket megéri veszteséggel gyártani, mert a vevő több terméket is gyártat a cégnél és a lényeg, hogy az összes termék együttes gyártása profitábilis legyen,
- a termék gyártása ideiglenesen veszteséges lehet, amíg felfut a termelés és több erőforrást kell allokálni hozzá, több selejt keletkezik, ami majd a gyártás felfutásával normalizálódik,
- a termék gyártása ideiglenesen veszteséges lehet, mert kifutó termék és már csak minimális darabszámot kell gyártani belőle, de a termék életciklusa során keletkezett annyi profit, ami elbírja az életciklus végi veszteséget.

Életciklusra vetítve felírható az alábbi összefüggés:

$$Profit = Bevétel - ECK \tag{8}$$

ahol,

Bevétel – a gyártósor teljes életciklusa során termelt bevétel

ECK – a teljes életciklus költség

Profit – a gyártósor teljes életciklusa során termelt profit

DOI: 10.14750/ME.2026.012

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

Bár a profitra a gazdasági szakemberek egy minimum elvárt és egy várható maximum értéket szoktak egy cég gazdasági tervezésénél készíteni, a cég számára a cél a minél magasabb profit elérése.

4.4.2 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.

Az életciklus során egy rugalmas gyártórendszeren 5-10, de akár 20-30 termék gyártása is történik. Mivel ezeket a termékeket piaci igényre gyártják, ezért igaz rájuk a termék életciklusokra jellemző viselkedés és annak szakaszai, a bevezetés, növekedés, érettség és hanyatlás. A bevezetéskor a termék új a piacon, az értékesítés lassan indul, magas költségek mellett; a növekedés fázisában az eladások gyorsan emelkednek, a profit ugrásszerűen nő; az érettségben a piac telítődik, az eladások tetőznek; míg a hanyatlás során a kereslet csökken és a terméket végül kivonják a piacról. Így felhasználható a Cox elmélet [37] egy termék életciklusának leírására, vagyis egy termék életciklusa felírható egy parabolaként.

Az életciklus parabola egy lefelé nyitott parabola, amelynek a koordinátarendszerében 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.

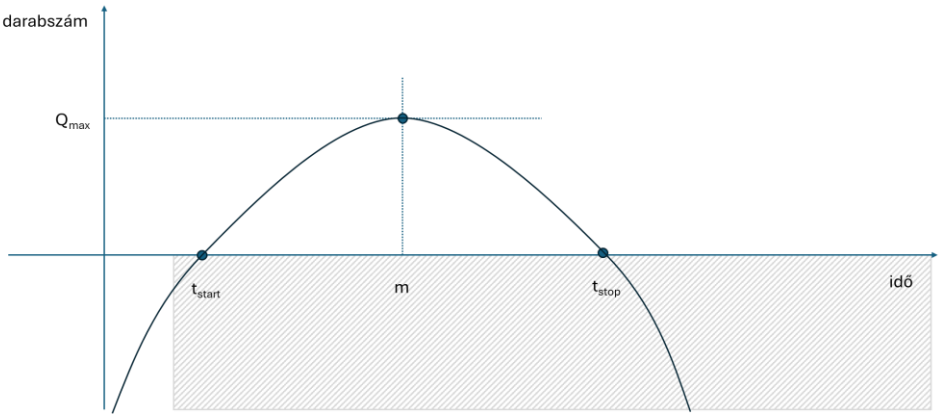
A gyártósor tervezés kezdeti szakaszában nagyon kevés információ áll rendelkezésre a gyártandó termékekről, viszont ennek ellenére meg kell hozni azt a döntést, hogy a gyártósort milyen kapacitásra kell tervezni.

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, cikkszáma, 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 csúcsán (Q_{max}).

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Ezek alapján azonban a termék életciklusára vonatkozó parabola görbe felrajzolható (29. ábra).



29. 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. Amennyiben a parabola előtt még történik gyártás az a tesztelés vagy próbagyártás, amelytől eltekintek az alábbi okok miatt:

- nem tervezhető a hossza és a jellemzői,
- nem számít bele a gyártott darabszámba,
- a kapacitást csak minimális mértékben veszi igénybe.

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

$$t_{start} \leq t \leq t_{stop} \tag{9}$$

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

$$\begin{gathered} Q(t) \geq 0 \text{ és} \\ t_{start} > 0 \text{ és } t_{stop} > 0 \end{gathered} \tag{10}$$

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

$$m = t_{start} + \frac{t_{stop} - t_{start}}{2} \tag{11}$$

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

Egy termékre az életciklus görbe felírható az alábbi alakban:

$$Q(t) = -at^2 + 2a\,m\,t + (Q_{max} - am^2) \tag{12}$$

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

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Ugyanez kanonikus alakban így írható fel:

$$Q(t) = -a(t-m)^2 + Q_{max} \tag{13}$$

ahol,

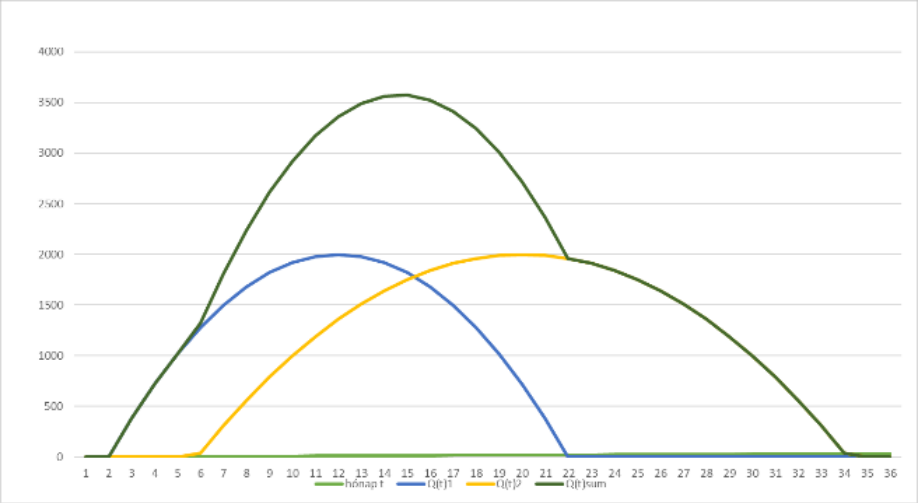
Q(t) – a termék gyártott mennyisége a t időszakaszban

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

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 30. 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.



30. ábra Két termék életciklus görbéje és eredőjük számítása

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

$$a = a \qquad b = -2ap \qquad c = ap^2 + q \tag{14}$$

A termékek darabszámát leíró függvény:

$$Q_i(t) = a_i t^2 + b_i t + c_i \qquad i = 1, \dots, n \text{ és ahol } Q_i(t) > 0 \tag{15}$$

ahol,

i – az i-edik termék

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Ekkor az összege felírható a termékek darabszámának az alábbi módon:

$$S(t) = \sum_{i=1}^{n} Q_i(t) \quad Q_i(t) > 0 \tag{16}$$

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

$$C = MAX(S(t)) \tag{17}$$

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 egybevág 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

Az eljárásra példát a Melléklet Alkalmazási példa 1. – Szükséges gyártási kapacitás meghatározása tartalmaz.

A fejezetben leírtak alapján az alábbi tézist fogalmaztam meg:

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]

DOI: 10.14750/ME.2026.012

4.5 Aktivitás helyek és honnan-hova táblázat

A következő tervezési lépés a gyártási technológia alapján az aktivitási helyek meghatározása, amelyek megfelelnek azoknak a gépeknek vagy gépcsoportoknak, ahol a gyártott darabbal valamilyen művelet történik. Amennyiben a technológia része (művelet) egy darab pufferben tárolása (pl. pihentetés), akkor annak is be kell kerülnie az aktivitás helyek listájába.

Az aktivitás helyek listájának készítésekor a technológia figyelembevételével érdemes megvizsgálni, hogy milyen lehetőségek vannak tevékenységek összevonására vagy különválasztására.

Az aktivitás helyek listája alapján készül el a korábban bemutatott módon a honnan-hova táblázat, amely tartalmazza az egyes aktivitás helyek közötti anyagáramlás mennyiségét egy adott időszakra. Az aktivitás helyek táblázat és a honnan-hova táblázat az SLP módszer esetében tárgyalt módon épül fel.

Aktivitás helyek
AH1
AH2
AH3
AH4

Távolságok				
Honnan - hová	AH1	AH2	AH3	AH4
AH1	0			
AH2		0		
AH3			0	
AH4				0

31. ábra Aktivitás helyek és honnan-hova táblázat

A honnan-hova táblázat esetében az anyagáram mennyiség meghatározásánál egy leggyorsabb virtuális termékkel kell számolni. A leggyorsabb termék jellemzője, hogy minden aktivitás helyen az ott áthaladó termékek minimális gyártási idejével rendelkezik. Tehát ez egy olyan virtuális termék, ami a leggyorsabban haladna át a soron, így a legnagyobb terhelést adja a rendszernek, ezért alkalmas a méretezéshez. Az időszakot oly módon érdemes kiválasztani, hogy könnyen lehessen számolni vele. A rugalmas gyártórendszerek esetében a honnan-hova táblázat időegysége/időszaka lehet a műszak vagy az egy nap, mert egy ilyen időegység ezeknek a gyártórendszereknek az esetében elég a teljes gyártott termékpaletta leképezésére, s így a vizsgálatára.

4.6 Gépek méretezése

A gépek esetében kapacitástervezés történik, a cél, hogy minden időszakban képesek legyenek az adott mennyiséget legyártani. Egy adott aktivitás helyen egy műveletet végrehajthat egy gép vagy egy gépcsoport a technológiai jellemzőktől függően. A rugalmas gyártórendszerek esetében a gépcsoport azonos feladatot ellátó azonos specifikációjú gépek egymással párhuzamosan kapcsolt együttesét jelenti. A gépeket a tervezés korai szakaszában kell kiválasztani, amikor még kevés információ van a rendszerbe kapcsolásból, anyagmozgatásból származó kapacitás veszteségekről, ezért a gépekre vonatkozó szükséges kapacitás meghatározásakor egy biztonsági tényezővel érdemes eltérni a biztonság irányába.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Ennek a tervezési lépésnek a végeredménye, hogy az egyes aktivitás pontokban ismert a szükséges gépkapacitás.

A szükséges gépek meghatározására a legegyszerűbb képlet egy adott időszakra:

$$Szükséges\ gépszám = \frac{Gyártandó\ darabszám}{Gépkapacitás} \cdot Biztonsági\ tényező \tag{18}$$

A szükséges gépszámra kapott érték általában nem kerek szám, hanem valamilyen tizedes érték a vége a számnak. Amennyiben 0,1-nél kisebb a tizedes érték, akkor érdemes megvizsgálni, hogy a gépkapacitás módosítható-e úgy, hogy a szükséges gépszám a lefelé kerekített érték lehessen. Tapasztalatom szerint, amennyiben a tizedes értéke nagyobb vagy egyenlő, mint 0,1 akkor a kapott szükséges gépszám értékét felfelé kell kerekíteni.

A biztonsági tényezővel lehet figyelembe venni a selejtből, rendelkezésreállásból, a rendszer elemeinek összekapcsolásából származó veszteségek együttes hatását. Általános értéket nem lehet rá mondani, sokat segíthet, ha vannak már korábbi hasonló gyártósorok, amelyből tapasztalati értékeket lehet nyerni. Általánosságban egy rugalmas gyártórendszer esetében a minimális értéke 1,1, mivel az ilyen sorokon alkalmazott magasan automatizált gépek rendelkezésre állása jellemzően 95%-99% között van, és hasonló mértékű veszteséget okoz a rendszerelemek egymásra hatásából adódó kapacitásvesztés is. A veszteségek pontos számítása csak megfelelően felépített digitális iker modellel lehetséges.

A gépek szükséges kapacitásának meghatározása után a gépgyártó, az adott kapacitáshoz készíti el a gépet.

A gépgyártónak a tervek alapján a gépekre az alábbi, a tervezés további lépéseihez szükséges adatokat kell megadnia:

- Gép rendelkezésre állása
- Gép MTTR értéke
- Gép fizikai helyszükséglete
- Gép elektromos fogyasztása
- Gép egyéb igényei, jellemzői

Fontos megjegyezni, hogy a gyártó cég a gépgyártónak az elvárt kapacitást adja meg, a gépgyártó megvalósításától, az aktuális konstrukciótól függnek az előző adatok. Ezeket adja meg az elkészített konstrukcióra a gépgyártó cég.

A gépcsoportok esetében a rendelkezésre állás és az MTTR a gépcsoportot alkotó gépek együttes jellemzője.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Gépcsoportok esetében a gépcsoport eredő rendelkezésre állása minden esetben nagyobb, mint az egyes gépek rendelkezésre állása:

$$A_{gépcsoport} = 1 - \prod_{i=1}^{n}(1 - A_i) \tag{19}$$

ahol,

A_i – az i-edik gép rendelkezésre állása százalékban.

A gépcsoport MTTR értékét kiszámíthatjuk az alábbi közelítő képlettel, amely súlyozza az egyes gépek MTTR értékét a hibás állapotuk valószínűségével, majd normalizálja a rendszer hibás állapotának valószínűségével:

$$MTTR_{gépcsoport} = \frac{\sum_{i=1}^{n} MTTR_i \,.\, (1 - A_i)}{1 - A_{gépcsoport}} \tag{20}$$

ahol,

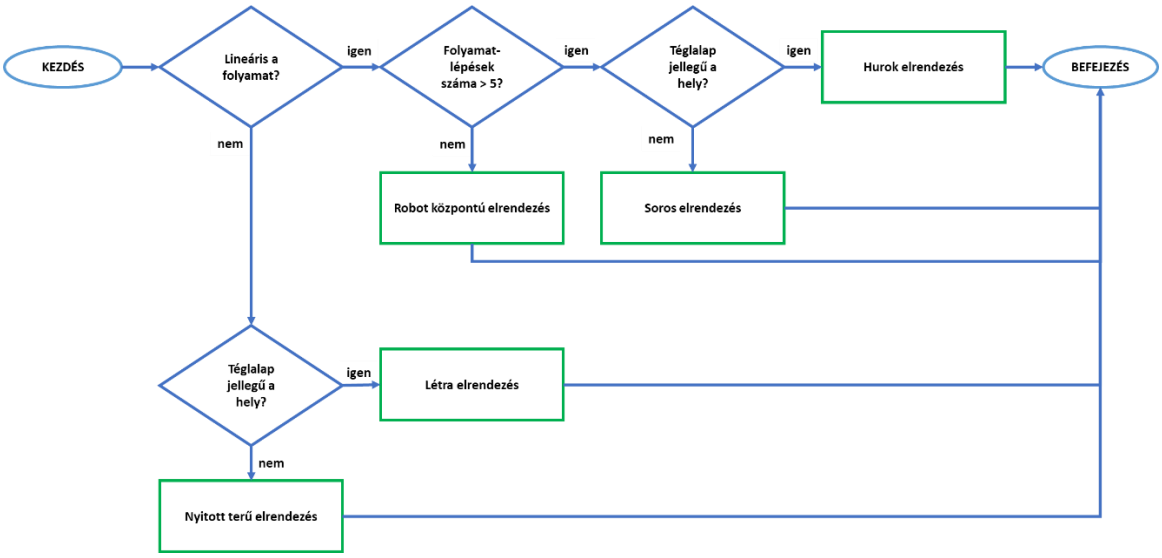
$MTTR_i$ – az i-edik gép átlagos javítási ideje,

$MTTR_{gépcsoport}$ – a gépcsoport átlagos javítási ideje.

A gépcsoportok esetében a további lépések során ezeket az adatokat kell felhasználni.

4.7 Elrendezés-tervezés

Az elrendezés-tervezés két részből áll: a rugalmas gyártórendszer elrendezés típusának kiválasztásából és a hozzá kapcsolódó anyagmozgatási mód kiválasztásából.



32. ábra Elrendezés előzetes kiválasztásának folyamatábrája

DOI: 10.14750/ME.2026.012

A részletes elrendezés-tervezés előtt egy előzetes vizsgálatot lehet végezni, pár kérdéssel, ami segít a későbbiekben annak eldöntésében, hogy mely elrendezés variációk jöhetnek szóba. Az előzetes elrendezés vizsgálatra általam kidolgozott folyamatábrát a 32. ábra tartalmazza. Az előzetes vizsgálat három szempontot vesz figyelembe:

- A folyamat linearitását
- A gyártási folyamatlépések számát
- A rendelkezésre álló hely alakját (téglalap, négyzet vagy egyéb pl. L vagy U forma lehet)

A részletes elrendezés tervezésre kidolgozott eljárás az alábbi lépésekből áll:

1. aktivitás helyek meghatározása: ez a szükséges állomások számbavételét jelenti a technológia alapján (ez a tervezés korábbi lépésében megtörtént)
2. honnan-hová táblázat elkészítése: a gépek közötti anyagáram leírása (ez a tervezés korábbi lépésében megtörtént)
3. elrendezés típus kiválasztása: a megfelelő rugalmas gyártórendszer elrendezés kiválasztása
4. elrendezés változatok kiértékelése: az egyéb befolyásoló tényezők figyelembevételével
5. végleges elrendezés változat kiválasztása

Az elrendezés kiválasztás alapja a honnan – hova táblázat. A rugalmas gyártórendszerek esetében az anyagáramlás alapja az egy munkadarab. Előfordulnak olyan esetek is, amikor palettán vagy más anyagmozgató eszközön több darab is mozog, de a rugalmas gyártórendszerek filozófiájához az egy darabos áramlás illeszkedik leginkább. Ennek az alábbi praktikus okai is vannak:

- a rugalmas gyártórendszerek lényege, hogy nulla átállással tudnak típust váltani, így tetszőleges sorrendben jöhetnek a termékek, ami pedig a leginkább folytonos áramlást az egy darabos áramlással tudja megvalósítani. Amennyiben az átállás mégsem nulla, az a gyártási időbe számolódik bele, annak része.
- a paletták és AGV-k esetében a több darab szállítása esetén a gépeknek komplexebb bemeneti és kimeneti felületet kell biztosítani a palettáról vagy AGV-ről a több darab leszedéséhez és felrakásához, ami komplexebb és ezáltal drágább gépeket eredményez.
- a rugalmas gyártórendszerek esetében a minőség-ellenőrzés általában a sori folyamatok része. Abban az esetben, ha egy több darabot szállító palettán vagy AGV-n csak egy része selejt a termékeknek, az jelentősen megnöveli a hibás darabok kisorolásának bonyolultságát és utána a részleges palettára jutó gyártási idő a folyamat kiegyensúlyozottságának is rosszat tehet.

A honnan-hova táblázat értelmezhető egy n oszlopból és n sorból álló négyzetes mátrixként. A táblázatban a sorazonosító oszlopban és sorban az aktivitás helyek szerepelnek. Az aktivitás helyek a folyamatterv alapján meghatározott gépek vagy gépcsoportok, amelyek lehetnek megmunkáló, szerelő, mérő-minőségellenőrző vagy egyéb állomások. Az aktivitás helyek közé pufferek csak akkor kerülnek

DOI: 10.14750/ME.2026.012

be, amennyiben a puffer a technológiai folyamatok miatt szükséges (pl. pihentetés, száradás). A sor teljesítményét befolyásoló pufferek méretezése a tervezés későbbi fázisában történik.

A táblázatban az i az aktuális sort, j az aktuális oszlopot jelöli a H honnan-hova táblázatban. A példákban az X jelölés azt mutatja, hogy hol lehet anyagáramlás. A fentiek alapján jelölje H a honnan – hova táblázatot, mint mátrixot, akkor a mátrix elemei felírhatók a következő módon:

$$H = [mf_{i,j}], \qquad ahol\ 1 \leq i \leq n\ és\ 1 \leq j \leq m \tag{21}$$

ahol

n, m – a soron lévő elemek száma, mivel n = m ezért a mátrix négyzetes (kvadratikus)

$mf_{i,j}$ – az, i-edik oszlop és j-edik sorhoz kapcsolódó anyagáramlás

Mátrix formátumban felírva:

$$H = \begin{bmatrix} mf_{1,1} & \dots & mf_{1,m} \\ \dots & \dots & \dots \\ mf_{n,1} & \dots & mf_{n,m} \end{bmatrix} \tag{22}$$

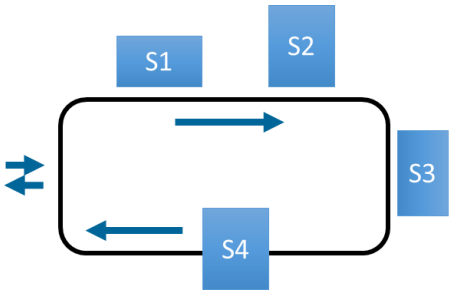
ahol $mf_{i,i} = mf_{j,j} = 0$, vagyis a mátrix főátlójában nincsenek elemek (értékük nulla). Az esetleges gépen belüli mozgás (pl. darab átfogása, átforgatása a műveleti idő része, nem anyagmozgatásnak számít).

A 7. táblázat segít a tervezni kívánt rugalmas gyártórendszer elrendezésének kiválasztásában, a kiválasztott elrendezés alapján lehet folytatni a tervezést a további lépésekkel. A táblázatban lévő példák megmutatják, hogy a különböző elrendezések a honnan-hova táblázatban milyen mintázatként jelennek meg.

