

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



AZ IPAR 4.0 KIHÍVÁSAI ÉS LEHETŐSÉGEI, A MÁTRIX
RENDSZERŰ GYÁRTÁS LOGISZTIKAI SZEMPONTÚ
VIZSGÁLATA

CÍMŰ PH.D. ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Készítette:

Hardai Ibolya

okleveles logisztikai mérnök

okleveles közgazdász

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

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ

Prof. Dr. Kovács László

egyetemi tanár

TÉMATERÜLET VEZETŐ

Prof. Dr. Illés Béla

egyetemi tanár

TÉMAVEZETŐ

Prof. Dr. Illés Béla

egyetemi tanár

TÁRSTÉMAVEZETŐ

Dr. Bányainé Prof. Dr. Tóth Ágota

egyetemi tanár

Miskolc, 2025.

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés.....	1
2. A kutatás háttere és célkitűzései.....	2
3. A disszertáció módszertana, a kutatás során alkalmazott módszerek	5
4. Mátrixgyártás - AGV kiszolgálással	8
4.1 A mátrixgyártás építőelemei	9
4.2 A működtetési főbb stratégiai elemeinek bemutatása egy mintagyár példáján	11
4.3 A mátrixgyártás irányítórendszere és a mátrixgyártás elemei közötti relációk	14
5. Általános matematikai modell.....	16
5.1 Gyártócellák elrendezésének optimalizálása	17
5.2 AGV útvonalak optimalizálása	17
5.3 AGV-sorrend optimalizálása	18
5.4 Integrált optimalizálás.....	18
6. A mátrixgyártás folyamatainak javítására szolgáló lehetőségek.....	22
6.1 Az anyagmozgatási útvonalak meghatározása.....	22
6.2 A cellák elrendezésének optimalizálási lehetőségei	23
6.3 A gyártási lista javítására szolgáló lehetőségek.....	27
6.4 Útvonal javítására szolgáló lehetőségek	28
6.5 Összehasonlítás a lineáris gyártósorral	31
7. Összefoglalás.....	32
8. Summary	32
9. Új tudományos eredmények.....	33
10. New scientific results	33
11. Irodalomjegyzék.....	34
11.1 Az értekezés témakörében használt saját publikációk	34
11.2 Az értekezés témakörében használt idegen publikációk.....	35

1. BEVEZETÉS

A negyedik ipari forradalom új lehetőségeket kínál a gyártórendszerek hatékonyságának, rendelkezésre állásának, fenntarthatóságának és átláthatóságának növelésében. Az Ipar 4.0 technológiákat széles körben alkalmazzák a beszerzési, a termelési, a disztribúciós folyamatok területén a technológiai és logisztikai hatékonyság növelése érdekében. Ezen új technológiák alkalmazása a hagyományos gyártási és szolgáltatási rendszerek kibernetikai rendszerré alakításához vezet, ahol az új, globalizált, összekapcsolt rendszerek és ellátási láncok tervezése és működtetése új optimalizálási megközelítéseket igényel [I/1].

A holnap gyártóüzemei rugalmasabbak és hatékonyabbak lesznek az új technológiáknak köszönhetően. A hatalmas vezeték nélküli érzékelőhálózatok, az intelligens logisztikai megoldások, az ember-gép együttműködés és az mindezen rendszereket összekötő szoros kommunikáció beépítésével fejleszthetők a rendszerek. A mobil gépek térnyerése és a statikus gyártóüzemek átkonfigurálásához vezet [I/2].

A hagyományos gyártórendszereket, ahol jellemzően összeszerelő sorokat alkalmaznak, elsősorban tömegtermelésre tervezték, ami nem alkalmas testreszabott termékek előállítására. Ehhez egy új, rugalmas, skálázható és újrakonfigurálható gyártórendszerre van szükség [I/3].

Az egyedi termékek iránti növekvő kereslet, a termékportfóliók nagy változatossága és az ezzel járó individualizáció növekedése miatt az erőforrások hatékony felhasználása a hagyományos vonalmenti gyártásban csökken. Ezekre az új kihívásokra az egyik válasz a mátrix alakú elrendezések alkalmazása több gyártócellával. A mátrixos gyártórendszeren belüli gyártócellákban zajló műveletek ciklusidő függetlensége és redundanciája lehetővé teszi az egyes munkadarabok egyedi gyártási útvonalát. A megnövekedett szabadságfok azonban fokozza a megbízható termelésirányító rendszerek iránti igényt [I/4].

Egy mátrixgyártó rendszerben a rugalmas, konfigurálható gyártó- és összeszerelő cellák rácsos elrendezésben helyezkednek el, az üzemben belüli ellátás pedig autonóm járműveken alapul. Adaptív és rugalmas anyagmozgatási megoldásokra van szükség a szabványosított és kategorizált gyártócellák dinamikus változó ellátási igényeinek kielégítéséhez [I/5].

Disszertációmban egy szisztematikus irodalmi áttekintést követően bemutatom a mátrix típusú gyártórendszer általános modelljét. Logisztikai szempontokra összpontosítva meghatározom a rendszer építőelemeit, funkcióit, kapcsolati rendszerét, a mátrixgyártás struktúráját. Megadom a logisztikai paraméterrendszert és a matematikai szabályrendszert, amely alkalmas a mátrix gyártórendszer építőelemei közötti logisztikai kapcsolati rendszer leírására. Ezután bemutatom azokat a módszereket, eljárásokat, amelyek lehetőséget nyújtanak mátrixgyártás esetén a gyártócella elrendezés, a gyártási sorrend és az AGV útvonalválasztás egyidejű optimalizálására. Az általam kidolgozott optimalizálási eljárás helyességét egy saját tervezésű szimulációs szoftver segítségével igazolom. Végezetül a szimuláció segítségével elvégezem a lineáris és a mátrix elrendezésű gyártórendszerek gyártási idejeinek összehasonlítását.

2. A KUTATÁS HÁTTERE ÉS CÉLKITŰZÉSEI

A folyamatosan változó fogyasztói igények az ipart újabb és újabb kihívásokkal állítja szembe. Az elvárások minél magasabb szintű kielégítéséhez egyre korszerűbb technológiákra lett szükség. Egy-egy újabb ipari forradalom kiindulópontja is ide vezethető vissza.

A gazdaságtörténet ezen szakaszaiban egybeesett a kommunikáció, az energia hasznosítás és a mobilitás fejlődése, ami magasabb szintre emeli az életminőséget megváltoztatva az addigi üzlet modelleket [I/6].

Az iparban jelenleg zajló változás, melyet sokan digitális forradalomként említenek, mindenfelé körülvesz minket. Az exponenciálisan gyorsuló fejlődést, mely több tudományterületet érint, a legtöbben csak ipar 4.0 néven emlegetik.

A termékek teljes életciklusa kiterjed a folyamat minden állomására, így

- a termék tervezésére,
- a termék fejlesztésére,
- a megrendelésére,
- a gyártására
- a végfelhasználóhoz való kiszállítására,
- az újrahasznosítására,
- a termékhez kapcsolódó szolgáltatásokra [I/7].

Mindennek az alapja az összes meghatározó információ real time rendelkezésre állása, amihez az értéklánc objektumai egy hálózatba kell kapcsolódjanak, továbbá elvárás, hogy az adatokból minden időpontban meghatározható kell legyen az optimális folyamat. Az emberek, gépek, berendezések, objektumok és rendszerek összekapcsolódása révén olyan hálózatok jöhetnek létre, amelyek különböző feltételek mentén optimalizálhatók, pl. költség, erőforrás felhasználás, rendelkezésre állás.

A korábbi rendszerekkel kapcsolatos problémák:

- környezeti károkon keresztül klímaváltozáshoz vezetnek,
- energiaintenzívek, de nem megújuló energiát hasznosítanak,
- csökken a munkaerő létszáma az öregedő társadalom következtében [I/8].

Az emberi munkaerő kiváltására a robotok és az automatizáció nyújthatja a legkézenfekvőbb megoldást. Az internet és a különféle vezetékes és vezeték nélküli kapcsolatok az egységeket, berendezéseket egy hálózatba integrálják, ezzel forradalmasítva a folyamatszervezést. A technológia fejlődése és az internet elérhetősége megteremtették a lehetőségét annak, hogy hálózatokba tudjanak szerveződni a különféle vállalatok és a vállalatokon belül a folyamatok, gépek, emberek is.

A digitalizáció és adatokkal kapcsolatos műveletek képezik a negyedik ipari forradalom alapját. „A digitalizáció kiterjed az élet minden területére és nagy innovációs potenciált kínál. Az intelligens hálózatok intelligens eszközeit értékteremtő hálózatok létrehozásával kapcsolják össze, melyek forradalmasítják a felhasználói szokásokat és piacokat. Az ipar 4.0 kiváló példa

arra, hogy a digitális világ és a klasszikus gazdaság összefonódása forradalmasítja a teljes értékteremtő hálózatot.” [I/9]

Az újabb ipari forradalom hajtóereje az internet, melynek révén nem csak az emberek, hanem a gépek is tudnak kommunikálni egymással a kiberfizikai rendszerben. Az Ipar 4.0 az intelligens terméket és termelési folyamatot is létrehozza [I/10]. A negyedik ipari forradalom a technológiák olyan fúziója, mely a fizikai, a digitális és a biológiai szférák közötti határvonalakat elmosza [I/11].

Az Ipar 4.0 a teljes vállalati értékláncot érinti, túlnőhet a vállalat határain is, átfogva akár a teljes ellátási láncot, az ellátási hálózatot. Ehhez hálózatba kötött technológiai eszközökre, új eljárásokra van szükség, mindez újfajta képességeket igényel a vállalattól, akár új üzleti modellek kialakítása is szükségessé válhat.

„Az Ipar 4.0 tehát egy olyan jelenség, amely technológiai eszközök, tevékenységek összessége révén, a digitalizáció adta lehetőségek kiaknázásával magas szintre emeli a folyamatok átláthatóságát és integrálja a vállalati értékláncot és az ellátási hálózatot, új szintre emelve a vevői értékteremtést.” [I/12]

Az üzleti paradigmaváltás, a modell megváltozása összetett hatást gyakorol a KKV szektorra. A vállalat, a kínálat biztosítójaként új típusú költségekkel, kockázatokkal, követelményekkel néz szembe. A megváltozott szerepkörök, beszállítói pozíció és stratégia is indokolja a teljes üzleti modell átvizsgálását, megújítását. A jövőben egyre nagyobb szükség lesz olyan szakemberekre, akik átlátják a vállalat komplex működését, egyszerre képesek a termelési, a logisztikai, a szervezeti és az informatikai rendszerek mélyreható megértésére. Az ilyen, interdiszciplináris tudással rendelkező szakértők ritkák, így komoly versenyelőnyt jelenthet a vállalat számára az alkalmazásuk [I/13].

A negyedik ipari forradalom hatása napjainkban leginkább az autóiparban érezhető, ahol a növekvő termékváltozatszám és a vevői igények állandó változása szükségessé teszi a folyamatos innovációt. Az autóipari gyártás paradigmaváltásának okai [I/14]:

- Vevői elvárások differenciálódása: az egyre heterogénebb vevői szükségletek és ezzel összefüggő vevői követelmények növekvő komplexitása.
- A modellciklusok rövidülésével növekszik a modellek száma a termékportfolióban.
- A modellenként gyártott darabszám csökkenő tendenciát mutat.
- A kutatás-fejlesztésre (K+F), marketingre stb. fordított növekvő költségek növelik a gépkocsik egységárát, ami további árnyomás alá helyezi az autógyárakat.
- A dinamikus piaci trendek és az új technológiák modulárisabb termelési és ellátási koncepciókat igényelnek.
- A volumen és a technológiai megoldások tekintetében nagy rugalmasságra van szükség.

A megvalósításhoz szükség van az ellátási láncban a végponttól végpontig terjedő adatintegrációra [I/15], az automatizált anyagáramlásra és a valós idejű kommunikációra. Mindezekhez új gyártási struktúrák és megoldások kidolgozására és megvalósítására van szükség. Egy ilyen új megoldást kínál a mátrixgyártás.

A kutatás főbb célkitűzései

A következő pontokban összefoglalom kutatásom főbb irányvonalait, elemeit:

- Fontosnak tartom ezen újszerű gyártási koncepció alapos megismerését és alkalmazhatóságának vizsgálatát, az elérhető előnyök áttekintését. Célom, hogy megvizsgáljam, rendszerezem és összefoglalam az alkalmazható Ipar 4.0 megoldásokat a mátrixgyártás működésének logisztikájában.
- A mátrix jellegű gyártást elemezve megvizsgálom, hogy milyen logisztikai feladatokat kell megoldani ahhoz, hogy a termelés hatékonyan és megfelelő minőségben legyen megvalósítható.
- Megoldandó probléma lehet az anyagmozgatási feladatok kapcsán az útvonal, a kiszolgálási sorrend és az időzítés meghatározása.
- Fontos szerepet kaphat a gyártócellák elrendezése is, pl. a szállítási útvonalak hosszát befolyásolja jelentősen, illetve kihatással lehet a nem kívánatos várakozási időkre is.
- Meg kell határozni a termelési folyamathoz szükséges AGV-k számát is. Az AGV (automated guided vehicle) a vezető nélküli jármű rövidítése. Az AGV-k fix útvonalakon közlekednek, miközben távoli számítógépes felügyelet alatt állnak. Tájékozódáshoz különböző infrastrukturális elemeket, padlóba épített vezetékeket, padlófelszíni szalagokat és mágneseket, falra szerelt jelzéseket, például vonalkódokat is használhatnak.
- A termékek gyártási sorrendjének meghatározása szintén izgalmas feladat lehet.
- Sok számítást, legyen annak oka a gyártási körülmények megváltozása vagy a gyártandó termékek vagy csak azok sorrendjének módosítása, valós időben kell elvégezni, így az optimális megoldás meghatározásakor a szűk keresztmetszetet a lebonyolítást irányító szoftver futtatásához rendelkezésre álló hardver és az idő fogja adni.
- A fentiekből is látszik, hogy számtalan megoldandó logisztikai feladat jelentkezik a mátrixgyártás során is. A későbbiekben az optimális útvonal, az optimális elrendezés és az optimális gyártási sorrend meghatározásának lehetőségével fogok foglalkozni.
- Szisztematikus irodalomkutatást végeztek az érintett témakörökben, a vizsgálat során megmutatkozhat a tématerület újszerűsége, aktualitása és fontossága. (a kutatás eredményét a következő fejezet tartalmazza). Ezt követően kidolgoztam egy módszertant, mellyel a lineáris gyártósori megoldáshoz képest a hatékonyság fokozható, az állításokat egy saját tervezésű szoftverrel támasztom alá. A szakirodalmak feldolgozása és elemzése 2021-ben készült, majd később frissítésre került.
- Összehasonlításokat fogok végezni végzek a hagyományos, lineáris gyártósor alkalmazásával működő, illetve a mátrixgyártást megvalósító termelési rendszerek között. Meg fogom vizsgálni Megállapításokat teszek, hogy milyen feltételek teljesülése esetén érdemes a mátrixgyártást alkalmazni. Az összehasonlítás szempontjai között szerepelhet a megtett út, a gyártáshoz szükséges idő, a kapacitás-kihasználás, az állásidők mennyisége, az energiafelhasználás mértéke, a költségek.