<table>
<tr><th>Elrendezés típus</th><th>Honnan – hova táblázat jellege</th></tr>
<tr><td>

Soros elrendezés
</td><td>
<table>
<tr><th></th><th>S1</th><th>S2</th><th>S3</th><th>S4</th></tr>
<tr><td>S1</td><td>0</td><td>X</td><td>0</td><td>0</td></tr>
<tr><td>S2</td><td></td><td>0</td><td>X</td><td>0</td></tr>
<tr><td>S3</td><td></td><td></td><td>0</td><td>X</td></tr>
<tr><td>S4</td><td></td><td></td><td></td><td>0</td></tr>
</table>
Az anyagáramlás egyenes, ebből adódóan a táblázatban a bejegyzések közvetlenül a főátló fölött találhatók a H[i, j] = H[i, i + 1] mezőkben. Amennyiben a selejt vizsgálat nem a soron történik, akkor az áramló mennyiségek egyenlőek, azaz H[i, i + 1] állandó minden i-re.
</td></tr>
</table>

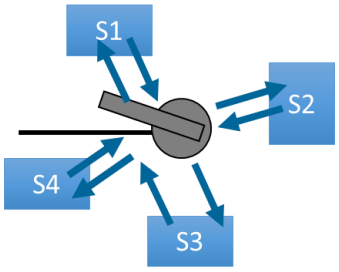
DOI: 10.14750/ME.2026.012



Zárt hurok elrendezés

	S1	S2	S3	S4
S1	0	X	X	0
S2		0	X	0
S3			0	X
S4				0

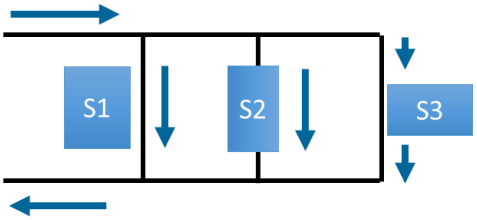
A zárt hurok esetében a honnan-hova táblázat jellege hasonló a soros elrendezéshez, de lehetőséget nyújt olyan sorrend megteremtésére, ahol egy kör megtétele után a darab visszatérhet egy korábbi szakaszra.



Robot központú elrendezés

	S1	S2	S3	S4
S1	0	0	0	X
S2	0	0	0	X
S3	0	0	0	X
S4	0	X	X	0

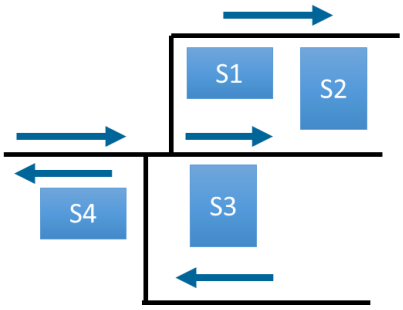
Az anyagáramlás ebben az esetben jellegzetesen mutatja, hogy a robot (S4) középen felvesz egy darabot, lead egy darabot, a mátrixban az az elem, amelynek a sorában vagy oszlopában bejegyzések vannak, az a robot. Az ilyen elrendezés minden esetben oda-vissza anyagáramot okoz a gépek és a robot között.



Létra elrendezés

	S1	S2	S3
S1	0	X/Y	X/Y
S2		0	X/Y
S3			0

Az anyagáramlási kép ebben az esetben adott arányban osztott anyagáramot mutat az egyes ágak között.



Nyitott terű elrendezés

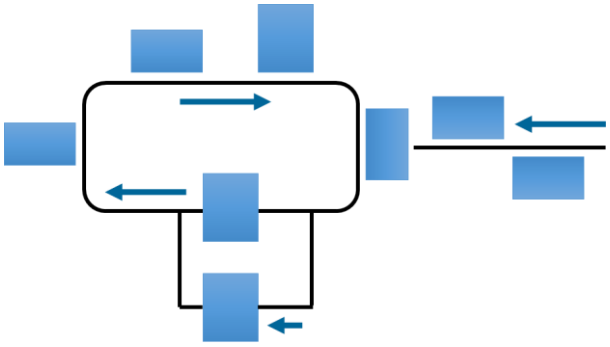
	S1	S2	S3	S4
S1	0	X	0	X
S2	0	0	X	0
S3	X	0	0	0
S4	0	0	0	0

Ebben az esetben az anyagáram teljesen szabad lehet, mindkét irányú anyagáram elképzelhető.

7. táblázat Elrendezések és a súlyozott anyagáram mátrixok kapcsolata

DOI: 10.14750/ME.2026.012

A rugalmas gyártórendszerek esetében előfordulnak kevert elrendezések, amikor többféle elrendezés is előfordul a soron (33. ábra). Az ábrán látható példában egy hurok elrendezésű sor esetében a jobb oldali beépülő alkatrészeket szállító szakasz soros elrendezésű, míg az alsó elágazó a tesztelést végző szakasz pedig létra elrendezésű. Általánosságban megállapítható, hogy a támogató tevékenységeket nyújtó műveleteket, amelyek nem részei a fő gyártási folyamatnak, azokat érdemes külön ágakban megvalósítani. A külön ágakkal kapcsolatban fontos követelmény, hogy ne lassítsák, blokkolják a főágat.



33. ábra Többféle elrendezés egy soron belül

A kiválasztott elrendezés hatással van az anyagmozgatás módjára is. A rugalmas gyártórendszerek esetében a két leginkább elterjedt módszer az anyagmozgatásra a konvejor és az AGV. A soros elrendezés esetében még portáldarut is lehet alkalmazni, de annak nagy hátránya, hogy a portáldaru meghibásodása a teljes sor azonnali blokkolásával jár. Az egyes elrendezés típusok esetében az anyagmozgatás módja:

- Soros elrendezés: konvejor, portáldaru
- Zárt hurok: konvejor, AGV
- Robot központú: robot
- Létra elrendezés: konvejor, AGV
- Nyitott terű elrendezés: AGV

Az, hogy a két legelterjedtebb anyagmozgatási módszer közül melyiket érdemes választani, számos szemponttól függhet, a 8. táblázatban összefoglaltam a legfontosabbakat.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Szempont	Konvejor	AGV
Gyártási folyamat jellege	Folyamatos, lineáris	Elágazó vagy visszatérő
Elrendezés rugalmassága	Fix, nehezen módosítható	Könnyen módosítható útvonalak
Termékek mérete és súlya	Nagy tömegű termékekhez stabil	Kisebb, moduláris termékekhez praktikus
Beruházási költség	Egyszeri nagyobb beruházás, alacsony fenntartási költség	Jobban skálázható, magasabb fenntartási költség
Karbantartás és üzemeltetés	Egyszerűbb mechanikailag, rendszerszintű feladat a javítás	Egyenként javíthatók
Automatizálás szintje	Magas, nem szükséges emberi beavatkozás	
Biztonság és ütközésvédelem	Fizikailag elhatárolt, kevés mozgó elem	Emberek között is működik
Skálázhatóság	Nehezebben bővíthető	Könnyebben bővíthető további AGV-kel
Térkihasználás	Fix pályát igényel	Optimalizálható útvonal
Termelési volumen	Nagy volumenű, több típus gyártása esetén	
Energiahatékonyság	Folyamatos működés mellett optimalizálható	Akkumulátoros, tölteni kell
Zajszint és munkakörnyezet	Mechanikus zaj, közepesen hangos	A modern típusok csendesek
Kockázat meghibásodás esetén	Egy hiba az egész sort leállíthatja	Egy AGV kiesése nem állítja meg a rendszert
Multifunkcionalitás	Csak szállításra alkalmas	Szállíthatnak, emelhetnek, egyéb módon mozgathatják a darabot
Infrastruktúra igény	Komoly építési munkák szükségesek	Minimális infrastruktúrával is működhetnek

8. táblázat Anyagmozgatási módszerek összehasonlítása

Ebben a lépésben kialakult az elrendezés vagy az elrendezés változatok és kiválasztásra került a gépek, gépcsoportok közötti anyagmozgatás módja.

4.8 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.

A fejezet célja eljárás kidolgozása a rugalmas gyártórendszer logisztikai komponenseinek (puffer, AGV) méretezésére.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

4.8.1 Puffer méretezése

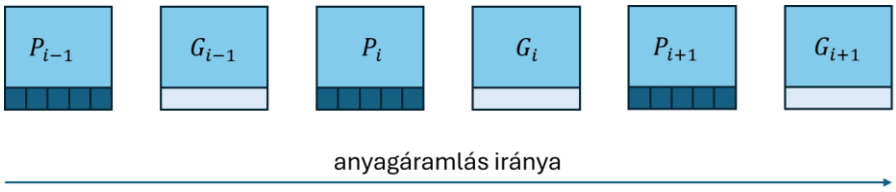
A gyártósorok esetében a pufferek legfontosabb célja a különböző zavarok, meghibásodások, nem tervezett leállások hatásának csökkentése. Ilyen problémák az alábbiak lehetnek:

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

A rugalmas gyártórendszerek esetében a műveleti idők szórása nem jellemző, mivel a gépek, állomások jelentős része automata állomás, így az ebből származó puffer igénnyel nem foglalkozom. A számítások során a korábban bevezetett leggyorsabb termék jellemzőit használom. A rugalmas gyártórendszerek rugalmasságának a kulcsa, hogy a termékek közötti váltás ideje (az átállás) minimális legyen, praktikusan nulla. Bár ez nem minden esetben teljesül, az ebből adódó puffer igénnyel sem foglalkozom, mivel az átállási idő általában a műveleti idő része. A fentiek alapján a rugalmas gyártórendszerek esetében a pufferek szükségességének fő okai a sori meghibásodások. A továbbiakban a meghibásodás kifejezést használom általánosságban minden olyan leállásra, amely hatásának kompenzálására pufferre lehet szükség.

A rugalmas gyártósorok esetében a pufferek FIFO elrendezésűek. Igaz ez a legtöbb esetben akkor is, amikor a pufferek szerepét AGV-k töltik be. Az egyetlen kivétel a nyitott terű elrendezés, ahol a vezérléssel sokféle puffer logika megvalósítható, bár áttekinthetősége miatt ott is a FIFO a legelterjedtebb.

A pufferek viselkedésének az első fontos befolyásolója a puffer előtt és után lévő állomás gyártási idejének egymáshoz való viszonya. Ha adott G_{i-1} és G_i állomások és közöttük a P_i puffer (34. ábra), akkor a puffer terhelése szempontjából a legrosszabb eset, ha a G_i állomáson a leglassabb, legnagyobb gyártási idejű termék, míg a G_{i-1} állomáson a leggyorsabb, legkisebb gyártási idejű termék fut.



34. ábra Rugalmas gyártórendszer egy szakaszának felépítése

DOI: 10.14750/ME.2026.012

A puffer viselkedésére az alábbi esetek lehetségesek:

- ha $tw(G_i) = tw(G_{i-1})$, akkor az áramlás teljesen kiegyensúlyozott a puffer folyamatosan üres
- ha $tw(G_i) > tw(G_{i-1})$, akkor a G_i folyamatosan vár a G_{i-1} gépre, a puffer üres
- ha $tw(G_i) < tw(G_{i-1})$, akkor a G_{i-1} gép gyorsabb, mint a G_i, a P_i puffer fokozatosan megtelik, a C_i kapacitás megteléséig

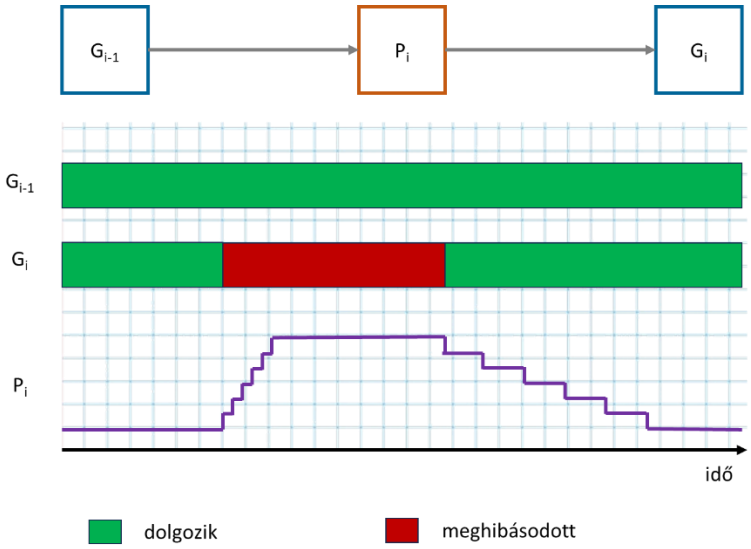
ahol,

$tw(G_i)$ – az i-edik állomás műveleti ideje

C_i – a P_i puffer kapacitása

A fentiek alapján látható, hogy a gyártási idők kiegyenlítettsége fontos a pufferek viselkedése szempontjából. Ideális esetben a gyártósornak az elejétől a végéig egyre gyorsabbnak kell lennie, hogy a műveleti idők különbsége miatt ne legyen szükség olyan pufferekre, amelyek gyakorlatilag folyamatosan tele vannak.

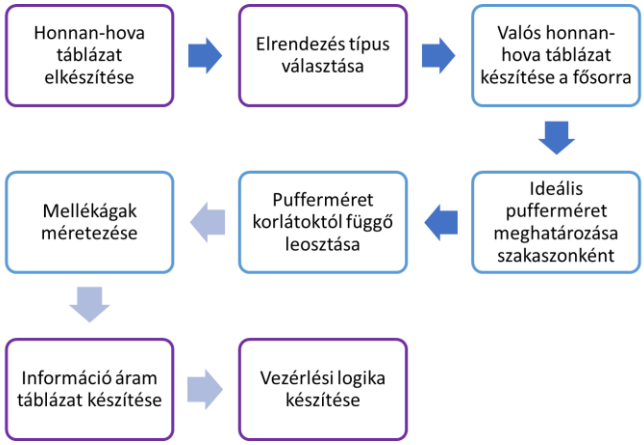
A következő általános példa bemutatja a pufferek viselkedését meghibásodás hatására. A 35. ábra tartalmaz egy alapvető rendszert, amelynek az elemei 2 gép (G_{i-1} és G_i) és a közöttük lévő P_i puffer. A példában a puffer működése úgy történik, hogy a G_{i-1} gép folyamatosan dolgozik (a zöld felső csík), míg a G_i gép egy idő után meghibásodik (a vörös színű időszak a G_i gép állapotát jelző csíkon). Látható az alsó, a puffer telítettségét mutató grafikonon, hogy a meghibásodás kezdetekor a puffer elkezd telni, majd eléri a P_i puffer kapacitását. Ez után egy ideig a puffer tele van, innentől már blokkolja a G_{i-1} gépet is. A meghibásodás vége után a G_i gép elkezdi ledolgozni a puffer tartalmát.



35. ábra Puffer működése meghibásodás esetén

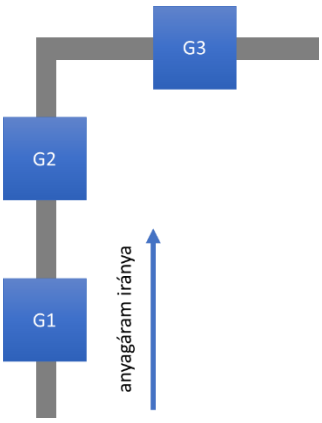
DOI: 10.14750/ME.2026.012

A példából látható, hogy a cél annak az elkerülése, hogy a puffere megteljen, mert onnantól tovább blokkolja a sor megelőző szakaszát is. Az általam kidolgozott méretezési eljárás arra fókuszál, hogy az egyes szakaszok ne teljenek meg.



36. ábra Puffer méretezési eljárás

A kidolgozott puffer méretezési eljárás lépéseit a 36. 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.



37. ábra Valós honnan-hova táblázat származtatása

A következő lépés a valós honnan-hova táblázat létrehozása. Erre a táblázatra azért van szükség, mert elrendezéstől függően módosulhat a valós anyagáramlás két aktivitás pont között. Például a 37. ábrán látható szakaszon a honnan-hova táblázat alapján tételezzük fel, hogy a P1 típus a G1-G2 gépek között mozog, míg a P2 típus a G1-G3 gépek között. Azonban a kiválasztott elrendezés miatt a P1 terméknek és a P2 terméknek is végig kell haladnia mindhárom állomáson, hogy a saját cél állomásait érinteni tudja. Ez azért fontos, mert puffer méretezés szempontjából minden darab, ami áthalad egy szakaszon „terhelést” jelent az adott szakaszra, mint pufferre. Tehát a valós honnan-hova táblázat úgy jön létre, hogy elrendezés helyesen mutatja az állomások közötti áramlás mennyiségét.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Elrendezéstől függően a 9. táblázat tartalmazza a valós honnan-hova táblázat jellemzőit.

Elrendezés típus	Felbontás szabályai
Soros	A gyártósor egy lineáris folyamatot alkot, az összes termék végighalad minden lépésen.
Zárt hurok	A sor rendelkezik egy felrakó és egy leszedő állomással a sor elején és végén. Itt elméletben „fel lehet vágni" a sort és így egy lineáris folyamatként lehet rá tekinteni, ahol minden termék végighalad minden lépésen.
Robotos	Ez a sortípus annyiban speciális, hogy a honnan-hova és a valós honnan-hova táblázat megegyezik. A puffer szerepét a robot tölti be.
Létra	Ennél az elrendezésnél az egyes hurokágakat, a létra fokait kell minden olyan termékre méretezni, amelyik végighalad rajtuk. Mindegyik hurok kezelhető a zárt hurok elrendezésnél megadott módon. Mivel itt történnek extra körözések is, azoknak az áthaladási darabszámát is bele kell venni a valós honnan-hova táblázatba.
Nyitott terű	Ennél a sortípusnál is megegyezik a honnan-hova táblázat a valós honnan-hova táblázattal, mivel a darabok közvetlenül mennek az egyik állomásról a másikra.

9. táblázat Különböző típusú elrendezések esetében a valós honnan-hova táblázat jellemzői

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:

$$P_i = \frac{MTTR_{G_i}}{t_{G_{i-1}}} \tag{23}$$

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.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

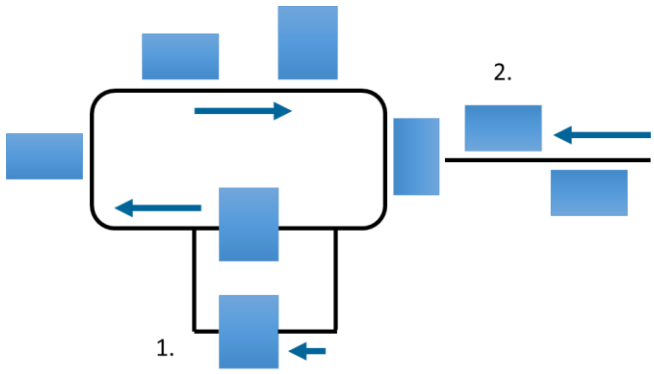
$$Puffer\ korlát\ arány = \frac{Maximális\ megvalósítható\ pufferméret}{\sum_{i=1}^{n} Ideális\ pufferméret_i} \tag{24}$$

Meghatározható az 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 puffer méretét.

$$Pufferméret_i = Ideális\ pufferméret_i * Puffer\ korlát\ arány \tag{25}$$

Amennyiben a puffer korlát arány nagyon kicsi, elképzelhető, hogy egy adott állomás előtt a puffer méretnek 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 (38. ábra):



38. 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 főágat 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 puffer méretek az AGV alapú gyártósorok esetében jó támpontot adhatnak a szükséges AGV darabszám meghatározásában is.

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

A puffer viselkedés nagyban függ a rendszer dinamikájától, ezért a kapott eredményeket érdemes digitális iker modellben, például szimulációban ellenőrizni.

A kidolgozott eljárásra példát a Melléklet Alkalmazási példa 3. – Puffer méretezés fejezet tartalmaz.

4.8.2 AGV méretezés

A rugalmas gyártórendszerek a logisztika területén is rugalmasságot igényelnek, nem véletlen, hogy a rugalmas gyártórendszerek öt elrendezés változatából három esetében 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.

A kialakítás szempontjából az AGV-k lehetnek kötött pályások vagy szabadon mozgók. A rugalmas gyártórendszer elrendezés típusok közül a hurok és a létra elrendezés kötött pályás nyitott terű kialakítás pedig szabadon mozgó AGV-ket használ.

A rugalmas gyártórendszerek esetében az AGV-k két fő típusa:

- Csak anyagmozgatásra használt AGV (ilyenkor az AGV az állomások között szállítja a darabot, legnagyobb hátránya, hogy viszonylag költséges megoldani minden állomás esetében a fel- és lerakodó rendszert).
- Munkahelyként is funkcionáló AGV (ilyenkor a darab az AGV-n marad az egyes állomásokon is és a művelet úgy megy végbe, hogy a termék végig az AGV-n marad, így egyszerűbbek és kisebbek az állomások, viszont több AGV-t igényel a rendszer).