3. A DISSZERTÁCIÓ MÓDSZERTANA, A KUTATÁS SORÁN ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

Ebben a fejezetben bemutatom, hogy a korábban megfogalmazott kutatási célokhoz milyen módszerek alkalmazhatók és ezek közül melyeket fogok a későbbiekben alkalmazni.

Kutatómunkám során deduktív és induktív módszereket is alkalmaztam.

Az induktív megközelítés a konkrét megfigyeléstől halad az általánosabb elméletek irányába (alulról felfelé, bottom-up). Kezdeként konkrét megfigyeléseket és méréseket végzünk, ha mintákat és szabályszerűségeket azonosítunk be, megfogalmazzuk a kísérleti hipotézist. További vizsgálatok és kutatás után kidolgozhatjuk az általános következtetést vagy az elméletet [I/16]. Az induktív módszert alkalmaztam az optimalizálással kapcsolatos kutatási célok megvalósítása érdekében.

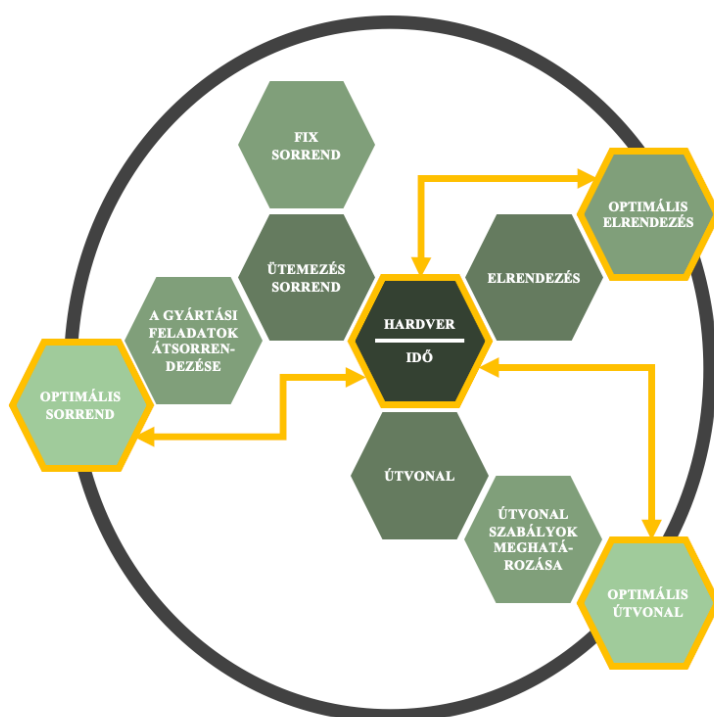
A deduktív megközelítés az általánosabbtól halad a konkrétabb elmélet irányába (felülről lefelé, top-down). A folyamat az elmélettel kezdődik, majd ezt szűkítjük a hipotézisre. A megfigyelések további szűkítése után tesztelni tudjuk a hipotézist, majd tézisként elfogadjuk vagy elvetjük azt [I/16]. A deduktív vagy analitikus kutatás során általános érvényű elvek és a hazai és nemzetközi forrásokban fellelhető leírásokat, elemzéseket tekintjük át. Ennek legtipikusabb példája az irodalomkutatás [I/17]. A hazai és nemzetközi források feldolgozása során szisztematikus irodalomkutatást végeztem, ennek alkalmazásakor az áttekinteni kívánt tématerület kiválasztása után első lépésben az ahhoz kapcsolódó szakirodalmi forrásokat kell beazonosítani, majd az összegyűjtött irodalom olvasása és elemzése után készíthető el maga az összefoglaló [I/18]. A kutatási kérdés meghatározása után az ahhoz kapcsolódó releváns adatbázis(ok) meghatározását követően a kulcsszókeresést alkalmazzuk, mint a legelterjedtebb módszert az irodalom azonosítására. A fő téma kijelölhető a cikkek összefoglalóinak áttekintésével, a források számának csökkentésével. A cikkek elemzési módszertanának kiválasztása után, a főbb tudományos eredmények összefoglalását követően feltérképezhetők a kevésbé kutatott területek és a szűk keresztmetszetek [I/19]. A disszertáció témakörének megfelelően az irodalomkutatást két nagyobb területre osztottam. Elsőként az Ipar 4.0 fogalomhoz, majd a mátrixgyártáshoz kapcsolható publikációkat vettem elemzés alá. Az irodalomkutatás során a ScienceDirect [I/20], a Scopus [I/21] és a Web of Science [I/22], stb.) adatbázisokat használtam. A releváns szakirodalmi ismeretek feltárása és áttekintése után nyílt lehetőségem beazonosítani a mátrixgyártás építőelemeit, funkcióit, kapcsolati rendszerét és mindezek segítségével tudtam meghatározni annak általános modelljét. Ennek részeként először részletesen bemutatom a mátrixgyártás gyáranak főbb szegmenseit (a gyártócellákat, a közlekedési útvonalakat, a csomópontokat, a bejáratot, a kijáratot, az áruraktárat, az AGV raktárat, a szerszámraktárat).

Szállítóeszközként AGV-ket alkalmaztam azért, hogy az ipar 4.0 elveknek lehető legjobban megfelelő (digitalizált és automatizált működésű) gyár modelljét írhasam fel.

A működtetési főbb stratégiai elemeit egy mintagyár példáján mutatom be. Ismertetem a gyártási folyamat és a gyártócellák működésének jellemzőit, meghatározom a gyártandó termékek listáját, majd rámutatok, hogy a gyártás teljes időszükséglete hol csökkenthető.

Mindezekkel bemutatok egy olyan modellt, amihez hasonlóról részletes leírást az irodalomkutatás során nem találtam. Ez a modell lehetőséget biztosít a gyártás során fellépő anyagmozgatási útvonalak és a targoncaszám meghatározására, a gyártócellák és gyártási folyamatok összerendelésére, így különféle működési stratégiák próbálhatók ki benne, mindezek által egy hatékonyabb, gyorsabb, kisebb költségű gyártás valósítható meg.

Az általános modell leírását követően a matematikai modellt készítettem el. Ehhez módszertani elemekként alkalmaztam a matematikai szélsőérték keresést, meghatároztam a célfüggvényeket, azok komponenseit, a hozzájuk tartozó korlátozásokat.



1. ábra: Az optimalizációs folyamat elemei (saját szerkesztés)

A modellalkotás fejezetei után az optimalizációs lehetőségeket vettem számba. A mérések elvégzésére és az elméletek kipróbálására, validására egy saját tervezésű, egyedi fejlesztésű szimulációs szoftver került elkészítésre. Az optimalizációs folyamatot 3 részproblémára bontottam (1. ábra), ezek az optimális gyártási sorrend, az optimális elrendezés és az optimális útvonal meghatározása. Szűk keresztmetszet a futtatási környezet (hardver) és a ráfordítható idő $[S/1]$, $[S/2]$. Első lépésben meg kellett határozni az anyagmozgatási útvonalak kiválasztásának módszerét, majd az AGV-k útvonalválasztási stratégiáját az alapkonfiguráció szintjén. Amíg ez nem ismert, addig nem indítható el a gyártási folyamat. Később, amikor a cellaelrendezés és a gyártandó termékek sorrendje kialakult, meg lehet vizsgálni, milyen paraméterek változtatásával, bevezetésével lehet tovább javítani a logisztikai időket.

Két cella közötti lehetséges útvonalak memória tömbökben tárolódnak. A tárolt útvonalakvektorok száma tetszőlegesen megválasztható (ω). Az anyagmozgatási útvonalak meghatározásakor az egyformán kedvező útvonalak esetében biztosítani szeretném, hogy az egyforma hosszúságú útvonalak egyenletes terhelés alá essenek, azért a Round-robin (RR) algoritmust használtam. Ez algoritmus egy olyan ütemezés, ami a hálózati terhelés egyenletes elosztását biztosítja. Az algoritmus lényege, hogy minden folyamat egyenlő időszeletet kap a működése során és ezt folyamatosan sorban egymás után kapják meg az egyes folyamatok. A Round-robin elv több olyan területeken is ismert, ahol a résztvevők egyenlő eséllyel vesznek részt egy folyamatban, ilyen például processzorok időosztása vagy a sportversenyeken a körmérkőzés [I/23]. Egy Round-robin alapú mohó algoritmus használata igazságos elosztásra ad lehetőséget. Az algoritmusok iteratíván szabályozzák az elosztási ütemtervet az RR elvek mentén és mohó kereséssel a különböző ellátási pontok és a keresleti régiók esetében, figyelembe véve a keresletet, a kínálatot és a távolságot [I/24].

A cellák elrendezésének optimalizálásakor először a kombinatorika eszköztárát hívtam segítségül, majd különféle paraméterek használatával alkalmaztam genetikus algoritmust.

A genetikus algoritmus egy olyan sztochasztikus algoritmus, mely az optimális megoldás keresésére szolgál. Az algoritmus főbb műveletei: keresztezés, mutáció, szelekció [I/25]. A genetikus algoritmus előnye, hogy konvergálnak a globális optimumhoz, többnyire egyszerűen kódolhatók, széles körben használhatók. Hátránya, hogy véges lépésben csak az optimum egy közelítése garantálható és nagy a futási idő [I/26]. Az algoritmus az egyedek egy kezdeti, véletlenszerűen generált populációját genetikus operátorok felhasználásával addig módosítja, míg az aktuális generáció egyedei eleget nem tesznek bizonyos leállási feltételeknek [I/27].

A gyártási lista információtartalmának vizsgálatakor merült fel a Huffman kódolás alkalmazhatósága, amelyben az információtartalom arányos a kódolás után kapott adatmennyiséggel. A Huffman-kódolás egy veszteségmentes adattömörítési algoritmus. Az ötlet az, hogy változó hosszúságú kódokat rendelnek a bemeneti karakterekhez, a hozzárendelt kódok hossza a megfelelő karakterek gyakoriságán alapul [I/28]. A Huffman-kódolás alkalmazási lehetőségei: faxok és szövegek továbbítására, hagyományos tömörítési formátumok előállítására [I/29]. Az elméleti háttér tényleges megvalósításához az iparban ismert DEFLATE [I/30] algoritmust használtam a GNU gzip [I/31] kiegészítőjén keresztül. Ez LZ77 tömörítéssel előállítja azt a kimeneti fájlt, amelynek méretét megfeleltettem az adott gyártási lista tényleges információtartalmának. A DEFLATE egy veszteségmentesen tömörített adatformátumot hoz létre, amely az LZ77 algoritmus és a Huffman-kódolás kombinációjával tömöríti az adatokat. A jelenleg elérhető legjobb általános célú tömörítési módszerek hatékonyságával összehasonlítható. Az LZ77 [I/32] egy szótár alapú tömörítést alkalmazó veszteségmentes adattömörítési algoritmus. A GNU shuf parancs a sorok véletlenszerű permutációjának előállítására szolgál [I/33]. Ezen alkalmazás segítségével készítettem további 100db véletlenszerűen sorrendezett listát az eredeti gyártási listából.

4. MÁTRIXGYÁRTÁS - AGV KISZOLGÁLÁSSAL

A jövő gyárában egy megbízható, könnyen változtatható, rugalmas rendszer kialakítására van szükség. A digitális munkafolyamat adaptív, egyetemes, értékteremtő kell legyen. A vezérlés, az ellenőrzés legyen integrálható, ipari felhasználásra alkalmas és hatékony.

A moduláris gyártás számos tervezési, rendszer- és folyamatváltozást foglal magában, de általában azt jelenti, hogy a gyártást különálló cellákra kell osztani, a folytonos vonal menti mód helyett. Az állomásokon történő gyártás és összeszerelés – köszönhetően a kötött sorrend megszűnésének – nagyobb rugalmasságot tesz lehetővé a teljes kimeneten beleértve a lehetőségek megváltoztatását vagy a kereslet módosulását. Ezekre nyújt megoldást az intelligens mátrixgyártás.

A mátrixgyártás főbb jellemzői, erősségei:

- A gyártást szolgáló modulok egy rács pontjaiban helyezkednek el (sorok száma: σ_1 , oszlopok száma: σ_2)
- ugyanannak a műveletnek a végrehajtása alternatív módon, több munkahelyen is történhet,
- az anyagáramlás teljesen rugalmas,
- a kiszolgálás többféle módon is történhet (általános esetben),
- a rendszer nagy mennyiségeket is tud kezelni,
- a rendszer a termelési volumen ingadozásával szemben kellően jó ellenállóképességgel rendelkezik.

Az irodalmi áttekintés következtetései

Megfigyelhető, hogy egyre népszerűbb, bár még kevésbé kutatott terület a mátrixgyártás. A 2022 előtt megjelent cikkek jelentős része review cikk és/vagy csak egyetlen hivatkozás formájában jelenik meg benne ténylegesen a mátrixgyártás. A megjelent publikációk jellemzően az utóbbi néhány évből származnak, ezáltal új kutatási területnek számít.

A kutatómunkát megelőző irodalomkutatást 2018-19-ben végeztem, majd 2021-ben áttekintettem az addigi új tudományos eredményeket.

A tématerülethez kapcsolódó publikációk közül 2021 év végéig csupán öt foglalkozik behatóbban a mátrixgyártással és az ahhoz kapcsolódó útvonal választási problémákkal is.

A szakirodalomban 13 cikk foglalkozott a mátrixgyártással és számos publikációban írtak az AGV-t alkalmazó rendszerek anyagmozgatási feladatainak ütemezéséről ugyanakkor a két tématerülettel integráltan csupán néhány írás jelent meg ("matrix production" AND "automated guided vehicle" és "matrix production" AND "AGV" szavakra összesen két találatot adott a Scopus keresője).

A mátrix rendszerű gyártás celláinak optimális elrendezését egzakt módon az elemzésbe vont publikációk közül egyetlen sem vizsgálta.

Mindezek alapján megállapítható, hogy a tématerület behatóbb tanulmányozása indokolt.

A fentiek figyelembevételével határoztam meg a kutatási feladatot, mely során a több AGV-t alkalmazó mátrixgyártás vizsgálatával és tervezési kérdéseivel fogok foglalkozni.

Mátrixos elrendezésű rendszerek tanulmányozása és a szakirodalom áttekintése során feltárt információk segítségével létrehoztam egy olyan modellt, amely modellel ezek a mátrixgyártás folyamatai kezelhetők, tanulmányozhatók. A következőkben a mátrixgyártás modelljét fogom részletesen bemutatni.

4.1 A MÁTRIXGYÁRTÁS ÉPÍTŐELEMEI

Mátrix jellegű termelés gyárának főbb szegmensei: a gyártócellák, a közlekedési útvonalak, csomópontok, a bejárat, a kijárat, az áruraktár, az AGV raktár, az eszközszerzsámraktár.

A gyártási területen a cellák mátrix elrendezésben, a közlekedési útvonalakkal határoltan kerülnek telepítésre. A mátrix elrendezés alatt olyan elrendezést értünk, ahol a cellák sorokba és oszlopokba rendezett formában kerülnek telepítésre. Az elhelyezhető gyártócellák mennyiségének csak a rendelkezésre álló terület szab határokat.