A kettő közül a gyártott termék paraméterei és a gyártási paraméterek alapján lehet dönteni. Nagyobb, nehezebb termék esetében jobb, ha a darab az AGV-n marad, hosszabb gyártási folyamatoknál jobb, ha felszabadul a gyártás alatt az AGV, mert akár más tevékenységet is végezhet ez alatt.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Az AGV állapotok jellemzően az alábbi lépésekből állnak:

- darabfelvétel
- darabbal utazás állomások között
- darabon gyártási tevékenység végzése
- darableadás
- üresen utazás
- töltőn tartózkodás

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

$$t_{AGV} = \sum t_{Felvétel} + \sum t_{Gyártás} + \sum t_{Leadás} + \sum t_{Darab\ szállítás} + \sum t_{Üres\ szállítás} + \sum t_{Töltés} \tag{26}$$

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 10. táblázatban összefoglaltam a két változat fő jellemzőit:

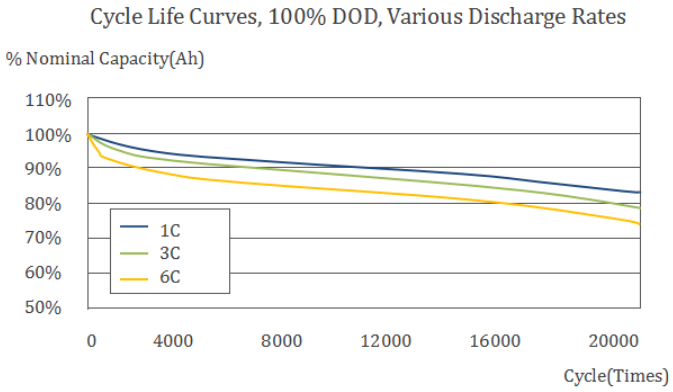
AGV csak szállításra	**AGV, mint munkahely**
Kisebb termékek esetében	Nagyobb termékek esetében
Rövidebb AGV körök	Hosszabb AGV körök
Jellemzően szabadon mozgó AGV-k	Jellemzően kötött pályán haladó AGV-k
Kevesebb AGV szükséges	A munkahelyen töltés is történhet
Komplexebb vezérlés	Több AGV szükséges
	Egyszerűbb vezérlés

10. táblázat Különböző típusú AGV-k összehasonlítása

A 10. táblázatból látszik, hogy az AGV-k legtöbb hátránya (ár, komplexebb vezérlés stb.) az akkumulátor jellegéből adódik, ezért érdemes ezt a témát mélyebben is megvizsgálni. A régebbi AGV-k főleg Lítium-ion akkumulátorokat használnak, ezeknek az élettartama körülbelül 2000 töltési ciklus [52]. A modern AGV-kben jellemzően Lítium-titán (LTO) akkumulátorokat használnak. Ezeknek az akkumulátoroknak nagyon komoly az életciklusuk, körülbelül 20000 töltési ciklust bírnak ki [53] [54].

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Jelenleg viszonylag kevés hosszú távú tapasztalat érhető el az AGV akkumulátorok degradációjával kapcsolatban, ezért a gyártók által megadott (néha minden bizonnyal optimista) specifikációkra kell hagyatkozni. Jól látható [55], hogy ezek az akkumulátorok kb. 4000 töltési ciklus után már jelentős, több, mint 15%-os kapacitáscsökkenést is szenvedhetnek (39. ábra).



39. ábra LTO akkumulátorok degradációja a töltési ciklusok számának függvényében [56]

Számos további tényező van, ami befolyásolja az akkumulátoros AGV-k élettartamát és viselkedését [57]:

- üzemeltetési hőmérséklet – ez szélsőséges esetben 5-10%-kal csökkentheti a kapacitást,
- töltési ciklusok száma,
- korosodás,
- elindulások, megállások száma,
- mozgatott teher súlya.

Ezeknek a befolyásoló hatását főleg kísérletezéssel, méréssel lehet meghatározni.

Egy átlagos AGV egy töltéssel 4 órás üzemre képes, amit 1-2 órás töltés követ. Így egy három műszakos gyártás esetében napi 4 töltési cikluson esik keresztül, a minimális 200 munkanappal számolva ez 800 ciklus évente. Ez azt is jelenti, hogy kb. 5 év után már csupán nagyjából az eredeti kapacitása 90%-át lehet használni, további 5 év után pedig ez az érték 80-85% közé csökkenhet.

Elektromos járművek esetében az újratöltésre két fő módszert szoktak használni, az akkumulátor-cserét (swap) és az akkumulátor újratöltést (charge). Gyártási környezetben az utóbbi egyszerűbben megvalósítható és kezelhető, ezért a továbbiakban ezzel foglalkozom. Az újratöltésen belül lehetnek dedikált töltőállomások, de bizonyos esetekben olyan megoldások is léteznek, hogy munkaállomáson, amíg a darabon munkát végeznek, az azt hordozó AGV töltődik.

A töltés szempontjából tehát a töltés történhet:

- töltő ponton gyártási folyamat közben, amikor a munkahely egyben töltőállomás is

DOI: 10.14750/ME.2026.012

- dedikált töltőállomáson
- folyamat lépés során (in-process), amikor a folyamat egyik lépése a töltő állomás és onnan halad tovább a jármű a következő folyamatlépésre
- ezek kombinációjával

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.

Az AGV-k esetében a gyártók sokszor csak minimális információt adnak meg, jobb esetben [58] (40. ábra) azonban elérhetők azok az információk, amelyek az akkumulátort jellemzik.

SAFELOG
NO CHANCE FOR ERRORS

AGVM4
AUTOMATED GUIDED VEHICLE
DATA SHEET

SAFELOG GmbH | Henleinstr. 4 | D-85570 Markt Schwaben | www.safelog.de

SAFELOG
NO CHANCE FOR ERRORS

General information

- **Forward and backward** driving
- **Wearfree in-process charging** via **inductive charging system**
- **Scalable battery capacity** with LiFePo4 batteries to adapt to process requirements
- **Flat design** with a height of only **220 mm (8.66")** — ideal for driving underneath trolleys
- **7" touch display** for easy handling
- **Agent based software** communicates decentralized with other AGVs and its environment
- **Electric lifting pin** for automized pick-up and drop-off of carriers up to **1.5 t**
- **Driving speeds** from **0,02 m/s (0.05 mph)** to **1,6 m/s (3.58 mph)**
- **Hybrid navigation:** combination of **magnetic track, contour navigation, camera navigation** and **odometrie**
- **Safety laser scanners** in each direction of travel

Technical data

Description	SAFELOG AGV M4	
Article number	106148	
Electrical data		
Operative voltage AGV [V]	24 DC	
Charging time (with 1 / 2 / 3 / 4 batteries) [min]	30 / 40 / 60 / 80 *	
Capacity (with 1 / 2 / 3 / 4 Batterien) [Ah]	21 / 42 / 63 / 84	
Operation		
Temperature [°C] [°F]	5 - 35	41 - 95
Accuracy of positioning [mm] [inch]	+ / - 5 *	+ / - 0.2 *
Min. turning radius [m] [inch]	1	39.4
Max. speed (with carrier/without carrier) [m/s] [mph]	1,0 * / 1,6 *	2,2 * - 3,58 *
Endurance driving without load (with 1 / 2 / 3 / 4 batteries) [h]	4 / 8 / 12 / 16 *	
Mechanical data		
Housing material	Steel	
Dimensions (L / W / H) [mm] ["]	1460 / 450 / 220	57.5 / 17.7 / 8.66
Weight AGV [kg] [lb]	235	518
Max. load capacity AGV (topload) [kg] [lb]	200 *	440 *
Max. pulling capacity (carrier) [kg] [lb]	1500 *	3300 *

*This value depends on the application environment.
The imperial units are only for orientation. If there is any deviation in the specification, the metric system is valid.

40. ábra Egy AGV gyártói adatlapja [58]

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Az AGV rendszerek elemzése során érdemes bizonyos feltételezésekkel élni, főképp azért, mert a pontosításhoz szükséges adatok megszerzése nem mindig lehetséges. Ezek a feltételezések:

- Az AGV-k sebessége konstans (v). A valóságban a kanyarsebesség és a tolatási mindig lassabb, illetve az állomás ráközelítés és leválás során is lassabb a mozgás. Sajnos legtöbb esetben a gyártók nem adják meg ezeket az adatokat, ezért legfeljebb mérni lehet ezeket.
- Az AGV-k fogyasztása lineáris. Szintén egy olyan paraméter, amelyet a gyártó ismer, de nem publikál. Ismert, hogy az AGV-k fogyasztása függ a terheléstől (a szállított tömegtől), a környezeti hőmérséklettől és az akkumulátor állapotától.
- Az AGV-k töltése lineáris. Ezt a paramétert főleg az akkumulátor gyártói ismerik. A modern akkumulátorok esetében a töltés nem teljesen lineáris, a töltési ciklus elején gyorsabb a töltés, aztán lassabb. Befolyásolja a töltés karakterisztikáját az is, hogy az akkumulátor milyen töltöttségi szinten kerül a töltőre, illetve, hogy milyen állapotban van az akkumulátor.

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:

$$D_{teljes} = \sum d_{x,y} \tag{27}$$

   ahol,

   D_{teljes} – a teljes megteendő távolság a műszakon belül. Itt érdemes a szállítás maximum értékeket 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:

$$t_{igény} = \frac{D_{teljes}}{v_{AGV}} \tag{28}$$

   ahol,

   $t_{igény}$ – a teljes szállítási időigénye

   v_{AGV} – az AGV sebessége

DOI: 10.14750/ME.2026.012

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

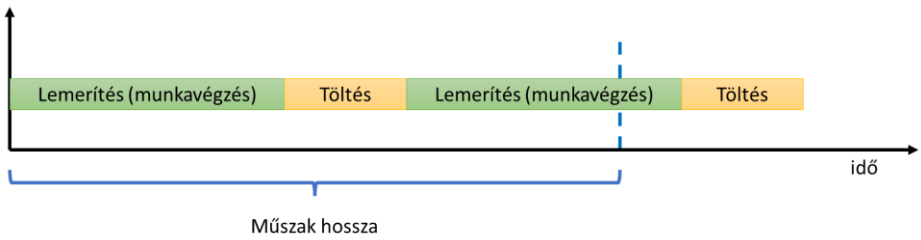
$$N_{elm} = \frac{t_{igény}}{t_{műszak}} \tag{29}$$

ahol,

N_{elm} – az elméletileg szükséges AGV darabszám

$t_{műszak}$ – a műszak hossza

A műszak hossza egy jól használható érték abban az esetben, ha egy AGV egy töltéssel kibír egy műszakot, abban az esetben amennyiben viszont nem, akkor foglalkozni kell az AGV töltési ciklusával is.



41. ábra Példa AGV töltési ciklusra

A 41. ábra egy példa AGV töltési ciklust mutat, amiből jól látszik, hogy ha az AGV egy töltéssel végzett szállítási kapacitása kisebb, mint a műszak hossza, akkor az AGV-t a műszakon belül tölteni kell. A töltési idő pedig csökkenti az AGV rendelkezésre állását. Így a fenti képlet az alábbi alakra módosul:

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

$$N = \frac{t_{igény}}{t_{műszak} - N * t_{töltés}} \tag{30}$$

ahol,

N – az elméletileg szükséges AGV darabszám

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

átalakítva egy másodfokú egyenletet kapunk:

$$-t_{töltés} * N^2 + t_{műszak} * N - t_{teljes} = 0 \tag{31}$$

aminek a megoldása:

$$N = \frac{-t_{műszak} \pm \sqrt{t_{műszak}^2 + 4 * \ t_{töltés} * t_{teljes}}}{-2 * \ t_{töltés}} \tag{32}$$

DOI: 10.14750/ME.2026.012

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:

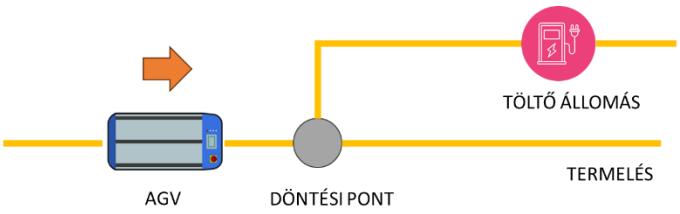
$$CN = N * \frac{t_{töltés}}{t_{műszak}} \tag{33}$$

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.

A 41. ábra rámutat még egy fontos területére az AGV alapú rendszereknek, a töltés ütemezésre. Ha az ábra szerint a műszak elején az összes AGV teljes töltöttségen működik, akkor a lemerítési ciklus is egyszerre végződik, egyszerre lenne igény az összes AGV töltésére, ami a termelés azonnal leállásával járna és pont annyi töltőt igényelne, ahány AGV van a rendszerben. Ez nem járható út, az AGV-ket egymástól időben eltolva kell tölteni, sokszor nem is várva meg a lemerülésüket. Ez a valós életben a flottakezelő szoftver dolga, amit jellemzően az AGV gyártója biztosít.



42. ábra Töltési döntési pont kialakítása

A folyamatokban mindig lesz egy döntési pont (42. ábra), amikor eldől, hogy az adott AGV a töltő felé haladjon tovább, vagy folytathatja a munkáját a termelésben. Ezekre a 11. 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

11. táblázat AGV töltő puffer stratégiák

A fenti módszer jól használható az AGV-k méretezésére, de a pontos méretezéshez érdemes az alábbiakat is megfontolni és amennyiben rendelkezésre áll róluk adat, a méretezésbe belevenni:

- az AGV egy töltéssel nyújtott kapacitása függ a terheléstől, a sebességtől, a környezeti hőmérséklettől. Ezeket az értékeket méréssel lehet meghatározni, illetve számos AGV vezérlőszoftverének naplójából kinyerhetők.
- az AGV sebessége nem konstans, a kanyarodás alacsonyabb sebességgel történik, a megállás előtti lassulás és az elindulás utáni gyorsulás is változó sebességgel történik. Amennyiben ez jelentősen módosítja az átlagsebességet, akkor ezt is érdemes a számítások során figyelembe venni.
- olyan útvonal szakaszokon, ahol nagy a forgalom, és az AGV gyakran megállhat ütközés elkerülése miatt, a honnan-hova táblázatban érdemes kompenzációs faktort beépíteni.
- az idő haladtával az AGV állomány erősen inhomogénné válik az akkumulátor kapacitás szempontjából. Lesznek régebbi AGV-k rosszabb állapotú akkumulátorral, újabb AGV-k teljes kapacitású akkumulátorral és a kettő között bármilyen állapotú AGV-k a javítás vagy a köztes beszerzés, esetleg más termelőterületről áthelyezés miatt változó állapotú akkumulátorral. Ilyen esetekben a legbiztonságosabb a tervezés szempontjából, ha a legalacsonyabb meglévő kapacitást tekintjük a rendszerben lévő AGV-k kapacitásának.

Az AGV darabszám méretezés nagyban függ a rendszer dinamikájától, ezért a kapott eredményeket érdemes digitális iker modellben, javasoltan szimulációban ellenőrizni.

A kidolgozott eljárásra gyakorlati példát a melléklet Alkalmazási példa 4. – AGV méretezés része mutat be.

A fejezetben leírtak alapján az alábbi tézist fogalmaztam meg:

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]

DOI: 10.14750/ME.2026.012

4.9 Információáram

A rugalmas gyártórendszerek legfontosabb eleme a működésüket biztosító vezérlési logika. A tervezési folyamat részeként bevezettem az információs áram táblázatot, amely a gyártósor egyes elemei között mutatja az információs kapcsolat szükségességét. Jelentős különbség a kapcsolati diagrammal szemben, hogy ebben a diagramban nemcsak a gépek és a fő aktivitási pontok jelenhetnek meg, hanem bármilyen információ nyújtó vagy fogadó eszköz. Ilyen lehet pl. egy robot, egy szenzor vagy egy AGV.

Az információs áram diagram is ábrázolható táblázatos formában (12. táblázat). Mivel a rendszer elemei között mindkét irányba történhet információ áram, ezért a táblázat, mint mátrix főátlója felett az egyik irányba, a főátló alatt a másik irányba történő információ áramlás található.

Honnan - hová	S1	S2	S3	S4	S5	AGV
S1	-	F1				
S2	F2	-				
S3			-			F4
S4				-		
S5					-	
AGV	F3					-

12. táblázat Információs áram táblázat példa

A táblázat celláiban kevés hely van, ezért ott csak az információáramlás meglétét érdemes jelölni. Ez is egy honnan-hova jellegű tábla, amelyben az átló fölötti rész az oszlop-> sor irányú, az átló alatti rész a sor-> oszlop irányú információáramlást mutatja.

A táblázat alapján az információs kapcsolatok maximális száma:

$$Az\ információs\ kapcsolatok\ összes\ száma = N * (N - 1) \tag{34}$$

ahol,

N – a gyártósor információcserében részt vevő elemeinek száma

Elmondható a rugalmas gyártórendszerekről és általánosságban minden gyártórendszerről, hogy ahol információáramlás történik, ott valamilyen döntés, vagy az információra reagálás is szükséges. Például, ha egy puffer jelzi, hogy megtelt, akkor lehet, hogy az oda vezető konvejor pályát le kell zárni.

A részletes információáramlás leírás szövegesen vagy döntési táblákkal írható le. Például (12. táblázat) szöveges leírás lehet az irodák (S1) és a maróüzem (S2) között (F1), hogy a termelési tervet publikálni kell az irodából a termelés felé. Az ellentétes (F2) irány pedig a termelési visszajelentési információ lehet. A maró részlegnek az elkészült darabokról jelezni kell az AGV-knek (F3) az elszállításhoz. A megérkezett darabokról pedig az AGV-k jelentenek a raktár felé (F4). Döntési táblák esetében minden bejegyzéssel rendelkező információáram táblázat cella egy-egy döntési táblára hivatkozik.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

A fentiek alapján jelölje M az információs áram diagramot, mint mátrixot, akkor a mátrix elemei felírhatók a következő módon:

$$M = [d_{i,j}], ahol\ 1 \leq i \leq n\ és\ 1 \leq j \leq m \tag{35}$$

ahol,

n, m – a soron lévő elemek száma, mivel n = m ezért a mátrix négyzetes (kvadratikus),

$d_{i,j}$ – az, i-edik oszlop és j-edik sorhoz kapcsolódó döntési tábla szabályainak száma.

A mátrix főátlójában a legtöbb esetben nincsenek elemek (értékük nulla). Ez alól kivételek lehetnek az önszabályozó rendszerek, ahol a gép vagy berendezés saját magával való kommunikációját is érdemes belevenni a táblázatba. Az információs áram táblázattal elkészültek azok a döntési pontok, ahova ki kell dolgozni a vezérlés működését a soron.

4.10 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.

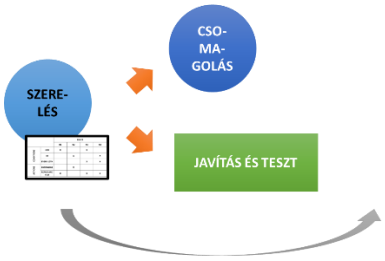
A fejezet célja két kidolgozott módszer bemutatása a vezérlési logika leképezésére és kezelésére, a döntési táblák és a neurális hálók használatával.

4.10.1 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.

Egy egyszerű döntési táblát mutat a 43. ábra, ahol egy szerelde után a döntési tábla alapján halad tovább a darab a folyamat útvonalon. A szabály az, hogy minden 10. darabot tesztelni kell a teszt állomáson. Emellett a rossz darabok is a teszttel egybeépített javító állomásra mennek. A jó darabok, amelyek nem 10. darabok, a csomagolás felé folytatják tovább az útjukat. Ebből a példából is látható, hogy a tervezés során a döntési táblák nagy segítséget nyújtanak a logikák felépítésében.

DOI: 10.14750/ME.2026.012



		SZABÁLYOK			
		R1	R2	R3	R4
FELTÉTELEK	NEM JÓ	X		X	
	JÓ		X		X
	MINDEN TIZEDIK			X	X
TEVÉKENY-SÉGEK	CSOMA-GOLÁS		X		
	JAVÍTÁS ÉS TESZT	X		X	X

43. ábra Egyszerű gyártási folyamat és döntési táblája

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 leállások)
- szükséges és minimális adatkommunikáció az optimalizált működés érdekében
- moduláris felépítés a folyamatlépések és funkciók mentén

DOI: 10.14750/ME.2026.012

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.