Egy-egy technológiai folyamat során fellépő feladat(ok) elvégzésére alkalmas terület a gyártócella. A cellák konkrét fizikai helyeinek meghatározása a szükséges cellaméret és közlekedési út szélesség figyelembevételével történik meg. A cellákon belül forgóasztalok található alkatrészek, szerszámtartók és bizonyos folyamatokat végrehajtó robotok tárolására. Ezek a termelőcellák egyedileg bővíthetők folyamat-specifikus eszközökkel. Mivel a technológiai folyamatok száma kevesebb is lehet, mint a rendelkezésre álló termelőcellák száma, így előfordulhat, hogy egy-egy művelet elvégzését párhuzamosan több cella is végzi. Váratlan hiba vagy tervezett leállás során a kieső cella feladatait egy másik cella átveheti, ezzel is biztosítva a zavartalan termelést.

A cellák ellátása során mind az alkatrészeket mind a szerszámokat szállíthatják AGV-k.

A cellákban elhelyezhető egy input és egy output várakozóhely is, ami nem blokkolja az oda- és az elvezető utat, ezen kettő között helyezkedik el maga a munkaterület.

A cellák lehetnek irányítottak, azaz pontosan ki van jelölve, az adott gyártási program vonatkozásában, hogy melyik a cella bejárata és a kijárata, illetve tervezhető irányfüggetlen megvalósítás is, ekkor tetszőlegesen választható meg a belépési oldal. A vizsgált modell esetében irányítottak a cellák.

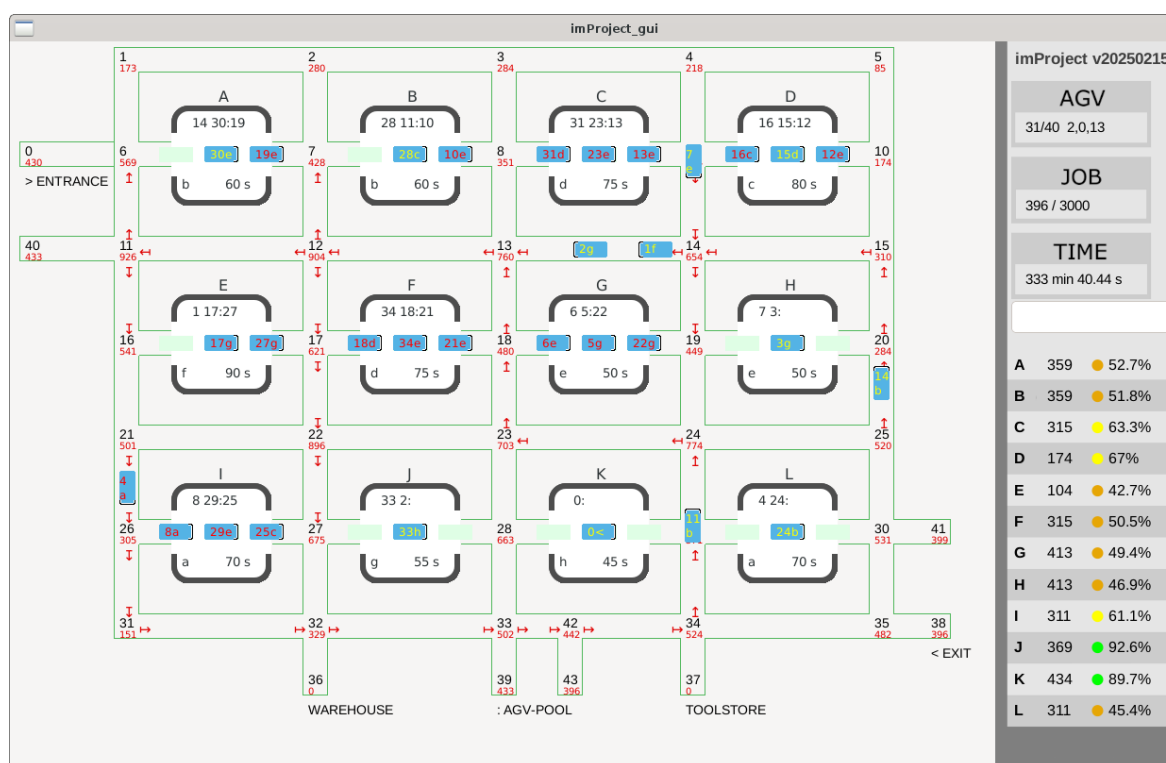
A cellák közötti és körüli útszakaszok a rendelkezésre álló hely és az útvonal meghatározási stratégia függvényében lehetnek egy- vagy többsávosak, egy- vagy többirányúak. Az útvonal tervezése és leírása során figyelembe vett pontok: a be- és kijáratok, az alapanyagraktár, a szerszámraktár, az AGV tároló, az útelágazások, keresztezések, illetve további minden olyan pont, ahol az AGV irányt válthat, kanyarodhat. A vizsgált modellben az utak egysávosak, a fordulók nem ívesek.

Az üzemnek egy bejárata (ENTRANCE) van, ahol a munkadarabok beérkeznek, és egy kijárata (EXIT), ami a készáru raktárba vezet. Egy-egy munkadarabot szállíthat egy adott AGV a gyártása teljes időtartama alatt vagy az AGV csak a celláig szállítja, ott lerakódásra kerül, majd a gyártási művelet elvégzése után egy másik AGV-re kerül halad tovább. Mintagyáramban a bejárat és a kijárat közt egy adott munkadarabot dedikáltan egy AGV szállít végig a teljes gyártási folyamaton. Olyan esetekben, érdemes ezt a változatot alkalmazni,

amikor a munkadarabok nagy méretűek és/vagy problémás a rakodásuk (pl. speciális megfogást igényelnek).

Az áruraktárban (WAREHOUSE) a termékbe beépülő elemeket tárolják. A mátrix rendszerű gyártórendszerben az alapanyagok, segédanyagok, alkatrészek berakodása és kirakodása itt történik. A gyártóberendezések kiszolgálásához és átszerszámozásához szükséges komponensek elhelyezésére alkalmas terület rész a TOOLSTORE. A raktárakban az AGV-kre az eszközöket és alkatrészeket manuálisan vagy automatikusan teszik fel. Az AGV-k elhelyezésére, töltésére hivatott az AGV-POOL.

Az általam vizsgált minta üzemnek (2. ábra) egy bejárata (ENTRANCE) és egy kijárata (EXIT), egy alkatrésztára (WAREHOUSE), egy AGV tárolója (AGV-POOL), egy szerszámraktára (TOOLSTORE) van, ezek előre meghatározott helyeken találhatók.



2. ábra: A mintagyár (saját szerkesztés)

A mátrixgyártásban a termelés és az azt támogató logisztikai folyamatok külön vizsgálhatók. Ezzel a koncepcióval a változtatható funkciójú cellákat tartalmazó rendszerek bármikor újrakonfigurálhatók: a gyártási folyamat további cellákat is felhasználhat, de csökkentheti is azok számát, illetve átszerszámozással módosítható egy-egy cella által ellátandó feladat. Így az értépteremtési láncolat az üzemben belül és ennek következtében teljes egészében – nem szakad meg.

A változó terméktípusoknak megfelelően a termelési cellák automatikusan átállnak az új gyártási feladatnak megfelelően. Ha az egyes cellákba új termékek integrálódnak, a termelés a többi cella között oszlik meg. A feleslegessé vált szerszámokat a beérkező AGV-kre helyezik és elszállítják az eszköztárba, az új feladathoz szükséges szerszámokat a cellába hozzák. A cella átalakulása párhuzamosan történhet a más cellában történő termeléssel. Az átalakítás után az új

egység kerül gyártásra. Teszteléskor és karbantartáskor a cella termelési feladatait más cellákra át lehet terhelni. Mindezek segítségével az egyénre szabott sorozatok gyártása – mint az Ipar 4.0 lényeges része – megvalósítható korlátozások nélkül az ipari tömegtermelés keretein belül.