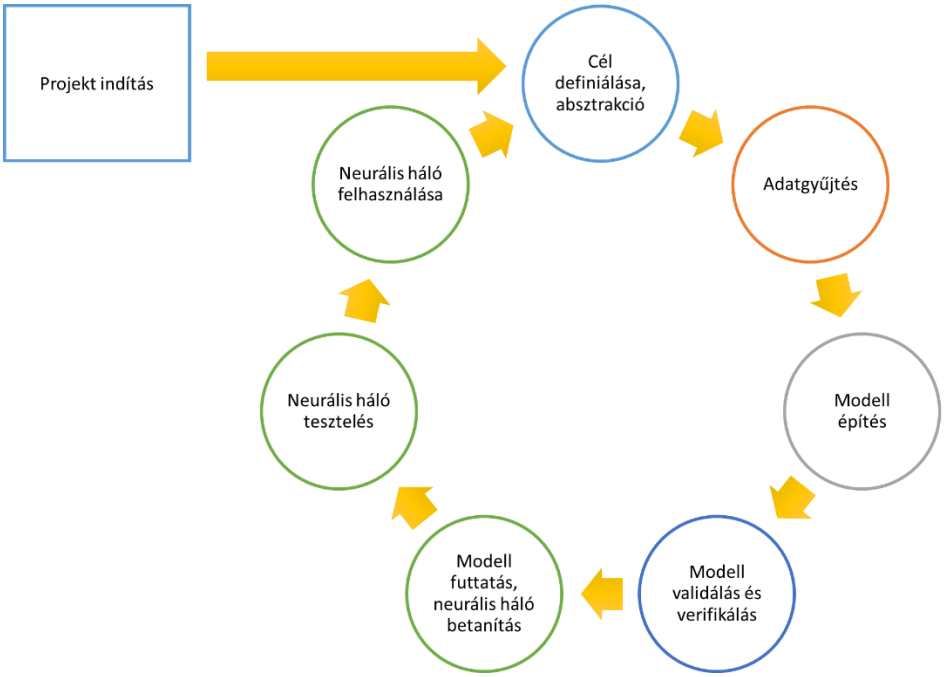
A döntési táblák alkalmazására a rugalmas gyártórendszer tervezésben az Alkalmazási példa 2. – Döntési tábla alkalmazása mutat be példát a mellékletekben.

4.10.2 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.



44. ábra Neurális hálóval alkalmazásával módosított digitális iker készítési folyamata

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

DOI: 10.14750/ME.2026.012

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 neurális hálóval kiegészített digitális ikrek elkészítésének folyamata (44. ábra) nagyban hasonlít a korábban tárgyalt digitális iker készítési folyamathoz (18. ábra). A fő különbség, hogy a modell futtatás eredményei nem elemzésre, hanem neurális háló betanítására szolgálnak.

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.

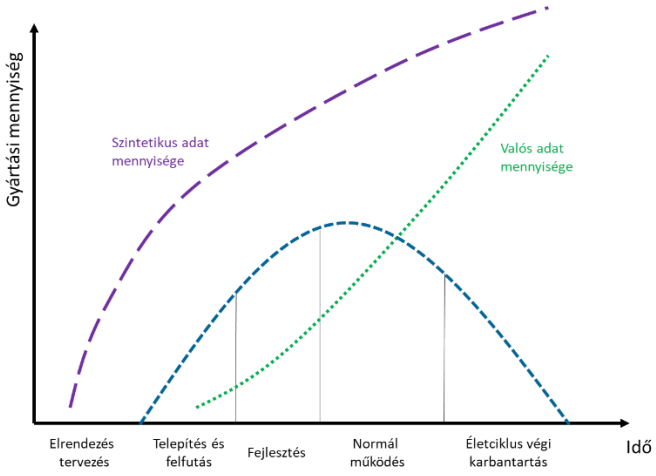
A rugalmas gyártórendszerek sajátossága, hogy folyamatosan változnak a gyártott típusok és azoknak a technológiai paraméterei. Változás esetén meg kell vizsgálni, hogy a változásnak lehet-e hatása a modell működésére és ezen keresztül a modell által generált adatokra. Ha a válasz nem, akkor tovább használható 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.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

A digitális iker építési folyamat mellett fontos áttekinteni, hogy mikor milyen adat érhető el a modell építéséhez és betanításához. A 45. ábra a gyártósorok életciklus görbéjét tartalmazza. Az ábrán látható életciklus görbe jól mutatja, hogy ha valós adatgyűjtésről beszélünk, azt leghamarabb a sor telepítése és felfutása során lehet elkezdeni. 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 komponenst integrálni, akkor könnyebb helyzetben vagyunk.

A digitális iker által generált ún. szintetikus adat szerepe megkerülhetetlen a neurális háló alapú vezérlő rendszerek tervezése, fejlesztése során.

A szintetikus adat olyan adat, amelyet valamilyen modell generál a valós adat helyettesítésére. Azzal, hogy az adatgenerálási folyamat kontrollált, a szintetikus adat minősége jobb lehet gépi tanítási célra. A szintetikus adat tetszőleges léptékben, mennyiségben, időtartamra létrehozható. Lényeges, hogy a szintetikus adatok tükrözik a valós adatok jellegét, összetételét, arányait. A szintetikus adatok készítése során modellezhető az adatok disztribúciója és szerkezete [48] [59]. A szintetikus adatok legnagyobb előnye, hogy a létrehozásukat teljes mértékben kézben lehet tartani [60]. A szintetikus adatok még egy komoly előnye, hogy kevesebb személyes adatot tartalmaznak, így a személyes adatok kezelésének problémája ritkábban jelenik meg. Például egy valós sori adatgyűjtő rendszer általában név szerint tartalmazza, hogy melyik dolgozó végezte a munkát, míg ugyanennek a szintetikus megvalósításában a dolgozók már csupán sorszámozott objektumként jelennek meg.



45. ábra A valós és a szintetikus adatok elérhetősége a gyártósor életciklusa során

A 45. ábra alapján a hagyományosan gyártósori adatgyűjtésből származó adatok gyűjtése a sor felfutási periódusától kezdődhet el. Ekkor azonban a beüzemelésből származó zavarok miatt az adatok minősége

DOI: 10.14750/ME.2026.012

még nem alkalmas gépi tanuláshoz való felhasználásra. Jobb minőségű adatokat csak az üzemszerű működés közben tudunk gyűjteni. Ez sokszor már késő, ha olyan neurális háló modellen dolgozunk, aminek a feladata a sor vezérlése. A szintetikus adatok esetében sokkal jobb a helyzet. A gyártósor tervezési fázisában, a tervezési adatokat felhasználva generálhatók olyan szintetikus adatok, amelyekből dolgozni lehet. Később, a tervezési adatok pontosabbá válásával és utána a telepített sor paraméterei alapján a szintetikus adatok minősége javítható. Az adatok generálás során alkalmazható az adatok mixelése is, amikor a neurális háló tanításához felhasznált adatcsomag egyaránt tartalmaz valós mért adatokat és szintetikus adatokat. Az ilyen mixelt adatok sokszor jobban jellemzik a rendszer szélsőséges állapotait.

Érdemes a szintetikus adatokat összehasonlítani a valós adatokkal néhány, adatokra jellemző szempont alapján. Mivel a gyártásban nagy mennyiségű adattal dolgozunk, ezért érdemes megvizsgálni, hogy a big data 5V modelljéhez hogyan illeszkedik a két adattípus (13. táblázat).

Big data paraméter	**Valós, gyűjtött adat**	**Szintetikus adat**
Velocity (sebesség)	A sor telepítése után folyamatosan növekvő adat.	Az adat generálás már a tervezés során elindulhat.
Volume (mennyiség)	A mennyiség a folyamat komplexitásától függ.	A mennyiség a folyamat komplexitásától függ a korábban kezdődő adatgyűjtés miatt több adat.
Veracity (érvényesség)	A sor változásával az adatok invaliddá, elavulttá válthatnak, ekkor új adatgyűjtési ciklust kell indítani, ami hosszú idő után ad eredményt, a sor az átmeneti idő alatt rosszul betanított modellel működhet. Az adatok számos esetben tisztítást igényelnek, illetve duplikációt tartalmaznak.	Az adatok minősége és pontossága a digitális iker modell pontosságától függ. Bár a sor változásával az adatok itt is elavulnak, új – a megváltozott helyzetet leképező adatok – gyorsan generálhatók. Az adatgenerálási folyamat ügyelhet az adat minőségére.
Variety (sokszínűség)	Az adat struktúrája a termelési adatgyűjtő rendszertől függ, sok esetben különböző rendszerek, különböző formátumú adatai.	Az adatstruktúra egységes, a digitális iker modellben kialakított jól strukturált adat.
Value (érték)	Amennyiben az adatok elavulnak az üzleti értékük a továbbiakban nulla, sőt az elavult betanítási adatok hibás gyártási, üzleti döntésekhez vezethetnek.	A jól felépített és folyamatosan frissített digitális iker.

13. táblázat A valós és a szintetikus adat összehasonlítása 5V szempontból

A fenti táblázatból is láthatók a szintetikus adatok legfőbb előnyei, az adatminőség és a tervezési ciklus során az azonnali elérhetőségük.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

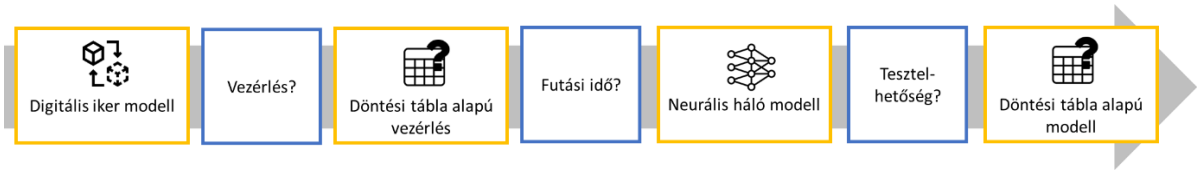
4.10.3 Döntési táblák és neurális hálók kapcsolata

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 (46. ábra)



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

A 46. 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 hálója. 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

DOI: 10.14750/ME.2026.012

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 párjait 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 feletételeket 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

DOI: 10.14750/ME.2026.012

aldöntési 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.

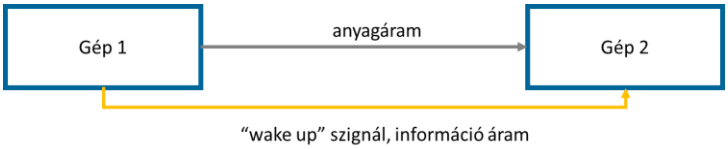
A fenti kidolgozott eljárásra konkrét példát az Alkalmazási példa 5. – Neurális háló és döntési tábla vezérlési logikában fejezetben mutatok be.

A fejezetben leírtak alapján az alábbi tézist fogalmaztam meg:

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

4.11 Energiahatékonyság

A rugalmas gyártórendszerek esetében az energiahatékonyság jelentősen csökkentheti az üzemeltetési költségeket. A legtöbb modern berendezés rendelkezik olyan „stand-by” funkcióval, amely a gépet alacsonyabb fogyasztású állapotba tudja kapcsolni és egy adott jelre vissza tudja azt kapcsolni. Ezeket a funkciókat a gyártó építi bele a berendezésbe.



47. ábra Energiahatékonyság működési modellje

Ezeknél a rendszereknél a működési modell (47. ábra), hogy a megelőző gép éppen időben küldi a következő állomás ébresztő jelét, hogy az már ismét üzemképes legyen, mire az anyagáramban a következő darab megérkezik. Így elkerülhető a veszteség, amint a darab a géphez érkezik, azonnal megkezdődik a feldolgozása.

Információs áram táblázat

Honnan-hová	Szenzor1	...	Konvejor1
Szenzor1	-		
...		-	
Konvejor1	DöntésiTábla1		-

Döntési tábla

	Szabály1	...
Feltételek		
ha Szenzor1 = aktív	X	
...		
Tevékenységek		
Konvejor1 := bekapcsolt	X	
...		

48. ábra Energiahatékonysági funkció leírása információs áram táblázattal és döntési táblával

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Számos konvejor vezérlés tartalmaz olyan funkciót, ami leállítja a folyamatosan mozgó pályát abban az esetben, amikor nem érkezik szállítandó darab. Itt is az a fontos, hogy időben megkapják azt az információt, hogy mikor kell újraindítani a konvejort, hogy az érkező darabnak ne kelljen várakoznia, hanem azonnal tovább tudjon haladni.

Az energiahatékonysági funkciók megvalósítását az információ áram diagram és a döntési táblák kombinációjával lehet megtervezni és dokumentálni.

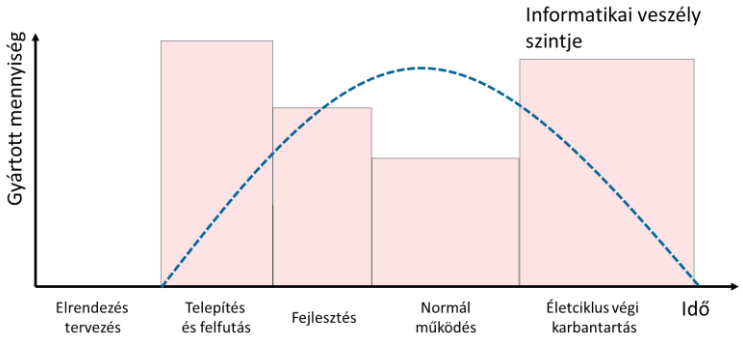
A fenti folyamat leképezhető a korábban bemutatott eljárással (48. ábra). Az információs áram táblázatban megjelenik a Szenzor1, aminek kommunikálnia kell a Konvejor1 szállítópályával. Ez hivatkozik a kapcsolatot vezérlés szinten kezelő DöntésiTábla1 táblázatra. Abban a táblázatban pedig a logikai feltétel, a Szabály1, ami azt tartalmazza, hogyha a Szenzor1 aktív, vagyis darab kerül oda, akkor kapcsolja be tevékenységként a Konvejor1-et.

4.12 Informatikai biztonságra tervezés

A rugalmas gyártórendszerek erejét az összekapcsolt, hatékonyan működő komponensek adják. Az összekapcsolásnak két szintje van:

- anyagáram szempontjából történő összekapcsolás: ez határozza meg, hogy merre haladnak a darabok a gyártórendszerben
- információ áram szempontjából történő összekapcsolás: ez jelzi, hogy a komponensek között milyen irányban milyen adatok kerülnek átadásra a komponensek között a működés és a vezérlés céljából

Ebben a részben az információárammal és az informatikai infrastruktúrával kapcsolatos tervezési feladatokat foglaltam össze.



49. ábra Gyártórendszerek informatikai biztonsága az életciklus során

A gyártórendszer életciklusa mentén vizsgálva az informatikai biztonság kérdését az egyes életciklus lépésekben (49. ábra) a következők jellemzők:

- elrendezés-tervezés: ebben a fázisban érdemes megtervezni a gyártórendszer biztonságát

- telepítés és felfutás: ekkor a gyártórendszer legtöbb eleme teszt üzemmódban működik, amely egy informatikai szempontból kockázatosabb állapot (nyitott portok, köztes szoftververziók stb.)
- fejlesztés: ez a leginkább biztonságos állapot, a gyártórendszer működik, az összes informatikai elem a legfrissebb szoftververzióval fut, általában korszerű technológiák kerülnek letelepítésre
- normál működés: a gyártósor termel, de fennáll a veszélye, hogy a rendszeres informatikai karbantartások elmaradnak, a szoftververziók frissítése nem történik meg
- életciklus végi karbantartás: ez az időszak, amikor a legnagyobb a veszélye annak, hogy a gyártósor informatikai biztonsági szempontból elavul. Azzal, hogy a gyártósorról már mindenki tudja, hogy előbb-utóbb bezárásra kerül, a rendszeres informatikai frissítések száma jelentősen csökkenhet

A hagyományos gyártósorokon gyakran az egyszer már működő gyártósorok informatikai karbantartása (szoftver frissítések, architektúra és platform frissítés) elmarad. A rugalmas gyártórendszerek esetében az új termékek bevezetése jó alkalom az informatikai állapot felülvizsgálatára és a szükséges frissítések végrehajtására. A rugalmas gyártórendszerek biztonsági kialakításával kapcsolatos javaslatokat több szervezet is tett közzé [61] [62].

Az informatikai biztonságot kezelni lehet a korábban használt információáram táblázatban, amelyet ki lehet egészíteni az informatikai kockázat kategóriájával vagy szintjével.

A kockázati kategóriák felállításánál a szempontok lehetnek:

- különböző informatikai architektúrák kapcsolódása
- már nem támogatott informatikai architektúra
- egyedileg fejlesztett rendszer
- adatvesztés kockázata
- külső és belső támadás kockázata
- rendszer meghibásodások kockázata

Az informatikai biztonsággal kapcsolatban az alábbi szabványok és eljárások határozzák meg a gyártó cégek működését:

- NIS2: az Európai Unió általános kiberbiztonsági és információbiztonsági szabványa, amelyet a tagállamoknak 2024. októberéig kellett átültetniük az adott ország jogi gyakorlatába.
- ISO 27001: Információbiztonsági management rendszer szabványa, amely a gyártási információk védelmére irányul.
- TISAX: német autóipari információbiztonsági szabvány, amely az ISO 27001-es szabványon alapul, de az autóipar egyedi igényeit emeli ki.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

- IEC 61508: Vállalatok által alkalmazott biztonsági szabvány, amely a gyártási rendszerek biztonságának biztosítására irányul. Az elektronikai és hardverelemek biztonságát célozza.

4.13 Karbonlábnyom elemzése

Az Európai Unió szabályozásai és előírásai a környezettudatos tervezést célozzák meg, hogy a termékek környezeti hatását minimalizálják az egész életciklusuk során, ez vonatkozik a gyártósorokra és a rajtuk gyártott termékekre is. A gyártósorok esetében az EU előírások különösen hangsúlyozzák az energiahatékonyságot, az újrafeldolgozott anyagok használatát és a környezetbarát gyártási módszereket. A karbonlábnyom kezeléshez kapcsolódó fő szabvány az ISO 14067 Carbon Footprint of Products. A szabvány első része foglalkozik a karbonkibocsátás mennyiségi meghatározásával.

A rugalmas gyártórendszerek esetében a karbon lábnyom számítása során három tényezőből adódik össze.

- a gyártott termék karbon lábnyoma,
- a gyártósor gépeinek és berendezéseinek karbon lábnyoma (a rugalmas gyártórendszerek esetében ide tartozik a sori logisztika karbon lábnyoma is),
- egyéb tevékenységek karbon lábnyoma (pl. karbantartás, javítás)

A karbon lábnyomot a költségekhez hasonlóan lehet számítani, itt is megkülönböztethető időfüggő és darabfüggő érték.

A karbon lábnyom számítás lépései:

- számítás határainak meghatározása, ez a rugalmas gyártórendszer esetében mindenképpen kiterjed a gyártósorra és a rajta gyártott termékekre. A beépülők és az alapanyagok karbon lábnyoma a beszállítónál jelenik meg, a sorra vonatkozó számolásból elhagyható.
- Adatok összegyűjtése a sorra, a gépekre és a termékekre.
- Emissziós faktorokkal beszorzás. Ezek az értékek a gépek esetében a gépgyártótól, a termékek esetében méréssel, vagy tapasztalati értékekkel határozhatók meg.
- Kibocsátás számítása és összesítése.

A nagyobb gyártó cégek a 2030-2035-re megcélozták a karbon semlegességet, és mivel a közeljövőben tervezett rugalmas gyártórendszerek többsége akkor még várhatóan működni fog, ezzel is kell foglalkozni a tervezés során.

4.14 Rugalmas gyártórendszerek komplexitásának mérőszáma

Egy tervezési projekt esetében fontos feladat lehet a projekt nagyságának meghatározása. Ez fontos már az ajánlatadási fázisban is, illetve később a projekthez szükséges erőforrás mennyiségének meghatározásában is. Ennek érdekében kidolgoztam és bevezettem egy olyan mérőszámot, amivel

DOI: 10.14750/ME.2026.012

összehasonlíthatóak a különböző rugalmas gyártórendszerek és azok komplexitása. A mérőszám három komponense:

- a termékek száma
- a kapcsolatok összetettsége
- a döntések és vezérlés összetettsége

A gyártórendszer komplexitását jellemző mérőszám:

$$FMSX = Termék\ variancia * Informatikai\ összetettség * Vezérlés\ összetettség \tag{36}$$

Az egyes tényezők értékei a következőképpen számolhatók:

$$Termék\ variancia = \frac{Gépek\ száma}{Termékek\ száma} \tag{37}$$

$$Informatikai\ összetettség = \frac{Gépek\ száma}{Információ\ áram\ kapcsolatok\ száma} \tag{38}$$

$$Vezérlés\ összetettség = \frac{Gépek\ száma}{\sum_{i=1}^{n} CAR_i} \tag{39}$$

Behelyettesítve:

$$FMSX = \frac{Gépek\ száma}{Termékek\ száma} * \frac{Gépek\ száma}{Információ\ áram\ kapcs.\ száma} * \frac{Gépek\ száma}{\sum_{i=1}^{n} CAR_i} \tag{40}$$

feltéve, hogy

$$Termékek\ száma > Gépek\ száma$$

$$Információ\ áram\ kapcsolatok\ száma > Gépek\ száma$$

$$\sum_{i=1}^{n} CAR_i > Gépek\ száma$$

ahol,

FMSX – a rugalmas gyártórendszer komplexitására jellemző mérőszám,

CAR – a döntési táblák komplexitását leíró szám,

n – a döntési táblák száma a rendszerben.

További összevonással a gyártórendszer összetettségét leíró végleges képlet:

DOI: 10.14750/ME.2026.012

$$FMSX = \frac{Gépek\ száma^3}{Termékek\ száma * Információ\ áram\ kapcs.\ száma * \sum_{i=1}^{n} CAR_i} \tag{41}$$

Amennyiben a fenti feltételek nem teljesülnek, akkor nem rugalmas gyártórendszerről, hanem egy egyszerű vezérlésű lineáris, dedikált termékeket gyártó sorról van szó.