Az automata vezérlésű járművek olyan anyagmozgató berendezések, melyek önállóan közlekednek egy raktárban, elosztóközpontban vagy gyártólétesítményben, fedélzeti kezelő vagy vezető nélkül. Az AGV-k anyagokat, eszközöket vagy alkatrészeket szállítanak többek között a raktárakból a gyártósorokra vagy egyik munkaállomásról a másikra, ezzel biztosítva az anyagok ismétlődő és hatékony mozgását a gyártási folyamat során.

Az AGV MSZ EN ISO 3691-4 szerinti definíciója: „*A vezető nélküli ipari targonca olyan géphajtású targonca, amelyet automatikus működésre terveztek. A vezetőnélküli targoncarendszer tartalmazza a vezérlőrendszert, amely lehet a targonca része és/vagy attól elválasztott, továbbá a kényszerpályás vezérlőeszközöket és a hajtórendszert.*” [I/34]

A vizsgált modellben egy AGV a következőt szállítja: egy munkadarabot (a teljes gyártási folyamat alatt). Az alkatrészek, részegységek, eszközök, szerszámok cellába történő szállítása felsőpályás megoldással történik. Az AGV egy cella output helyéről nem indul el addig, amíg nem tudja lefoglalni a célcella input várakozó helyére vezető útvonalat.

4.2 A MŰKÖDTETÉSI FŐBB STRATÉGIAI ELEMEINEK BEMUTATÁSA EGY MINTAGYÁR PÉLDÁJÁN

A modell, a későbbiekben ismertetésre kerülő matematikai modell és az informatikai megvalósítás (szimuláció) segítségével lehetőség nyílik arra, hogy meghatározzam a mátrixgyártás esetében a targoncák optimális útvonalát, a szállítójárművek optimális számát, a gyártás teljes időszükségletét, az anyagmozgatási és várakozási időket.

A gyártandó termékek megváltoztatásakor, ha szükséges, a termelési cella automatikusan átáll az új feladatnak megfelelően. Az termelés-tervező és -irányító szoftver az új igényeknek megfelelően elindítja a cella átszerszámozási műveletét, a szükséges eszközöket, szerszámokat az AGV-k kiszállítják, illetve visszaszállítják a feleslegessé vált modulokat. Ugyanekkor a gyártás során fel nem használt alkatrészek, egységek is visszakerülnek a raktárba, helyettük az új feladathoz szükséges komponensek kerülnek a gyártócellába. Egy-egy cella átalakulása párhuzamosan történik a más cellában történő termeléssel. Teszteléskor és karbantartáskor a cella termelési feladatait más cellákra át lehet terhelni.

Mintagyáramban, ahogy azt a 2. ábra is mutatja, minden csomópont, ki- és bejárat rendelkezik egy egyedi sorszámmal, ezzel tudjuk egyedileg azonosítani ezeket. Az ábrán látható minden útszakasz egy sáv.

Egy AGV egy munkadarabot szállít és az a teljes gyártási folyamat alatt a hozzá rendelt AGV-n foglal helyet, így haladva celláról cellára. A munkadarabot szállító járművek mozgása: A gyártás elején minden AGV az AGV-POOL-ban foglal helyet, itt nem korlátozott az egyidejűleg elhelyezhető AGV-k száma. Ezután az AGV-k az ENTRANCE-ba mennek, hogy felvegyék a munkadarabokat, majd a munkadarab gyártási folyamat listájának megfelelően a folyamatokat kiszolgáló cellákba szállítsák azokat. A legutolsó gyártási folyamat után a készterméket az EXIT-be kell szállítani, majd ezután az AGV az AGV-POOL-ba megy.

Az ENTRANCE és az EXIT helyeket egyszerre maximum $\delta_1 = 6$ és $\delta_2 = 6$ jármű tartózkodhat a fel-, illetve lerakodás idejére, ezzel is reprezentálva az ott rendelkezésre álló terület korlátozottságát.

A cellák irányultsága kétféle lehet, vagy minden cella balról jobbra járható át vagy a páratlan sorban levő cellák bal, míg a páros sorban levő cellák jobb oldalán helyezkedik el a bejárat.

A mintagyárban 3×4 ($\sigma_1=3$ és $\sigma_2 = 4$) cella található, ezek az abc nagybetűivel kerültek azonosításra (A, B, ..., L), míg a termelés $\mu=8$ technológiai folyamatot tartalmaz, melyeket kisbetűkkel jelöltem (a, b, ..., h). A cellák kihasználtságát is érdemes nyomon követni, hiszen ezen információ segítségével lehet beavatkozni, dönteni a cellában zajló folyamatok megváltoztatásáról, átszervezéséről, leállításáról.

A gyártócellák bármelyikében bármelyik technológiai művelet elvégezhető, így igen nagy számú hozzárendelési feladat írható fel. Ha egy cellához más feladat tartozik, akkor azokat a cellákat különbözőnek tekintem és a lehetséges layout szempontjából különböző elrendezésnek minősítem, mert noha maguk a cellák rögzített helyen vannak, a bennük zajló gyártás szempontjából különféle gépeknek feleltethetők meg. Az optimális elrendezést az összes lehetséges cella sorrend és irányultság kombináció egyenkénti vizsgálatával, majd a kapott eredmények összehasonlításával határozhatjuk meg minden egyes gyártási sorrend esetében és a későbbiekben részletezett útvonal szabályok figyelembevételével. A 2. ábra a mintagyár egy véletlenszerűen kiválasztott elrendezését mutatja be.

A gyártandó termékek meghatározása

A gyorsan változó vevői igények következtében a termékek életciklusa lerövidül, a sokféleség növekszik, miközben a modellenkénti termékmennyiség csökken [I/35], ezért folyamatosan dolgozni kell a termék és a gyártásához kapcsolódó technológia innovációján. Nem csak magát a terméket kell megújítani, hanem a változó vevői igényeknek megfelelően a rugalmas és optimális termelési technológiát is ki kell alakítani, hiszen nagyon magas számú termékvariáns kerül gyártásra, ezek eltérő gyártási műveleteket igényelhetnek [I/36].

Fontos szempont volt, hogy a modell alkalmas legyen sokféle termék, termékváltozat gyártásának modellezésére.

A szimulációban a gyártási listához meg kell határozni a termékféleségeket, azok előfordulási valószínűségét. Az egyes termékek előfordulási valószínűsége a rendszerben végzett megfigyelés vagy prognózisok alapján adható meg, illetve ideális esetben már eleve megrendelt termékek gyártása történik, ekkor pontosan ismert a gyártandó mennyiség.

A gyártandó termékek meghatározásakor használt paraméterek, jelölések:

- μ db különböző gyártási művelet,
- $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_\mu$: gyártási műveletek,
- $\alpha_1 : \lambda_1\%, \alpha_2 : \lambda_2\%, \dots, \alpha_\mu : \lambda_\mu\%$: a gyártási műveletekre vonatkozó előfordulási valószínűségek,
- ρ db terméket tartalmazó gyártási lista.

A gyártandó termékek sorát véletlenszerűen generáltam a következőkben részletezett módon. Minden művelet esetében egy valószínűségi változóval vettem figyelembe azt, hogy az adott feladat részét képezi-e a termék gyártásának. Egy-egy gyártási folyamat maximum $\mu=8$ műveletből áll ($\alpha_1 = a, \alpha_2 = b, \alpha_3 = c, \alpha_4 = d, \alpha_5 = e, \alpha_6 = f, \alpha_7 = g, \alpha_9 = h$), melyekből tetszőleges számú kimaradhat, – ezzel szimulálva a termékek diverzitását – de a sorrend minden esetben követi az abc-beli betűsorrendet (pl. adeg). Így $2^8 - 1$ eltérő termék fordulhat elő. A gyártandó termékek mennyiségét $\rho=3000$ -ben rögzítettem (természetesen ez a mennyiség is változtatható szükség szerint). A vizsgált modellben az egyes gyártási folyamatok (a..h) a következő valószínűséggel fordulnak elő egy-egy termék esetében: $\lambda_1=71,17\%$, $\lambda_2=80,83\%$, $\lambda_3=39,80\%$, $\lambda_4=70,50\%$, $\lambda_5=94,73\%$, $\lambda_6=24,80\%$, $\lambda_7=84,70\%$, $\lambda_8=100,00\%$. Mindezek segítségével legeneráltam és rendeztem egy 3000 termékre vonatkozó gyártási folyamat listát. A gyártási lista sorai reprezentálják az előállítandó termékeket a szükséges technológiai műveletekkel, például az abgh sor esetében az a, b, g, h feladatokat kell elvégezni, egy ilyen megoldás lehet az A, B, K, L cellák felkeresése (2. ábra).