A 14. táblázat összefoglalja néhány valós gyártósor komplexitás mérőszámát. Látszik, hogy a mérőszám 0 és 1 közötti tartományban jól tükrözi a sorok komplexitásának növekedését (a nagyobb érték a komplexebb). Az első gyártósornál az 1-nél nagyobb FMSX érték azt mutatja, hogy a komplexitása miatt nem érdemes rugalmas gyártórendszert készíteni a feladatra, vagy a sor nem tekinthető valóban rugalmas gyártórendszernek, inkább egy dedikált lineáris gyártósor.

Gépek száma	**Termékek száma**	**Információs áram kapcsolatok száma**	**CAR**	**FMSX értéke**	**Megjegyzés**
7	12	2	4	3.57	soros
3	10	8	12	0.03	robotos
8	20	12	4	0.53	zárt hurok
10	18	20	40	0.07	nyitott terű

14. táblázat Néhány gyártósor FMSX értéke

A meghatározott mérőszám komplexebb gyártórendszerek esetén magasabb, kisebb komplexitású gyártórendszerek esetén alacsonyabb.

4.15 Rugalmas gyártórendszer tervezési projekt kezelése

Egy rugalmas gyártósor, illetve gyártórendszer tervezése összetett, komplex folyamat, számos tevékenységből és résztevékenységből állhat. Emellett tovább növeli a komplexitását, hogy a tervezésében több szervezeti egység is érintett, ezért a tervezési projekt koordinálása is kihívást jelenthet. Ebben a részben összefoglalom, hogy a gyártósor tervezési projektben jellemzően milyen szerepkörök érintettek a vállalaton belül és egy példa projektterven bemutatom, hogy az egyes tervezési folyamatok hogyan tudnak kapcsolódni egymáshoz.

Egy rugalmas gyártórendszer tervezésében az alábbi személyek, illetve szerepkörök érintettek:

- menedzsment: ők hozzák meg a döntés, hogy milyen gyártósor készüljön
- pénzügy: biztosítják a szükséges anyagi erőforrásokat
- beszerzés: megadják a várható gyártási terveket, előrejelzéseket
- terméktervezés: a termékek megtervezése, lehetőleg gyárthatósági szempontok figyelembevételével
- folyamattervezés: a feladatuk a technologizálás és a kapcsolódó folyamatok megtervezése
- termelés: gyakorlati tapasztalatukkal rámutathatnak a folyamatok továbbfejlesztési lehetőségeire

DOI: 10.14750/ME.2026.012

- logisztika: szorosan együttműködve a folyamattervezéssel kialakítják a szükséges logisztikai hátteret, beszállítók, anyagmozgatás és erőforrás szempontjából
- üzembiztonság: minden gyártósor esetében kulcsfontosságú, hogy produktív és biztonságos legyen
- informatika: a gyártórendszerek esetében egyre több informatikai eszköz kapcsolódik, feladatuk az információáramlás és a döntések áramlásának megfelelő biztosítása

Bár a legtöbb esetben a tervezés addig nem is kezdődik el, amíg nem születik meg az a döntés, hogy rugalmas gyártórendszer lesz megvalósítva. Ennek ellenére akár még a részletes tervezés után is születhet olyan döntés, hogy mégsem rugalmas gyártórendszerre van szükség. Ennek jellemzően három oka lehet:

- a felmerült túl magas megvalósítási költségek
- túl komplex vezérlés megvalósításának szükségessége, és annak kihívásai
- túl nagy bizonytalanság az alapadatokban (előrejelzés és jövőbeni vevői igények, típusok, technológiák) amelyek túl nagy üzleti kockázatot jelentenek egy ilyen költséges gyártósor megvalósítására

Minden gyártórendszer tervezése, ez igaz a rugalmas gyártórendszerekre is, csapatmunka. Mivel egy csapat dolgozik rajta, a feladatok nagy része átfedi egymást, a tervezési folyamat nem szigorúan szekvenciális. Emellett, mint minden mérnöki tevékenységnél nagy szerepet kap az iteráció, az új információk és tapasztalatok alapján történő újragondolása egy-egy területnek, feladatnak.

A tervezési folyamat lépései részben időben párhuzamosan történnek, a korábban felsorolt területek résztvevőivel. Már ebből is jól látható, hogy a projekt sikere szempontjából kiemelt fontosságú a szervezeten belüli hatékony kommunikáció. Amennyiben minden szervezeti egység elvégzi a megfelelő feladatot, a tervezési projekt a sor telepítésével és beüzemelésével záródik. A rugalmas gyártórendszerek az életciklus során tovább fejlődnek, ezért bizonyos – a tervezéshez kapcsolódó tevékenységek – a sor telepítése után is folytatódnak. Ilyenek az adatgyűjtés a valós sorról, a digitális iker fejlesztése, és amennyiben a sornak része, akkor a neurális háló alapú vezérlés továbbfejlesztése, aktuális információkkal való betanítása.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

5 Az értekezés tézisei

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 hálókon alapuló eljárást a rugalmas gyártórendszerek vezérlési logikájának leírására, valamint alkalmazási módszerét, mely a tervezési és a megvalósítási fázisban is alkalmazható. [S6] (4.10. fejezet)

DOI: 10.14750/ME.2026.012

6 Thesis of the Dissertation

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)

DOI: 10.14750/ME.2026.012

7 Összefoglalás, további kutatási lehetőségek

Értekezésemben a rugalmas gyártórendszerek tervezési módszereinek továbbfejlesztésével foglalkoztam, kiegészítve azokat Ipar 4.0 eszközök használatával. Ez a téma két szempontból is aktuális. A vevők számára a termékek széles spektruma elvárássá vált, ami magával vonta a gyártás és a kapcsolódó logisztika rugalmassága iránti igényt. Ez azt okozta, hogy a gyártó cégek még komolyabban elkezdték keresni azokat a lehetőségeket, hogy miképpen tudják a gyártó rendszereiket rugalmasabbá tervezni. Mivel a rugalmasabb rendszerek általában összetettebbek és magasabb szinten automatizáltak is, ezért szükségessé vált a hagyományos módszerek támogatása digitális, az adatokra támaszkodó, Ipar 4.0 eszközökkel.

Kutatási témának tehát egy olyan átfogó területet választottam, amely a komplexitása mellett egy szakmai szempontból is izgalmas kihívást rejtett. Abban, hogy a kutatási céljaimat el tudtam érni, sokat segített a több évtizednyi mérnöki gyártással kapcsolatos tapasztalatom, és az, hogy számos céggel dolgoztam együtt hasonló területen.

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 irodalmi áttekintés után összefoglaltam azokat a technológiákat és módszereket, amelyeket felhasználtam a kutatás során. Több olyan módszert is sikerült feltárnom, amelyek segítettek új megközelítést kialakítani a kutatási több részterületén.

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.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

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.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

8 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. This topic is relevant in two respects. Customers now expect a wide range of products, creating a need for flexibility in manufacturing and related logistics. This has caused manufacturing companies to start looking even more seriously for ways to design their manufacturing systems to be more flexible. Since more flexible systems are usually more complex and automated to a higher level, it has become necessary to support traditional methods with digital, data-driven Industry 4.0 tools.

I therefore chose a comprehensive area as my research topic, which, in addition to its complexity, also contained an exciting challenge from a professional perspective. My decades of experience in engineering manufacturing and the fact that I have worked with numerous companies in similar fields have helped me a lot in achieving my research goals.

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.

After the literature review, I summarized the technologies and methods that I used during the research, and here I managed to discover several methods that helped to develop a new approach in several sub-areas of 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.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

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.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

9 Mellékletek

A mellékletekben gyűjtöttem össze azokat kidolgozott eljárás alkalmazására vonatkozó példákat, amelyek szükségesek ahhoz, hogy az értekezés elméleti és gyakorlati szempontból is teljes egészet alkothasson. Ezek a példák mutatják be az értekezésben kidolgozott eljárások és tézisek gyakorlati alkalmazhatóságát. A példák az elmúlt évek ipari példáin, tapasztalatain alapulnak.

Az értekezésben kidolgozott tervezési eljárás könnyen digitalizálható, a modern informatikai rendszerekkel jól kezelhető segítséget tud nyújtani a tervezőknek. A példák kidolgozása során diszkrét esemény vezérelt szimulációs rendszert használtam. Egyszerűbb változatban táblázatkezelőben is kezelhetők az eljárás főbb elemei.

Az alábbiakban bemutatásra kerülő példák mindegyike konkrét ipari projekten alapszik. A kutatás során a Siemens Plant Simulation [63] [47] rendszerét használtam a digitális ikerpárok, a modellek és az elemzések elkészítésére. Ez a diszkrét esemény vezérelt szimulációs rendszer világszerte széles körben használt a gyártó cégek körében.

9.1 Alkalmazási példa 1. – Szükséges gyártási kapacitás meghatározása

A kidolgozott eljárást egy konkrét példán mutatom be. Adott egy gyártósor tervezési feladat, ahol a gyártósort 5 évig szeretné a cég használni. Ez alatt az 5 év alatt 11 különböző terméket gyárt a soron.

Az alábbiakat lehet tudni a termékek életciklusáról:

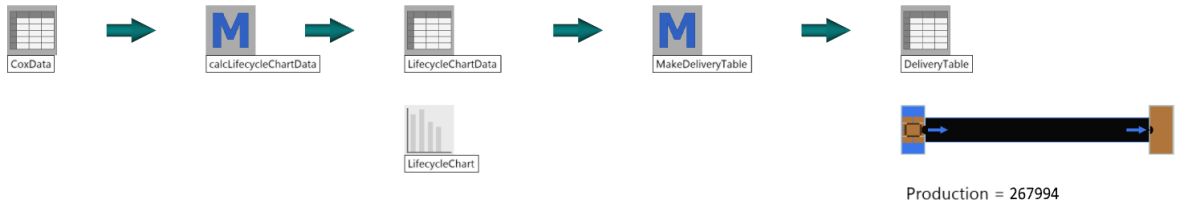
- A termékek adott időszak alatt gyártódnak, megszakítás nélkül
- A termékek, „piaci” termékek, ennek megfelelően a hagyományos életciklus lépéseken haladnak végig

Ezek alapján az értekezésben kidolgozott módszer használható a szükséges kapacitás meghatározásához.

A termékekről az alábbi adatok ismertek:

- Termékkód
- Gyártás tervezett kezdete (az életciklus során eltelt hónap)
- Gyártás tervezett vége (az életciklus során eltelt hónap)
- Az életciklus alatt várható maximális havi igény

DOI: 10.14750/ME.2026.012



50. ábra Példamodell struktúrája a kapacitás számító eljárás bemutatására

A 52. ábrán látható a modell, amely a kapacitás meghatározásához elkészült. A CoxData táblázat tartalmazza az életciklusra vonatkozó adatokat a 15. táblázatban látható módon. A táblázat oszlopaiban az életciklus paraméterek, a soraiban a terméktípusok találhatóak meg. A táblázatban lévő adatok a kanonikus formátumnak felelnek meg, ezek írják le az életciklus paraboláját az egyes termékeknek.

	string 0	integer 1	integer 2	integer 3	real 4
string	Product	StartMonth	EndMonth	Qmax	m
1	EXA1A	1	24	1700	12.50
2	EXA1B	1	36	500	18.50
3	EXA2A	6	24	1500	15.00
4	EXA2A	12	48	1000	30.00
5	EXA2C	12	36	1500	24.00
6	EXA3A	18	40	1600	29.00
7	EXA3B	18	60	1700	39.00
8	EXA4A	24	54	1800	39.00
9	EXA4B	36	48	1600	42.00
10	EXA5A	36	60	2000	48.00
11	EXA5B	48	60	1600	54.00

15. táblázat Életciklus adatok kanonikus másodfokú felírásának paraméter táblázata

Ezek alapján kiszámolhatók az életciklus görbe általános másodfokú alakjainak paraméterei. Ezekkel bővült ki a táblázat (16. táblázat).

	string 0	integer 1	integer 2	integer 3	real 4	str 5	real 6	real 7	real 8
string	Product	StartMonth	EndMonth	Qmax	m	-	a	b	c
1	EXA1A	1	24	1700	12.50	-	-12.85	321.36	-308.51
2	EXA1B	1	36	500	18.50	-	-1.63	60.41	-58.78
3	EXA2A	6	24	1500	15.00	-	-18.52	555.56	-2666.67
4	EXA2A	12	48	1000	30.00	-	-3.09	185.19	-1777.78
5	EXA2C	12	36	1500	24.00	-	-10.42	500.00	-4500.00
6	EXA3A	18	40	1600	29.00	-	-13.22	766.94	-9520.66
7	EXA3B	18	60	1700	39.00	-	-3.85	300.68	-4163.27
8	EXA4A	24	54	1800	39.00	-	-8.00	624.00	-10368.00
9	EXA4B	36	48	1600	42.00		-44.44	3733.33	-76800.00
10	EXA5A	36	60	2000	48.00		-13.89	1333.33	-30000.00
11	EXA5B	48	60	1600	54.00		-44.44	4800.00	-128000.00

16. táblázat Életciklus adatok táblázata kiegészítve az általános másodfokú alak paramétereivel

A paraméterek alapján felrajzolható az egyes termékek életciklus görbéje. A görbék értékeit havonkénti értékek behelyettesítésével ábrázoltam. A darabszámok esetében a behelyettesítéskor az eredményeket felfelé egész számokra kerekítettem, így az eljárás a nagyobb biztonságra méretez. Pénzügyi és

DOI: 10.14750/ME.2026.012

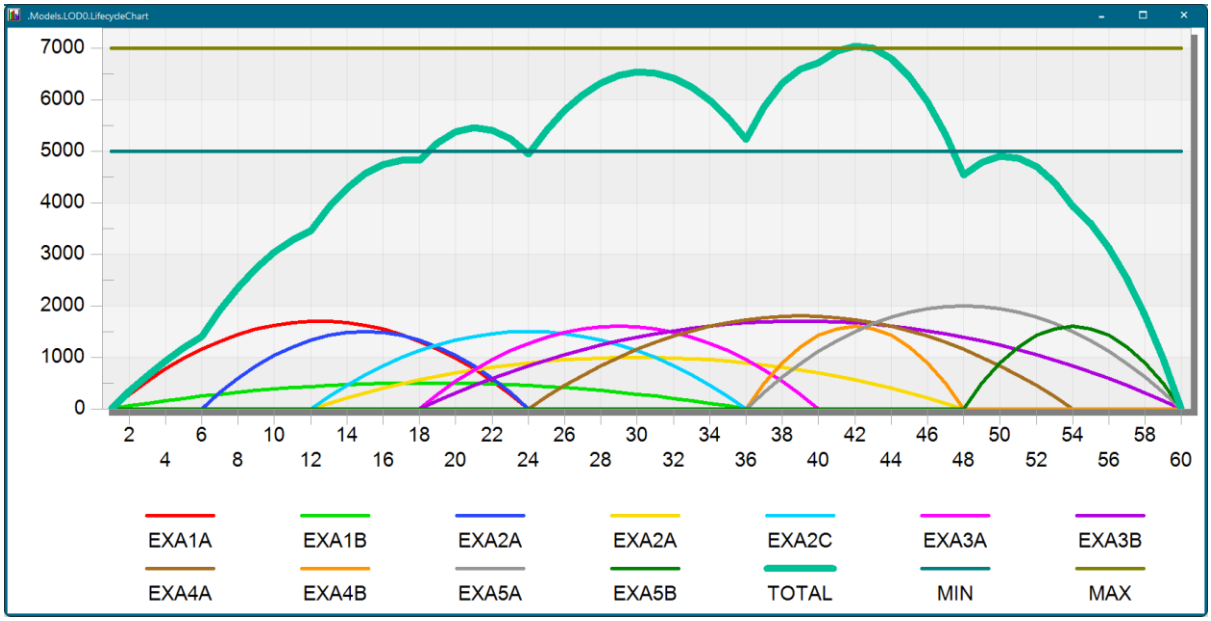
logisztikai szempontból is érdemes havi időegységekben kezelni, hiszen az adatokat, a költségeket a gyártó vállalatok havi bontásban kezelik. A kapott havi mennyiségek esetében a negatív értékeket nullázni kell, mivel a termelt darabszám minden esetben pozitív vagy nulla.

	string 0	real 1	real 2	real 3	real 4	real 5	real 6	real 7	real 8	real 9	real 10	real 11	real 12	real 13	real 14	real 15
string	Product	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	EXA1A	1	283	540	772	977	1157	1312	1440	1543	1620	1672	1697	1697	1672	1620
2	EXA1B	0	56	108	157	203	245	285	320	353	383	409	432	451	467	480
3	EXA2A	0	0	0	0	0	0	315	593	834	1038	1204	1334	1426	1482	1500
4	EXA2A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	109	210	306
5	EXA2C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	240	459	657
6	EXA3A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	EXA3B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	EXA4A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	EXA4B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	EXA5A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	EXA5B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	TOTAL	1	339	648	929	1180	1402	1912	2353	2730	3041	3285	3463	3923	4290	4563

17. táblázat Az életciklus havi darabszámok táblázata

A kapott eredmények a 17. táblázatban láthatók, ahol a táblázat soraiban a termékek és a teljes gyártandó darabszám, az oszlopaiban a hónapok jelennek meg. A metszet mezőkben pedig a adott típusból az adott hónapban gyártandó darabszám.

A termékekre vonatkozó másodfokú függvények ez alapján ábrázolhatóak (49. ábra).



51. ábra A termék életciklus görbék és eredőjük

Az ábra alapján meghatározható az eredő görbe (TOTAL) maximuma, amely a példában a gyártósor életciklus 42. hetében van és 7051 darab gyártását igényli. A gyártósor tervezése során ebből a kapacitásból kell kiindulni.

A szükséges kapacitás „kisimítására” az alábbi eszközök állnak rendelkezésre (ezek végrehajtásának lehetősége a vevővel történő egyeztetést igényli):

- Termék életciklus eltolása

DOI: 10.14750/ME.2026.012

- Termék életciklus megnyújtása vagy megrövidítése
- Termék eltávolítása a gyártandó termékek közül

Az 51. ábrán még bejelöltem azt a tartományt [5000, 7000] darab között, ahol a vállalat a nyereséges gyártást tudja biztosítani.

A későbbi, egyre részletesebb digitális iker modell számára a fenti életciklus görbék alapján felrakási lista készíthető, amelynek tartalma a gyártás kezdetének időpontja (nap), a gyártandó darabszám és a gyártandó típus (18. táblázat).

	time 1	object 2	integer 3	string 4	table 5
string	Delivery Time	MU	Number	Name	Attributes
1	0.0000	*.Models.Part	1	EXA1A	
2	30:00:00:00.0000	*.Models.Part	283	EXA1A	
3	30:00:00:00.0000	*.Models.Part	56	EXA1B	
4	60:00:00:00.0000	*.Models.Part	540	EXA1A	
5	60:00:00:00.0000	*.Models.Part	108	EXA1B	
6	90:00:00:00.0000	*.Models.Part	772	EXA1A	
7	90:00:00:00.0000	*.Models.Part	157	EXA1B	
8	120:00:00:00.0000	*.Models.Part	977	EXA1A	
9	120:00:00:00.0000	*.Models.Part	203	EXA1B	
10	150:00:00:00.0000	*.Models.Part	1157	EXA1A	
11	150:00:00:00.0000	*.Models.Part	245	EXA1B	
12	180:00:00:00.0000	*.Models.Part	1312	EXA1A	
13	180:00:00:00.0000	*.Models.Part	285	EXA1B	
14	180:00:00:00.0000	*.Models.Part	315	EXA2A	
15	210:00:00:00.0000	*.Models.Part	1440	EXA1A	
16	210:00:00:00.0000	*.Models.Part	320	EXA1B	
17	210:00:00:00.0000	*.Models.Part	593	EXA2A	
18	240:00:00:00.0000	*.Models.Part	1543	EXA1A	
19	240:00:00:00.0000	*.Models.Part	353	EXA1B	

18. táblázat Gyártási felrakási sorrend

Az így kapott felrakási lista a digitális iker részletesebb kidolgozása során finomítható felrakási egységekre bontással.

9.2 Alkalmazási példa 2. – Döntési tábla alkalmazása

A kidolgozott eljárás bemutatására egy példa a vezérlési logika tervezésére és leképezésére. A példában szereplő gyártósor egy robot központú gyártósor, ami tervezés szempontjából talán a legegyszerűbb típusa a rugalmas gyártórendszereknek.

A gyártósor műanyag alkatrészeket készít. A folyamat első lépése egy 3D nyomtatás, ez a granulátumot egy tartályból kapja. Ez után egy megmunkálás következik, majd egy méréssel záródik a folyamat. A megmunkálás két gépen történik. A gyártási idők típusfüggők.