A továbbiakban ezen a 3000 darabos listán szereplő termékeket fogom a termelési program által előírtak tekinteni.

A gyártás teljes időszükséglete

Mivel minden cellában ugyanaz a művelet ugyanannyi idő (azonos művelet azonos idő) így csak a logisztikai szállítási időket lehet optimalizálni, hiszen az átfutási idő szempontjából nem releváns, hogy konkrétan melyik cellában történnek meg a technológiai műveletek, azok összes időszükséglete nem változik, csak a szállítási és várakozási időkben lehetnek eltérések. Ha a termelés során egy cellában módosítani kell a hozzá rendelt műveletet, akkor az átszerszámozási idő is megjelenhet az átfutási idő számításakor (történhet az átszerszámozás olyan időszakban is, amikor az adott cella amúgy sem végezne gyártási műveletet).

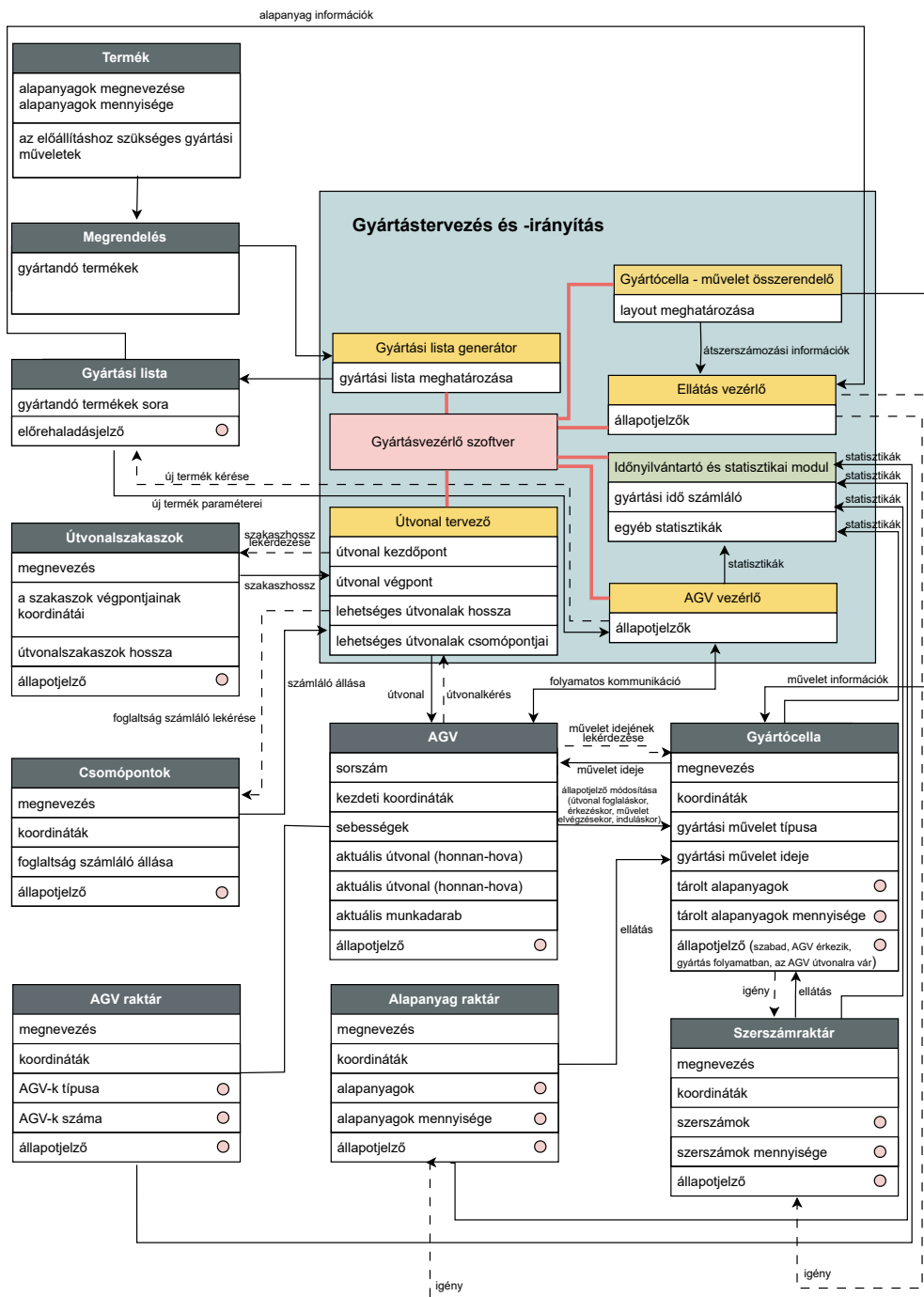
Az effektív gyártás ideje adott a benne foglalt műveletek idejei által, ehhez adódnak hozzá az anyagmozgatással kapcsolatos idők: az útvonalra várakozás ideje, az útvonalon az útra való várakozási idő, az anyagmozgatási idő az adott pontok között, a fel- és lerakodási idő és az AGV-POOL-ban töltött idő.

Az AGV-k számának meghatározása

Egy kiválasztott layout szerinti elhelyezkedést megvizsgáltam olyan szempontból, hogy miképp változnak a várakozási, mozgási, gyártási idők, ha az alkalmazott AGV-k száma változik. Az AGV-k számának megválasztása kedvezően hat a teljes gyártás időszükségletére és a felmerülő költségek szintjére, hiszen lelassul a gyártás, ha túl kevés a targonca, de akkor is, ha túl sok, mivel ilyenkor egymást mozgását akadályozzák, jelentősen megnövekednek a várakozási idők és ezáltal felesleges költségek generálódnak.

4.3 A MÁTRIXGYÁRTÁS IRÁNYÍTÓRENDSZERE ÉS A MÁTRIXGYÁRTÁS ELEMELI KÖZÖTTI RELÁCIÓK

A 3. ábra a mátrixgyártás elemei közötti relációkat és az irányítórendszer egy lehetséges megvalósítását mutatja.



3. ábra: A mátrixgyártás elemei közötti relációk (saját szerkesztés)

Az ábra következő fizikai rendszerelemeket tartalmazza: gyártócella, AGV, útvonalszakaszok, csomópontok, alapanyag raktár, AGV raktár, szerszámraktár, munkadarab/termék. További rendszerelem a megrendelés és a gyártási lista.

Minden fizikai komponensnek van megnevezése és a tervezési fázis után ismertek a koordinátái is, tovább minden elem rendelkezik állapotjelzővel is. Az állapotjelző a legegyszerűbb esetekben az elérhet/nem elérhető vagy működik/nem működik paramétereket és az ezekhez kapcsoló kiegészítő információkat tartalmazza (meghibásodás oka, meghibásodás óta eltelt idő). A gyártócella által nyilvántartott információk közé tartozik még a hozzá rendelt gyártási művelet típusa, időigénye és a cellában tárolt alapanyagok típusa és mennyisége. Minden AGV rendelkezik egy egyedi sorszámmal, ismertek a sebességadatai, tárolásra kerül az aktuális útvonal kezdő és végpontja, illetve az AGV számára ismertek az általa szállított munkadarabbal kapcsolatos gyártási információk (milyen műveletekre és milyen sorrendben lesz szükség). A raktár jellegű komponensek esetében nyilvántartásra kerül az ott található egységek típusa és mennyisége.