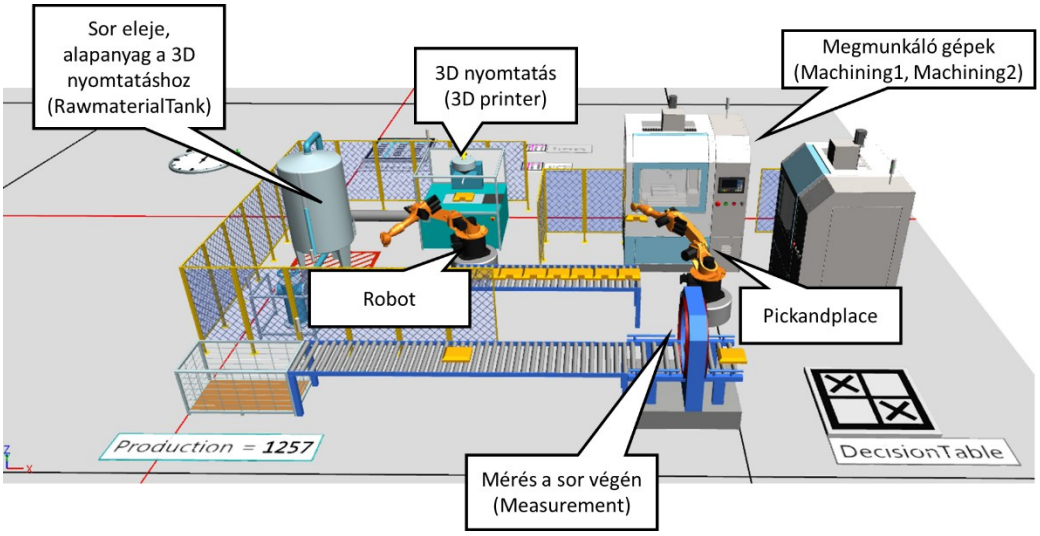
Mivel a cella robotközpontú, ezért a honnan-hova táblázat (19. táblázat) könnyen elkészíthető.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

	RAW MATERIAL TANK	3D PRINTER	MACHINING	MEASUREMENT	ROBOT	PICKANDPLACE
RAW MATERIAL TANK	0	X				
3D PRINTER		0			X	
MACHINING			0			X
MEASUREMENT				0		
ROBOT					0	X
PICKANDPLACE			X	X		0

19. táblázat Honnan-hova táblázat a példa sorhoz

Az adatok alapján az alábbi elrendezés (52. ábra) készíthető el. A távolságok miatt az eredetileg tervezett berendezéseken, eszközökön kívül egy plusz robot lett szükséges a 3D nyomtatás és a megmunkáló gépek felé szállító konvejor közé, mivel a gépek fizikai méretei miatt egy robot nem éri el az összes célpozíciót.



52. ábra A példa rugalmas gyártórendszer elrendezése

Az információs kapcsolat táblázat azt mutatja be, hogy mely eszközök és berendezések kommunikálnak egymással (20. táblázat). Ebben az esetben ezek azok a funkciók, amelyek révén az egyik állomás ellenőrizni tudja, hogy a következő állomás elérhető-e a darab számára. Itt már a kér megmunkálógép nem gépcsoportként jelenik meg, hanem külön bejegyzésként, mivel a két géphez külön információáram és vezérlés kell.

	RAW MATERI-AL TANK	3D PRINTER	MACHI-NING1	MACHI-NING2	MEASU-REMENT	ROBOT	PICKANDPLACE

DOI: 10.14750/ME.2026.012

RAW MATERI-AL TANK		X					
3D PRINTER			X	X		X	
MACHI-NING1					X		X
MACHI-NING2					X		X
MEASU-REMENT							X
ROBOT							
PICKANDP LACE							

20. táblázat Információs kapcsolat táblázat a példához

A döntési táblák felépítésére két fő megközelítés lehet. Minden döntési hely rendelkezhet saját döntési táblával, vagy az egyszerűbb rendszerek esetében össze lehet gyűjteni a teljes vezérlést, egy darab központi döntési táblában. Ebben a példában a központi döntési táblát választottuk, amelyben az első feltétel szűri le, hogy melyik állomáshoz kapcsolódik az adott döntési logika.

	string 0	string 1	string 2	string 3
string	Collecting Conditions	R1	R2	R3
1	CONDITIONS			
2	makepathrelative(@.location)="Machining1" or makepathrelative(@.location)="Machining2"			X
3	makepathrelative(@.location)="Printer3D"	X		
4	makepathrelative(@.location)="Conveyor"		X	
5	ACTIONS			
6	@.destination:=Conveyor	X		
7	@.move	X		
8	waituntil (Machining1.empty or Machining2.empty) and PickAndPlace.empty prio 2		X	
9	if Machining1.empty then @.destination:=Machining1 end		X	
10	if Machining2.empty then @.destination:=Machining2 end		X	
11	@.move		X	
12	waituntil Measure.empty and PickAndPlace.empty prio 1			X
13	@.destination:=Measure			X
14	@.move			X

53. ábra Döntési tábla a példa sorra

Az elkészült döntési tábla (53. ábra) minimális programozási ismerettel is könnyen értelmezhető. Az egész rendszer vezérlését sikerült három szabállyal leírni. Minden esetben megnézzük, hogy milyen feltétel teljesülése esetén lesz aktív az adott szabály, majd megnézzük, hogy mi történik az adott szabály aktivizálódásakor. Az alábbiakban ezeket vizsgálom meg részletesen:

- R1: a feltétel, ha elkészült egy darab a 3D nyomtatón. Ebben az esetben a darab következő állomása a konvejor, amire tovább küldjük azt. A Robot1 vezérlésével nem törődtünk külön a vezérlőrendszer a „destination”, célállomás attribútum alapján ezt automatikusan kezeli.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

- R2: a feltétel az, hogy a konvejor végére odaért egy a 3D nyomtatásról érkező darab készen arra, hogy tovább haladjon a következő műveletre a megmunkálásra. A tovább haladáshoz arra van szükség, hogy a vagy a Machining1, vagy a Machining2 megmunkáló gép üres legyen és emellett a PickandPlace nevű robot is üres legyen, vagyis képes legyen a darab továbbítására. Ha ez teljesül, akkor a szabad gépre megy tovább a darab.
- R3: a feltétel az, hogy a megmunkáló gépek valamelyikén elkészült egy darab. Ekkor amennyiben a mérőgép szabad és a robot is szabad a darab továbbítására, a darab továbbmegy a mérőgépre.

Ez a három szabály alkalmas arra, hogy a rendszer működését leírja. Láthatóan bármilyen sori változás esetén a logika könnyen módosítható, illetve, ha szükséges több vezérlés variáció is könnyen kipróbálható.

9.3 Alkalmazási példa 3. – Puffer méretezés

Az értekezés 4.8 fejezetében kifejtett puffer méretezési eljárás alkalmazására ebben az alfejezetben egy példát mutatok be egy autóipari cég adatai alapján. A sor a tervezési fázisban 4 típus gyártására alkalmas. A gyártási eljárás alapján 6 állomásra van szükség a soron, de nem minden terméknek kell minden állomáson végig haladnia. A 54. ábra felső része tartalmazza a gyártási sorrendet (a sorokban a gyártott típusok, az oszlopokban az egymást követő gyártási lépések), az ábra alsó része pedig az egyes technológiai lépések (állomások) esetében a gyártási időt és gép rendelkezésre állását, illetve javítási idejét. Az itt szereplő idők már a generált leggyorsabb termékre vonatkoznak.

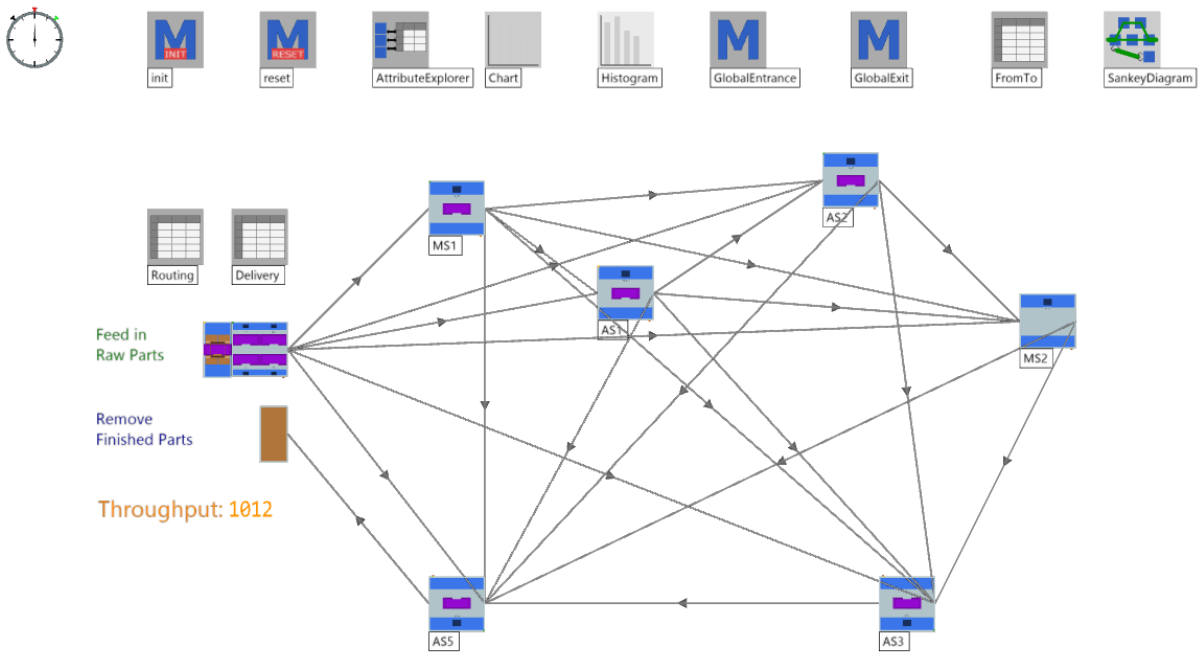
Product	RSTEP01	RSTEP02	RSTEP03	RSTEP04	RSTEP05	RSTEP06	RSTEP07
EXA1A	MS1	AS2	MS2	AS3	AS5	Drain	
EXA1B	MS1	AS1	AS2	AS3	AS5	Drain	
EXA2A	MS1	AS2	MS2	AS3	AS5	Drain	
EXA2B	MS1	AS1	AS2	MS2	AS3	AS5	Drain

	Name	ProcTime	Availability	MTTR
*.Models.FMS0.AS1	AS1	1:00.0000	98	8:30.0000
*.Models.FMS0.AS2	AS2	1:01.0000	99	10:00.0000
*.Models.FMS0.AS3	AS3	1:00.0000	97	7:30.0000
*.Models.FMS0.AS5	AS5	55.0000	99	5:00.0000
*.Models.FMS0.MS1	MS1	55.0000	98	6:30.0000
*.Models.FMS0.MS2	MS2	55.0000	98	6:50.0000

54. ábra Gyártósor tervezési alapadatai

A fenti alapadatok alapján elkészíthető egy digitális iker modell az állomások és a gyártási útvonalak ábrázolásával (55. ábra). A vizsgált időintervallum 1 nap, amely alapján a szimulációs modellben a Honnan-hova táblázat elkészül.

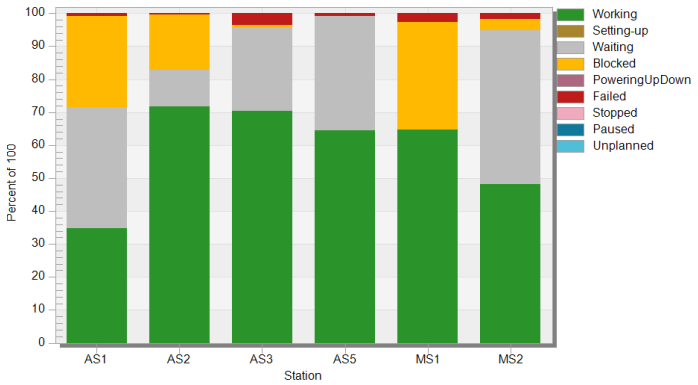
DOI: 10.14750/ME.2026.012



	string 0	integer 1	integer 2	integer 3	integer 4	integer 5	integer 6
string		AS1	AS2	AS3	AS5	MS1	MS2
1	AS1					500	
2	AS2	499				516	
3	AS3		256				758
4	AS5			1013			
5	MS1						
6	MS2		758				

55. ábra Digitális iker alapmodell és a futtatásából származó honnan-hova táblázat

Látható a modellben az állomások kihasználtsági grafikonján (56. ábra), hogy a soron nagyon sok a blokkolás, ami kapacitásveszteséggel jár. Jelen formájában a sor egy nap alatt átlagosan 1012 darabot tud gyártani. A puffer méretezés azért fontos, mert a megfelelő pufferekkel a gépleállásokból adódó veszteségek csökkenthetők.



56. ábra A sori állomások kihasználtsági adatai

A honnan-hova táblázat alapján gyakorlatilag bármilyen elrendezéssel megvalósítható a gyártósor (kivéve a robotos), a rendelkezésre álló téglalap jellegű hely alapján a hurok elrendezésű gyártósor

DOI: 10.14750/ME.2026.012

mellett döntött a cég. Az egyes termékek gyártási útvonalait összesítve az alábbi hurok útvonal írható fel:

$$MS1 > AS1 > AS2 > MS2 > AS3 > AS5$$

Ez alapján elkészíthető egy olyan valós honnan-hova táblázat, amely már azt is figyelembe veszi, hogy a daraboknak olyan állomásokon is át kell haladniuk (nullás gyártási idővel), amelyek nem részei a gyártási programjuknak.

	string 0	integer 1	integer 2	integer 3	integer 4	integer 5	integer 6
string		AS1	AS2	AS3	AS5	MS1	MS2
1	AS1					1012	
2	AS2	1012					
3	AS3						1012
4	AS5			1012			
5	MS1						
6	MS2		1012				

57. ábra Digitális iker alapmodell és a futtatásából származó valós honnan-hova táblázat

A fentiek alapján elkészült a módosított az elrendezéshez alkalmazkodó valós honnan-hova táblázat (57. ábra). Ez a hurok elrendezés esetében egyszerű, mivel minden termék végighalad minden állomáson.

Az ideális puffer méret meghatározása azt jelenti, hogy ki kell számolni, ha az i-edik gép $MTTR_i$ ideig leáll, akkor az előtte lévő gép mennyi darabot tud legyártani az alatt és az adja meg a puffer méretet az alábbi képlet alapján:

$$Pufferméret = \frac{MTTR_i}{TAKT_{i-1}} \tag{42}$$

A képlet alapján kapott puffer méretek:

B01 = 9

B02 = 10

B03 = 7

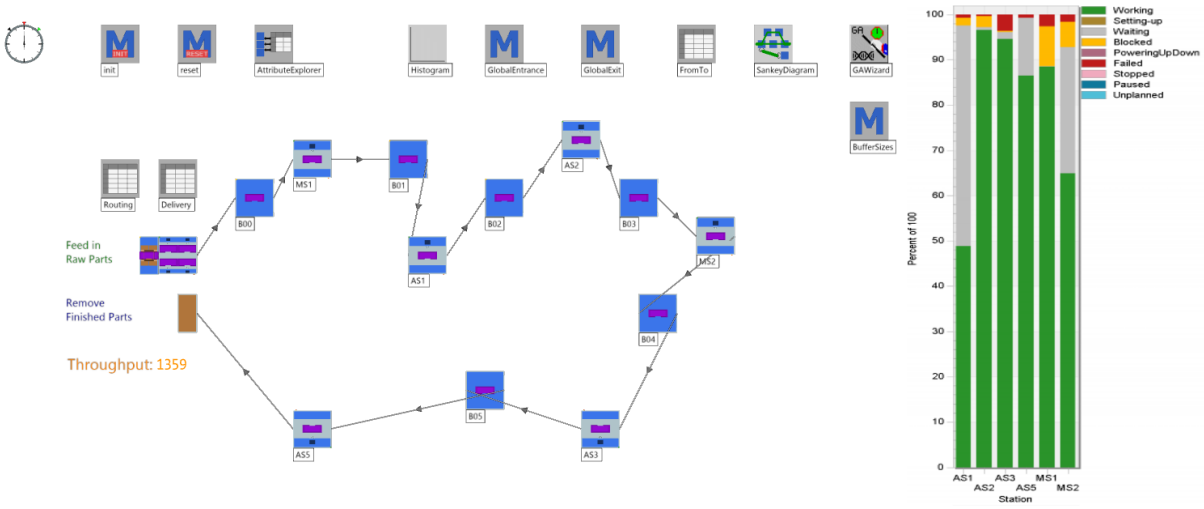
B04 = 8

B05 = 5

$B_{összes}$ = B01 + B02 + B03 + B04 + B05 = 39

Ez alapján elkészíthető egy módosított digitális iker modell, amelyben már a puffer méretek is szerepelnek a kiválasztott elrendezés mellett (58. ábra). A digitális iker lefuttatása 1359 darabos gyártást eredményezett, láthatóan a pufferek segítettek a rendszer megfelelő dinamikájának a kialakulásában.

DOI: 10.14750/ME.2026.012



58. ábra Digitális iker modell a számított ideális pufferméretekkel és kiválasztott elrendezéssel

A kidolgozott eljárás eredményét összehasonlítottam egy optimalizáló eljárás eredményével is. A szimulációs rendszerbe integrált genetikus algoritmust használtam erre, bemenő paraméterként megadva a pufferek méretét, kimenetként pedig a maximális gyártási mennyiséget megadva optimalizálási célfüggvényként.

Lefuttatva a genetikus algoritmust, minden pufferre maximum 20-as kapacitást engedve az eredmény a pufferméretekre:

Puffer	GA1	GA2	GA3	GA4	GA5
B01	16	5	12	8	18
B02	9	20	6	6	6
B03	4	7	13	17	13
B04	17	8	9	12	9
B05	13	19	18	13	18
Total	**1363**	**1363**	**1363**	**1363**	**1363**

21. táblázat Genetikus algoritmussal történt optimalizálás eredményei

A genetikus algoritmus 5-féle pufferméret kombinációt talált ideálisnak, mindegyik mellett 1363 darabos gyártással (21. táblázat). A táblázatban is látszik, hogy többféle, egymástól nagyon különböző megoldás is hozhat hasonló végeredményt. A kidolgozott eljárás és a genetikus algoritmus eredményei között kevesebb, mint 1% az eltérés, a példa alapján az eljárás jól használható az ideális pufferméret meghatározására.

Azonban a legtöbb esetben akkora puffer, amekkora az ideális lenne, az vagy túl költséges, vagy túl helyigényes. A példában a költségkorlát úgy jelenik meg, hogy a sor költségvetésébe maximum 30 méternyi konvejorpálya – ami a puffer szerepét tölti be - kiépítése fér bele, ami kb. 25%-kal kevesebb, mint a számítással adódó.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Az aránypárok felírása után a kapott puffer méretek:

B01 = 6

B02 = 8

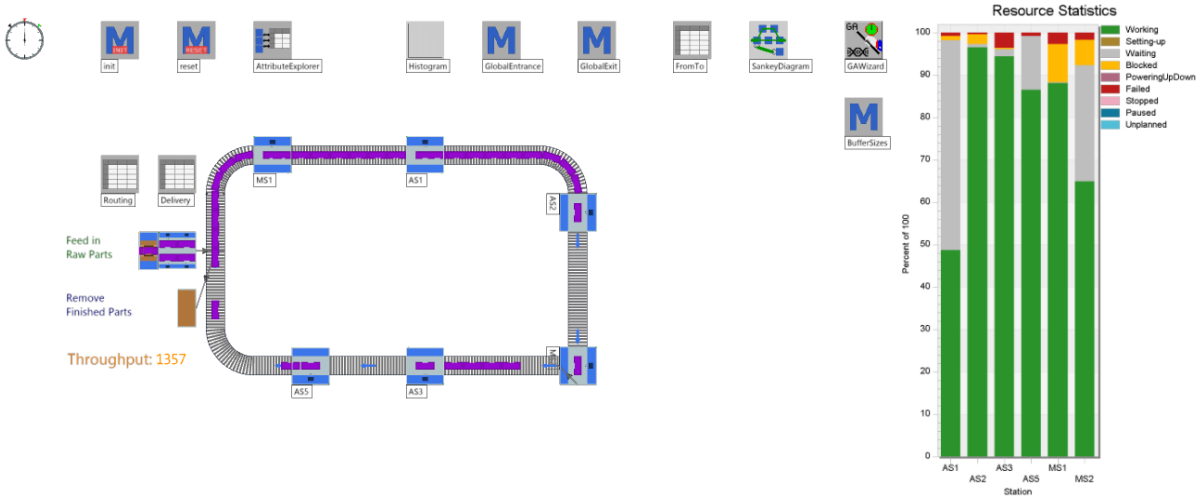
B03 = 6

B04 = 6

B05 = 4

$B_{összes}$ = B01 + B02 + B03 + B04 + B05 = 30

Az így, a korlátoknak megfelelő puffer méreteket a digitális iker modellbe immár konvejorként ábrázolva (59. ábra) és a modell lefuttatva a gyártott darabszám 1357 darab átlagosan, ami azt jelenti, hogy a puffer méret racionalizálása nem okozott jelentős csökkenést. A puffer korlátozások hatása minimális a gyártott darabszámra.

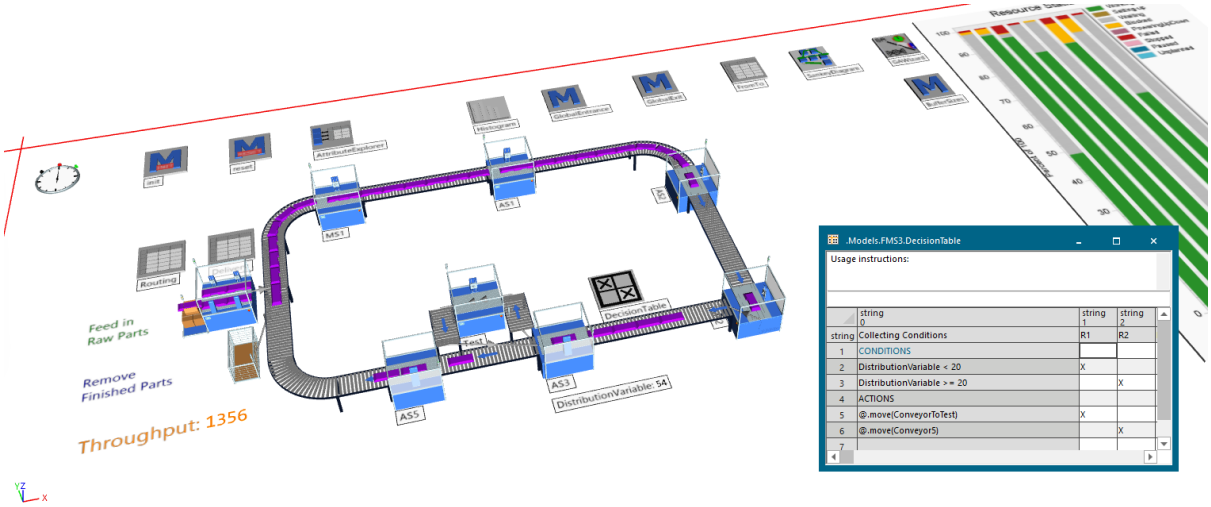


59. ábra Digitális iker modell a korlátokkal leosztott puffer méretekkel

A tervezési folyamat következő lépése mellékágak méretezése. A gyártósoron kiegészítő ág a tesztállomás, amelynek a műveleti ideje 30 másodperc, a rendelkezésre állása 99% és az MTTR értéke pedig 10 perc. A termékek 20%-át kell véletlenszerűen tesztelni. A tesztállomás előtti szükséges puffer méret a korábbiakhoz hasonlóan számolva 10 darab, de mivel a daraboknak mindössze 20%-a megy arra, a szükséges puffer méret 2 darabnyi.

A kiegészítő ágat is beépítve, és a vezérléséhez szükséges döntési táblát elkészítve (60. ábra) a végleges gyártósor modell átlagos darabszáma 1356 lett, ami elfogadható eredmény volt a sorra.

DOI: 10.14750/ME.2026.012



60. ábra A gyártósor végleges digitális iker modellje

A példa alapján összefoglalva megállapítható, hogy a kidolgozott számítási metódus a gyakorlatban jól használható módszer a sori teljes pufferigény és annak a szétosztásának a számítására.

9.4 Alkalmazási példa 4. – AGV méretezés

Ez a példa egy valós példa alapján mutatja be a dolgozott eljárás alkalmazását. Egy multinacionális autógyár spanyolországi gyárának rugalmas gyártórendszerének tervezésében alkalmaztam a módszert.

A sor, amelynek a tervezéséhez az eljárást használtam egy autóipari karosszéria gyártó, hegesztő sor. A tervezés elején eldöntött tény volt, hogy az állomások között a darabokat AGV-k szállítják, ennek megfelelően a sori elrendezés bár kötött pályás, AGV-vel történik az anyagmozgatás.

Attribútum	**Leírás**
Charge (Ah)	Az akkumulátor aktuális töltöttségi szintje (0 < Charge < Capacity)
Basic consumption (A)	Alap energia fogyasztás, attól függetlenül, hogy az AGV mozog-e vagy sem
Driving consumption (A)	Az alap fogyasztáshoz hozzáadódó fogyasztás abban az esetben, ha az AGV mozog
Capacity (Ah)	Az AGV akkumulátorának kapacitása
Reserve (Ah)	Az a biztonsági szint, ami alatt tölteni kell az akkumulátort, ekkor az AGV meghívja a töltési kontrolt
Charge current (A)	A töltőáram erőssége

22. táblázat AGV-k szimulációs jellemzői

A használt szimulációs rendszer rendelkezik azzal az előnnyel is, hogy támogatja az AGV-k modellezését, sőt beépített funkciókkal rendelkezik az AGV-k akkumulátorával kapcsolatos jellemzők

DOI: 10.14750/ME.2026.012

és az akkumulátor töltés kezelésére. A Plant Simulation az AGV-k esetében az alábbi akkumulátor jellemzőket kezeli [47] (22. táblázat):

Statisztikai szempontból az alábbi értékeket jellemzik az AGV-t (23. táblázat):

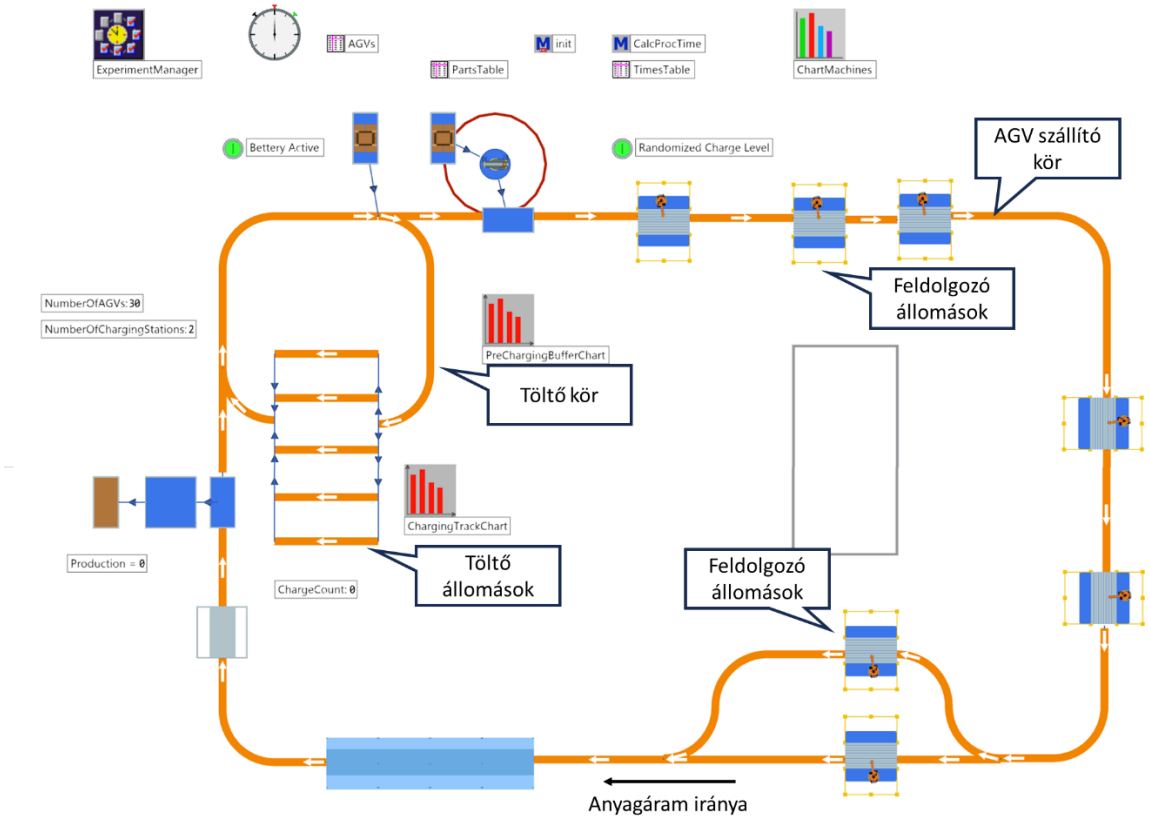
Attribútum	**Leírás**
Number of charges	Megmutatja, hogy hányszor volt az akkumulátor töltve az aktuális szimuláció során
Portion	Megmutatja, hogy a szimulációs időben az adott AGV az idő hány százalékában volt töltésen

23. táblázat A szimuláció által gyűjtött statisztikai értékek az AGV-re

Az alkalmazási példa egy autóipari esettanulmány. A 61. ábra mutatja a modellt és rajta a sor elrendezését. Ez egy hurok elrendezésű rugalmas gyártórendszer, robotos hegesztő és szerelő állomásokkal. A termékek autó-karosszéria elemek. A sort legalább 10 éves életciklusra tervezték. A gyár heti 7 nap, 3 műszakban dolgozik.

A vizsgálat során most egy terméktípusra vizsgáltam a rendszert, mivel:

- a termék gyártási idők az állomáson nagyon hasonlóak,
- a termékek között az állomásokon (kivéve a teszt állomást) nincs átállás.

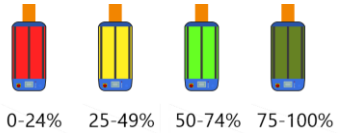


61. ábra A példamodell elrendezése

DOI: 10.14750/ME.2026.012

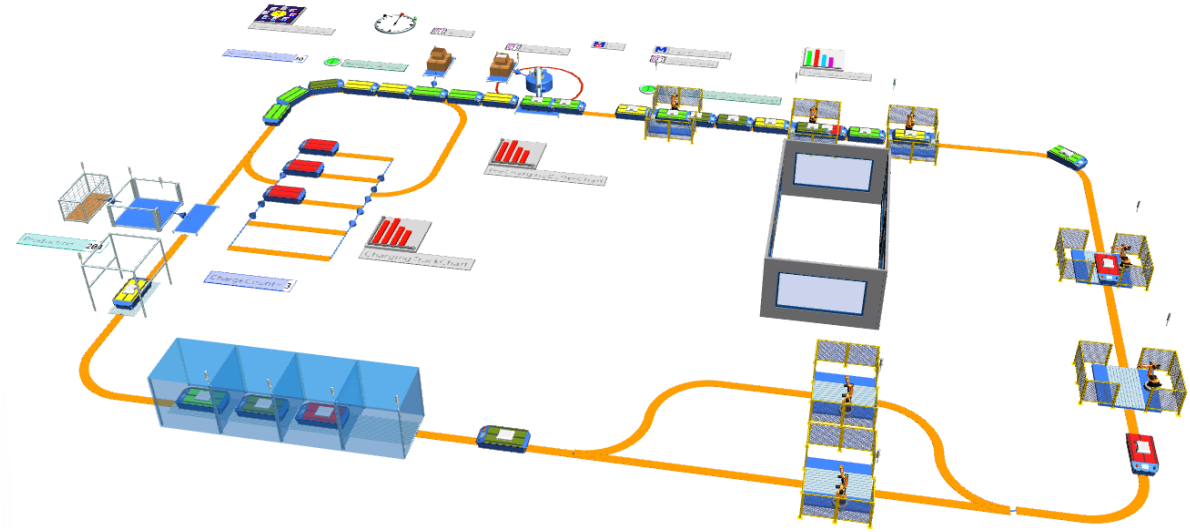
A példában SHARP TYPE B AGV-t [64] használunk 200 kg-os szállítási kapacitással, 60 m/perc (1 m/s) maximális sebességgel és minden AGV-ben 2 darab 42 Ah kapacitású akkumulátorral. Ezekre az AGV-kre 8 órás folyamatos üzemelést vállal a gyártó, így elméletben akár egy teljes műszakot is kibírnak újra töltés nélkül.

A példában fontos volt az akkumulátor szint vizualizálása, ezért kiegészítettem a gyári AGV objektumot az akkumulátorszinttől függő rakodólap színezéssel (62. ábra).



62. ábra Töltöttségi színkódolás az AGV-k esetében

Ennek eredményeképpen a modellben minden esetben jól látható az egyes AGV-k töltöttségi állapota (63. ábra).



63. ábra Modell futási állapot

A rendszer tervezésének és méretezésének folyamatát a 24. táblázat foglalja össze.

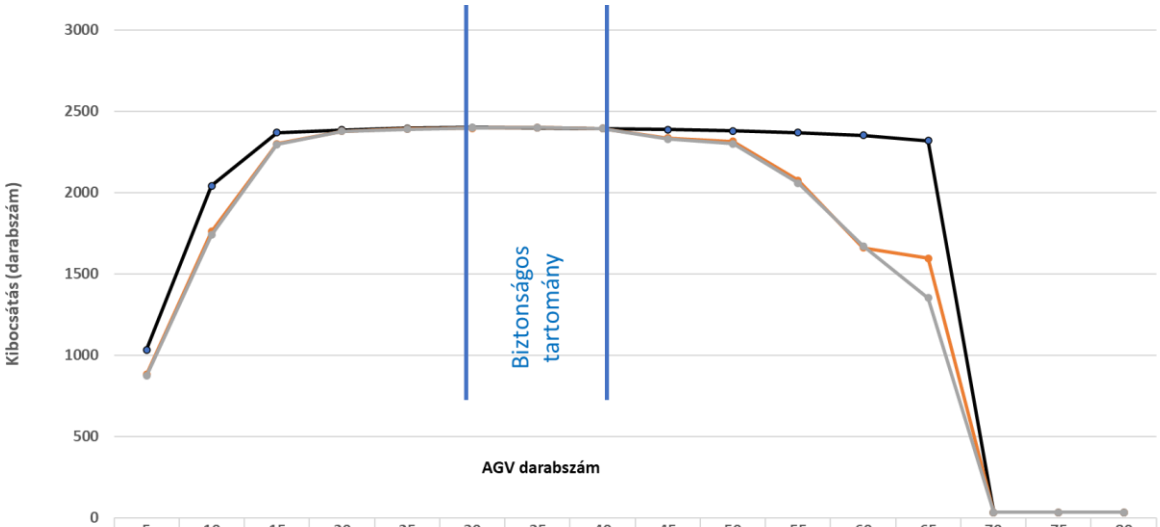
Vizsgálati lépés	**Megjegyzés**
1. Szükséges AGV kapacitás kiszámolása	Szimuláció futtatása teljes kapacitáson lévő AGV-kel, korlátlan akkumulátor kapacitással
2. Kalkulációk és kísérletek a jelenlegi AGV flotta paraméterekkel	Tervezési, elrendezési problémák felderítése és a szükséges töltőállomás szám meghatározása. Ez a lépés emellett információt ad az AGV flottakezelő rendszer beállításához is (ezt a rendszert általában az AGV beszállítója biztosítja).

DOI: 10.14750/ME.2026.012

3. Kísérletek a sor, a termékek és az AGV-k jövőbeni változásaival kapcsolatban	Ebben a lépésben vizsgálható az akkumulátor öregedés és azon egyéb paraméterek hatása, amelyek várhatóan változni fognak a soron az életciklus során.

24. táblázat A rendszer tervezés folyamata

A példában az első lépés célja a normál üzemben folyamatosan szükséges AGV darabszám meghatározása. Ez „ideális” környezetben történik, az AGV-k esetében nem kerül szimulálásra az akkumulátor működése. Azonban a soron az összes sztochasztikus paraméter benne van a vizsgálatban (gép meghibásodás stb.) (Scenario 1). A második lépésben az akkumulátor merülésének és töltésének hatása kerül elemzésre. Ez adja meg, hogy valójában mennyi AGV szükséges a soron. Itt lehet meghatározni azt is, hogy hány töltőpontra van szükség (Scenario2). A harmadik lépés pedig annak megvizsgálása, hogy hosszabb idő elteltével - amikor az AGV akkumulátorok degradációja már jelentős - akkor mennyi AGV szükséges a sorra. Ekkor módosulhat a szükséges töltőhelyek száma is, mivel a rosszabb állapotú AGV-k esetében gyakoribb töltésre van szükség (Scenario3).



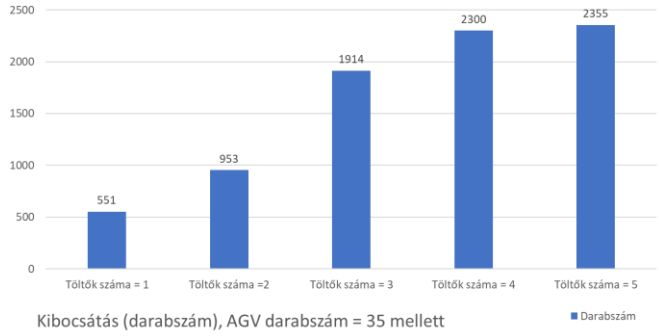
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
Scenario1	1032	2042	2368	2385	2395	2401	2398	2393	2388	2380	2369	2351	2319	34	34	34
Scenario2	880	1760	2299	2377	2391	2396	2399	2394	2334	2314	2075	1661	1596	34	34	34
Scenario3	873	1740	2295	2378	2388	2398	2399	2393	2330	2301	2059	1670	1352	34	34	34

64. ábra Napi gyártott mennyiség az AGV darabszám függvényében

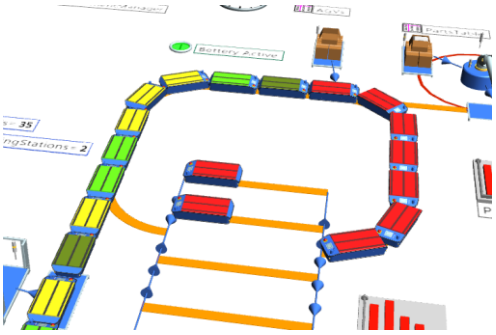
Az eredmények (64. ábra) grafikus ábrázolása után az alábbi következtetések vonhatók le. Jól láthatóan a túl kevés AGV nagyon alacsony termelékenységet eredményez, a túl sok AGV a kötött pályán pedig akadályozza egymást, ezért drasztikusan lecsökken a darabszám. Ez jellemző viselkedése minden palettás és hurok elrendezésű AGV-s rendszernek.

Jól látható, hogy mindhárom eset eredményeit ábrázolva a 30-40 közötti az az AGV szám, amely a maximális gyártott darabszámot biztosítja mindhárom esetben, ezt nevezhetjük a rendszer biztonságos tartományának.

DOI: 10.14750/ME.2026.012



65. ábra A szükséges töltőállomás szám szimulációja



66. ábra Elrendezés probléma a töltőkör esetében

Felhasználva a fenti eredményeket, további vizsgálat történt a szükséges töltőállomás szám meghatározására, amelynek az eredményét a 65. ábra mutatja. Az 1-3 töltőállomás esetén az alacsony darabszám oka olyan elrendezés probléma volt, amely a szimulációban jól látható (66. ábra):

- Az AGV töltő kör feltorlódott és gyakorlatilag blokkolt ez a kör és vele együtt a termelési főkör is. Ezt az elrendezésben a töltőkör hosszának bővítésével lehet kezelni
- A töltő kör hosszának növelésével egy másik probléma is előjön, hogy ha túl sok AGV áll sorban várakozva töltésre, előfordulhat, hogy mire a töltőre jutna az AGV a várakozás közben lemerül. Ezt azzal a paraméterrel lehet szabályozni, amely megadja, hogy milyen merülési szintet elérve kell az AGV-knek töltőre menniük. Látszik, hogy mennyire fontos az AGV esetében annak a töltési szintnek a jó beállítása, amelynél az AGV már a töltőkör felé indul az elágazásban.

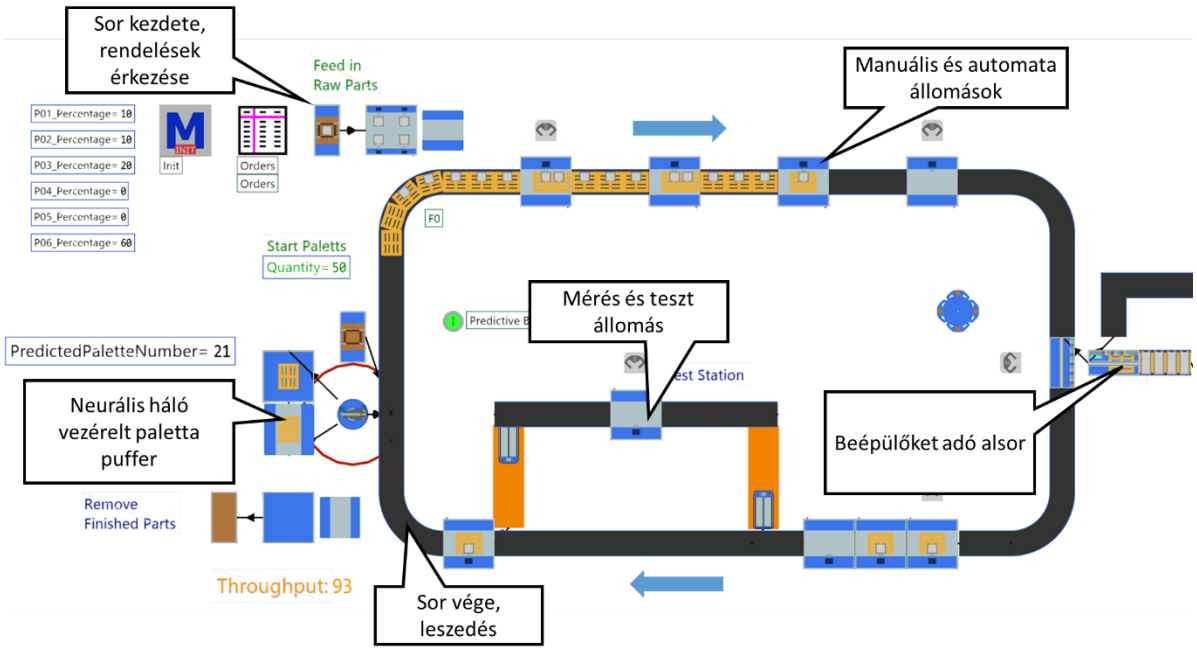
9.5 Alkalmazási példa 5. – Neurális háló és döntési tábla vezérlési logikában

Az alábbi példa egy olyan feladat megoldása, amikor a gyártósor egy részét egy neurális háló alapú döntésnek kell vezérelnie. Az alkalmazási példa alapja a Plant Simulation egyik beépített példája egy körpályás, palettás rugalmas gyártósor, amely nagyban hasonlít az egyik hazai, kis szériás orvosi berendezés gyártó cégnél alkalmazott rugalmas gyártósorokhoz. A palettás gyártósorok esetében fontos a megfelelő palettaszám meghatározása, hiszen a palettás gyártósorok esetében két probléma akadályozza a rendszer jobb teljesítményét:

DOI: 10.14750/ME.2026.012

- a túl sok paletta, amikor feltorlódnak a paletták és a rendszer ezért veszít kapacitást
- a túl kevés paletta, amikor a paletták nem érnek időben a következő állomásra, és a rendszer ezért veszít kapacitást.

A gyártósor egy hurok elrendezésű rugalmas gyártórendszer (67. ábra). A gyártósoron 6 különböző termék gyártása folyik (P01-P06) változó termékmixben, mivel a vevői igények erősen változók. Előfordulhat, hogy a P01 termékből egyik nap nulla darabot kell gyártani, és a többi termék teszi ki a gyártási volument. A másik nap pedig elképzelhető, hogy a P01 termék adja a teljes gyártási mennyiséget. Mivel a terméktípusok gyártási ideje az automata állomásokon jelentősen eltér egymástól, ezért a maximális kihozatal érdekében az optimálisan szükséges palettaszám is különbözhet a termékmixtől függően.



67. ábra A gyártósor elrendezése és fő elemei

A rendszer főbb jellemzői:

- automata és manuális állomások vannak a gyártósoron
- a manuális állomások esetében a gyártási időnek van szórása
- az automata állomások esetében a gyártási idő típusfüggő
- egy darabos áramlás történik, a batch méret 1
- napi tervezés történik a soron, napi szinten adott százalékos értékkel van megadva a termékmix
- a soron 50 paletta áll rendelkezésre
- a cél a napi gyártott darabszám maximalizálása

A rendszer kritikus eleme a palettaszám, ezért az a döntés született, hogy a sor végén a kész darab leszedése után lesz egy olyan elem, ami a palettaszám szabályozására szolgál. Ez minden esetben

DOI: 10.14750/ME.2026.012

kiszámolja, hogy az aktuális soron lévő termékmix alapján mennyi palettával tud a sor a legjobban működni. Ennek megfelelően a kontrollponthoz érkezett palettát leveszi a sorról, vagy ha szükséges új palettát tesz fel a sorra. A termékmixekhez az ideális palettaszám meghatározásához érezhetően rengeteg modell futtatásra lenne szükség.

Amennyiben az összes lehetséges kombinációra, úgy, hogy a 6 termék 0 és 100 közötti értékeit felvegye, de oly módon, hogy az összegük 100 legyen az alábbi számú kombinációt kellene kezelni és az alábbi mennyiségű kísérletet kellene lefuttatni:

$$\text{Kombinációk száma} = C(n+k-1, k-1) = C(109, 4)$$

ahol:

n – az összeg, amit el kell érni

k – a számok száma, amelyek kiadják az n összeget

Behelyettesítve:

$$C = n! / k! * (n - k)! \qquad \text{ahol } 0 <= k <= n$$

A kombinációk esetében ismétléses kombinációval kell számolnunk, mivel a termékek különbözőek és különböző gyártási paraméterekkel rendelkeznek.

behelyettesítve C = 96 560 646, és megszorozva a palettaszám lehetőségek számával (50-20 = 31) a lehetséges kísérletszám = 2 993 380 026. Ezen kívül a szimulációk esetében egy-egy esetre több futtatást is szokás csinálni a sztochasztikus folyamatjellemzők figyelembevételére. Ez alapján az előző szám 5-10-szerese a reális futtatás szám. Ez a szám még a mai modern számítógépek és az elosztott futtatási lehetőségek mellett is egy jelentős szám és jelentős idő, az összes esetet megvizsgálva. Neurális háló használatával, ez a szám jelentősen csökkenthető.

A neurális háló betanításához korlátozott számú esetet futtattam le, amelyeket úgy generáltam, hogy a termékmixet 0 és 100 között 10%-os lépésekben kombináltam. A termékmix összegének természetesen 100%-nak kell lennie.

$$\text{Ebben az esetben a kombinációk száma} = C\,(n+k-1, k-1) = C(19, 4)$$

$$\text{Behelyettesítve a fenti módon: } C = 3\,003$$

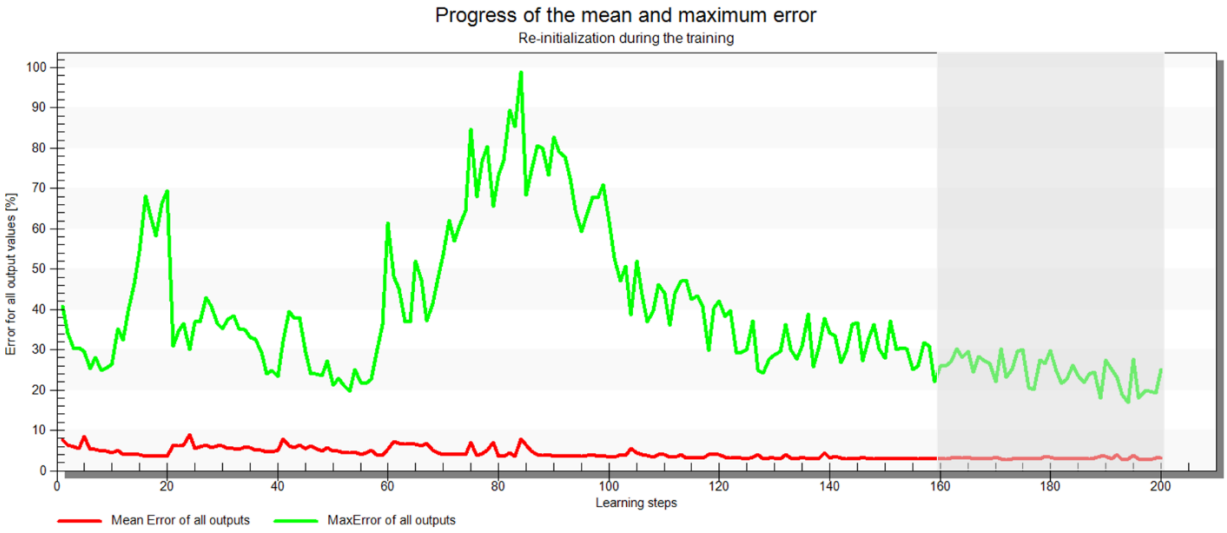
A példában a paletta számok esetében a 20-50 közötti palettaszám tartományt 5-ös lépésenként vizsgáltuk. Így összesen 3 003* 7 = 21 021 futtatásra volt szükség a neurális háló alapadatainak létrehozásához.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Beállítás	Érték
Number of training steps (betanítási lépések száma)	200
Number of hidden layers (rejtett rétegek száma)	1
Hidden layer dimension (rejtett rétegek mérete)	7
Activation function (aktiváló funkció)	Sigmoid
Input (bemenet)	Termékmix (6 szám százalékban) és a paletta szám
Output (kimenet)	Gyártott darabszám

25. táblázat Neurális háló beállításai

A neurális hálót a 25. táblázatban szereplő alapadatokkal tanítottam be. A tanítási görbét a 68. ábra mutatja. Látható, hogy 160 tanítási ciklus után a hiba értéke alacsony, jelentősen nem csökken már, és emellett a maximális hiba értéke is elfogadható szintre csökkent. A tanítás 2,531%-os hiba mellett fejeződött be, amit elfogadhatónak ítéltem a gyakorlati esetekre.



68. ábra Neurális háló tanítási görbéje

Az így elkészült neurális hálót beépítve a modellbe, és ismét lefutattam az eredeti paraméter mixeket (a 21 021 darabot). Az eredmény az, hogy az esetek több, mint 25%-ában a folyamatosan optimalizált palettaszámmal többet tudunk gyártani, és a maradék 75% esetében sem gyártunk kevesebbet. Például a 10 %, 10 %, 20 %, 0 %, 0 %, 60 % termékmix esetében fix palettaszámmal 73, míg a neurális hálóval vezérelt rendszerrel 93 darab gyártható egy nap alatt.

A kialakított neurális háló alapú döntési rendszer mindaddig használható, amíg

- nem történik új termékbevezetés
- nem történik változás a gyártási paraméterekben (műveleti idő, gép paraméterek, elrendezés…)

Ekkor a változásoknak megfelelően módosítani kell a digitális iker modellt és újra létre kell hozni a neurális hálóhoz szükséges tanítási adatokat.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

Amennyiben a valós gyártósoron nem lehet neurális hálót alkalmazni, akkor a döntési táblázatként érdemes használni a neurális háló betanítási eredményeit. Ehhez mindösszesen a kívánt bemenetekkel meg kell hívni a neurális hálót. Egy ilyen lekérdezés eredményét mutatja a 69. ábra.

	integer 1	integer 2	integer 3	integer 4	integer 5	integer 6	integer 7	integer 8
string	P01_Percentage	P02_Percentage	P03_Percentage	P04_Percentage	P05_Percentage	P06_Percentage	PaletteNumber	PredictedProduction
1598456	55	10	5	10	5	15	22	121
1598457	55	10	5	10	5	15	23	121
1598458	55	10	5	10	5	15	24	121
1598459	55	10	5	10	5	15	25	121
1598460	55	10	5	10	5	15	26	121
1598461	55	10	5	10	5	15	27	121
1598462	55	10	5	10	5	15	28	121
1598463	55	10	5	10	5	15	29	121
1598464	55	10	5	10	5	15	30	121
1598465	55	10	5	10	5	15	31	121
1598466	55	10	5	10	5	15	32	121
1598467	55	10	5	10	5	15	33	121
1598468	55	10	5	10	5	15	34	121
1598469	55	10	5	10	5	15	35	121
1598470	55	10	5	10	5	15	36	121
1598471	55	10	5	10	5	15	37	121
1598472	55	10	5	10	5	15	38	121
1598473	55	10	5	10	5	15	39	121
1598474	55	10	5	10	5	15	40	121
1598475	55	10	5	10	5	15	41	121

69. ábra Neurális háló lekérdezési táblázat részlete

Az így elkészült táblázat nem csupán arra alkalmas, hogy az eredeti neurális háló bemenetei és kimenetei közötti kapcsolatot megadja, hanem alkalmas arra is, hogy visszafelé az eredmények alapján a kívánt bemeneteket meg lehessen határozni. A példában ilyen eset lehet, ha a paletták közül valamilyen technikai ok miatt csak 35 darab érhető el - a táblázat alapján meghatározható - hogy milyen termékkombinációk esetében lehet a legmagasabb darabszámot gyártani a korlátos palettaszám mellett.

A lekérdezési táblából döntési táblát is létre lehet hozni. Ebben az esetben a döntési tábla feltételei a bemeneti termékmix százalékok, a tevékenységek pedig a palettaszám beállítás. Ezeknek az összerendeléseit tartalmazzák a szabályok. Az elkészült döntési tábla részletét mutatja a 70. ábra.

	string 0	string 39209	string 39210	string 39211	string 39212	string 39213	string 39214	string 39215	string 39216	string 39217	string 39218	string 39219	string 39220	string 39221	string 39222	string 39223	string 39224	string 39225	string 39226	string 39227	string 39228	string 39229	string 39230	string 39231	string 39232	string 39233	string 39234
string		R39209	R39210	R39211	R39212	R39213	R39214	R39215	R39216	R39217	R39218	R39219	R39220	R39221	R39222	R39223	R39224	R39225	R39226	R39227	R39228	R39229	R39230	R39231	R39232	R39233	R39234
116	P06_Percentage=45																							X			
117	P06_Percentage=50																						X				
118	P06_Percentage=55																					X					
119	P06_Percentage=60																				X						
120	P06_Percentage=65																										
121	P06_Percentage=70																										
122	P06_Percentage=75																										
123	P06_Percentage=80																										
124	P06_Percentage=85																										
125	P06_Percentage=90																										
126	P06_Percentage=95																										
127	P06_Percentage=100																										
128	ACTIONS																										
129	PaletteNumber=20					X									X								X	X	X		
130	PaletteNumber=21																				X	X					X
131	PaletteNumber=22																										
132	PaletteNumber=23																									X	
133	PaletteNumber=24																										
134	PaletteNumber=25																										

70. ábra A neurális háló alapján létrehozott döntési tábla részlete

A kidolgozott eljárás legnagyobb előnye az időnyereség, a fenti példában a három lépés során:

DOI: 10.14750/ME.2026.012

1. a szükséges palettaszám teljeskörű meghatározásához a közel 3 milliárd futtatást, ami egy átlagos mai gépen kb. 5000 évig futott volna,
2. sikerült lecsökkenteni neurális hálóval 21000 futtatásra, ami kb. 15 napos betanítási futtatást eredményezett,
3. majd a neurális hálót átalakítva döntési táblává egy 50000 szabályból álló, tizedmásodpercek alatt lekérdezhető, a valós ipari gyakorlatban is alkalmazható vezérlési rendszert sikerült elkészíteni.

A példából látható, hogy a kidolgozott módszer a digitális iker, a hozzá kapcsolódó neurális háló és az abból készített döntési tábla használatára a gyakorlatban jól használható eljárást biztosít a vezérlési logikák készítésére, kezelésére.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

10 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. Fükő, 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 Produktionsystemen, 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/mper-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,” *ARPN 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].

11 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.

DOI: 10.14750/ME.2026.012

12 Ábrajegyzék

1. ábra A szisztematikus irodalomkutatás folyamata 11

2. ábra Találatok éves bontásban a "Flexible manufacturing" kifejezésre a Scopus adatbázisban 11

3. ábra Vonatkozó publikációk és ipari termelés kapcsolata országonként 12

4. ábra Rugalmas gyártórendszerrel kapcsolatos kutatások tudományágak szerint 13

5. ábra A Systematic layout Planning módszer folyamata [5] 15

6. ábra Az Apple-féle gyár elrendezés-tervezési folyamat [6] 15

7. ábra Elrendezés-tervezési módszerek és a kapcsolódó kutatási dokumentumok száma 17

8. ábra A szakirodalom kiválasztási folyamatábrája a PRISMA modell alapján 19

9. ábra Rugalmas gyártórendszerek típusai 24

10. ábra Rugalmas gyártórendszerek fő elemei 25

11. ábra Termék életciklus görbék lehetséges alakjai 26

12. ábra A gyártervezési folyamat fő lépései [5] 27

13. ábra Folyamat grafikon példa 29

14. ábra Kapcsolati diagram és táblázatos megjelenítése példa 31

15. ábra Kapcsolati diagram kiegészítve a szükséges területtel 31

16. ábra Aktivitás kapcsolat diagram és közelségi kategória színjelölései 32

17. ábra Elrendezés változatok ugyanazon alapadatok alapján 32

18. ábra Digitális iker készítésének lépései 35

19. ábra Neurális háló szerkezete 37

20. ábra Rugalmas gyártórendszer kapcsolatai 41

21. ábra A kidolgozott tervezési eljárás szintjei és kapcsolódásai a fő komponensekhez 41

22. ábra Digitális iker felhasználási lehetőségei az életciklus mentén 43

23. ábra A kidolgozott tervezési eljárás felépítése 44

24. ábra A PQRST adatok időbeni változásának vizsgálatára szolgáló tábla 47

25. ábra Termék és gyártó terület életciklus görbe 49

26. ábra Rugalmas gyártórendszeren új termék bevezetések az életciklus során 49

27. ábra A termék életciklus értékesítési és profit görbéje 52

DOI: 10.14750/ME.2026.012

28. ábra A profitabilitás megjelenése több termék életciklusánál 52

29. ábra Egy termék életciklusának parabola görbéje 55

30. ábra Két termék életciklus görbéje és eredőjük számítása 56

31. ábra Aktivitás helyek és honnan-hova táblázat 58

32. ábra Elrendezés előzetes kiválasztásának folyamatábrája 60

33. ábra Többféle elrendezés egy soron belül 64

34. ábra Rugalmas gyártórendszer egy szakaszának felépítése 66

35. ábra Puffer működése meghibásodás esetén 67

36. ábra Puffer méretezési eljárás 68

37. ábra Valós honnan-hova táblázat származtatása 68

38. ábra Mellékágak két fő típusa 70

39. ábra LTO akkumulátorok degradációja a töltési ciklusok számának függvényében [56] 73

40. ábra Egy AGV gyártói adatlapja [58] 74

41. ábra Példa AGV töltési ciklusra 76

42. ábra Töltési döntési pont kialakítása 77

43. ábra Egyszerű gyártási folyamat és döntési táblája 81

44. ábra Neurális hálóval alkalmazásával módosított digitális iker készítési folyamata 82

45. ábra A valós és a szintetikus adatok elérhetősége a gyártósor életciklusa során 84

46. ábra Döntési tábla és neurális háló használata a digitális ikerben 86

47. ábra Energiahatékonyság működési modellje 88

48. ábra Energiahatékonysági funkció leírása információs áram táblázattal és döntési táblával 88

49. ábra Gyártórendszerek informatikai biztonsága az életciklus során 89

50. ábra Példamodell struktúrája a kapacitás számító eljárás bemutatására 102

51. ábra A termék életciklus görbék és eredőjük 103

52. ábra A példa rugalmas gyártórendszer elrendezése 105

53. ábra Döntési tábla a példa sorra 106

54. ábra Gyártósor tervezési alapadatai 107

55. ábra Digitális iker alapmodell és a futtatásából származó honnan-hova táblázat 108

56. ábra A sori állomások kihasználtsági adatai 108

DOI: 10.14750/ME.2026.012

57. ábra Digitális iker alapmodell és a futtatásából származó valós honnan-hova táblázat 109

58. ábra Digitális iker modell a számított ideális puffméretekkel és kiválasztott elrendezéssel 110

59. ábra Digitális iker modell a korlátokkal leosztott puffméretekkel 111

60. ábra A gyártósor végleges digitális iker modellje 112

61. ábra A példamodell elrendezése 113

62. ábra Töltöttségi színkódolás az AGV-k esetében 114

63. ábra Modell futási állapot 114

64. ábra Napi gyártott mennyiség az AGV darabszám függvényében 115

65. ábra A szükséges töltőállomás szám szimulációja 116

66. ábra Elrendezés probléma a töltőkör esetében 116

67. ábra A gyártósor elrendezése és fő elemei 117

68. ábra Neurális háló tanítási görbéje 119

69. ábra Neurális háló lekérdezési táblázat részlete 120

70. ábra A neurális háló alapján létrehozott döntési tábla részlete 120

13 Táblázatjegyzék

1. táblázat Rugalmas gyártórendszerek fő előnyei és hátrányai 25

2. táblázat Honnan-hova táblázat példa 30

3. táblázat Döntési táblázat formátuma 33

4. táblázat A tervezési eljárás szintjei és kimenetei 42

5. táblázat Rugalmas gyártórendszereket leíró paraméterek 46

6. táblázat Költségtípusok és jellemzőik összefoglaló táblázata 52

7. táblázat Elrendezések és a súlyozott anyagáram mátrixok kapcsolata 63

8. táblázat Anyagmozgatási módszerek összehasonlítása 65

9. táblázat Különböző típusú elrendezések esetében a valós honnan-hova táblázat jellemzői 69

10. táblázat Különböző típusú AGV-k összehasonlítása 72

11. táblázat AGV töltő puffer stratégiák 78

12. táblázat Információs áram táblázat példa 79

DOI: 10.14750/ME.2026.012

13. táblázat A valós és a szintetikus adat összehasonlítása 5V szempontból 85

14. táblázat Néhány gyártósor FMSX értéke 93

15. táblázat Életciklus adatok kanonikus másodfokú felírásának paraméter táblázata 102

16. táblázat Életciklus adatok táblázata kiegészítve az általános másodfokú alak paramétereivel 102

17. táblázat Az életciklus havi darabszámok táblázata 103

18. táblázat Gyártási felrakási sorrend 104

19. táblázat Honnan-hova táblázat a példa sorhoz 105

20. táblázat Információs kapcsolat táblázat a példához 106

21. táblázat Genetikus algoritmussal történt optimalizálás eredményei 110

22. táblázat AGV-k szimulációs jellemzői 112

23. táblázat A szimuláció által gyűjtött statisztikai értékek az AGV-re 113

24. táblázat A rendszer tervezés folyamata 115

25. táblázat Neurális háló beállításai 119