A gyártástervező és -irányító rendszer egy szoftver vagy szoftverhalmaz és a futtatásra használt hardverek összessége, továbbá szorosan kapcsolódik hozzá az egyes fizikai elemeken futó szoftver. A gyártási lista generátor feladata a beérkezett megrendelések feldolgozása, a gyártandó termékek sorrendbe rendezése, kimenete a gyártási lista. Az AGV vezérlő az AGV-eket irányítja, folyamatos kommunikációt tart fel velük. Egy-egy termék elkészülte után információkkal látja ez az AGV-t a következő munkadarabbal kapcsolatban. Az útvonal tervezőt az AGV hívja meg, amikor helyet változtatni, például az egyik gyártócellából egy másikba szeretne menni. Az útvonal tervező a két kért pont közötti és aktuálisan elérhető útvonalat adja meg az érintett csomópontok felsorolásával, ezáltal ismertté válik az adott útvonal hossza is. A gyártócella - művelet összerendelő feladata meghatározni, hogy mely gyártócellában mely gyártási művelet történjen. Ha az adott cellához más gyártási művelet kerül hozzárendelésre, az AGV vezérlő AGV-t irányít a cellához a feleslegessé vált szerszámok és alapanyagok elszállítására, majd az átszerszámozáshoz szükséges komponensek cellába történő kiszállítása megtörténhessen és feltöltésre kerüljön a helyi alapanyag tároló. Az időnyilvántartó és statisztikai modul felelős minden statisztikai adat összegyűjtéséért, ismernie kell az elemek állapotjelzőit. Ezen információk feldolgozásával monitorozható és vizuálisan is megjeleníthető a gyártási folyamat aktuális állapota, a már elvégzett feladatok.

Az előző fejezetben ismertetett irodalomkutatási eredmények és a mátrix típusú gyártás részletes elemzése után összefoglalásaként került meghatározásra az első tézisem.

1. TÉZIS

Megvizsgáltam és tanulmányoztam az ipar 4.0 technológiákat alkalmazó mátrixgyártás hazai és nemzetközi szakirodalmát. Megállapítottam, hogy a több AGV-t alkalmazó mátrixgyártás tervezési kérdéseinek vizsgálata egy új kutatási terület, ugyanis a mátrix rendszerű gyártás celláinak optimális elrendezésével foglalkozó szakirodalmat nem találtam. Ennek okán, a szakirodalmi ismeretek felhasználásával és a digitalizációra vonatkozó lehetőségek figyelembevételével kidolgoztam a mátrix gyártórendszer általános modelljét, meghatároztam a rendszer építőelemeit, funkcióit, kapcsolati rendszerét. [S/3], [S/4], [S/5], [S/10], [S/11], [S/14], [S/15]

5. ÁLTALÁNOS MATEMATIKAI MODELL

A következő alfejezetekben bemutatom a különféle szempontok szerinti optimalizálási lehetőségek paramétereit, korlátozásait és az ezek segítségével felépített célfüggvényeket [S/18]. Két cellát akkor tekintek különbözőnek, ha azokban eltérő gyártási művelet történik. A cellák elláthatják egymás feladatait, de ehhez átszerszámozásra, átalakításra van szükség.

Jelölések:

- C : az útvonalszakaszok száma,
- $d_{p,q}$: a p -edik és q -edik pozíció közötti távolság,
- $d_{x,y,i,i+1}$: az útvonalszakasz hossza az x -edik AGV y -edik rakományának $\theta_{x,y,i}$ és $\theta_{x,y,i+1}$ pontok közötti szállítása során,
- $f_{i,j}$: anyagáramlási intenzitás az i -edik és j -edik cella között,
- K : a gyártandó termékek száma,
- $L_{i,p} \in \{0,1\}$: bináris változó, mely megmondja, hogy az i -edik cellát a p -edik pozícióba kerül-e,
- $L_{j,q} \in \{0,1\}$: bináris változó, mely megmondja, hogy az j -edik cellát a q -edik pozícióba kerül-e,
- M : egyedi gyártócellák száma,
- N_x : az x -edik AGV által egymástól függetlenül szállított rakományok száma,
- p, q : két különböző pozíció,
- P : potenciális helyek száma,
- Q : szakaszhatároló pontok száma,
- $R_{x,y,z_k} \in \{0,1\}$: az x -edik AGV az y -edik rakománya a k -edik termék-e,
- s_{w_c} : a w_c útvonalszakasz hossza,
- $\mathbf{s}_{x,y} = [\theta_{x,y,0}; \theta_{x,y,1}; \theta_{x,y,2}; \theta_{x,y,3}; \dots; \theta_{x,y,\beta_{x,y}+1}; \theta_{\beta_{x,y}+2}; \theta_{\beta_{x,y}+3}]^T$: az x -edik AGV az y -edik szállítmány esetében a teljes útvonalának pontjai a bejárás sorrendjében,
- t_{0,z_k} : a gyártás megkezdésétől a k -edik termék gyártásának kezdetéig eltelt idő,
- $T_{x,y,i,i+1,w_c} \in \{0,1\}$: az x -edik AGV az y -edik rakománya szállítása során a $\theta_{x,y,i}$ és a $\theta_{x,y,i+1}$ pontok között igénybe veszi-e a w_c útszakaszt,
- t_x : az x -edik AGV által szállított munkadarabok összesített gyártási idői,
- X : az AGV-k száma,
- $\overline{v_{x,y,i,i+1}}$: az AGV átlagsebessége az x -edik AGV y -edik rakományának $\theta_{x,y,i}$ és $\theta_{x,y,i+1}$ pontok közötti szállítása során,
- w_c : a c -edik útvonalszakasz,
- $W_{x,y,i,i+1,\Phi_q} \in \{0,1\}$: az x -edik AGV az y -edik rakomány a $\theta_{x,y,i}$ és a $\theta_{x,y,i+1}$ pontok közötti szállítása során a Φ_q pontot érinti-e,
- $\mathbf{z} = [z_1; z_2; \dots; z_K]^T$: a gyártandó termékek sora,
- β_{z_k} : a gyártási műveletek száma a z_k termék esetében,
- $\beta_{x,y}$: a gyártási műveletek száma az x -edik AGV y -edik rakománya esetében,
- Δs : két AGV közötti minimális követési távolság,
- θ : gyártócellák, AGV-POOL, ENTRANCE, EXIT pontok,
- σ_1 : a mátrixgyártás sorainak száma ($1 \leq \sigma_1$), σ_2 : a mátrixgyártás oszlopainak száma ($1 \leq \sigma_2$),
- τ : az alkalmazott prioritás módozat,
- Φ_q : q -edik szakaszhatároló pont.

5.1 GYÁRTÓCELLÁK ELRENDEZÉSÉNEK OPTIMALIZÁLÁSA

Cél: Minimalizálni a cellák közötti összes anyagmozgatási munkát figyelembe véve a köztük lévő távolságot és az anyagáramlást.

A pozíciók száma és a maximálisan elhelyezhető cellák száma: $\sigma_1 \cdot \sigma_2$, tehát $p \leq \sigma_1 \cdot \sigma_2$, illetve $i \leq \sigma_1 \cdot \sigma_2$. A p -edik pozíció meghatározása: a p -edik pozíció a mátrix e_1 -edik sorában és e_2 -edik oszlopában van, azaz

$$p = (e_1 - 1) \cdot \sigma_2 + e_2 \quad \text{ahol } e_1 \in \mathbb{N}, e_2 \in \mathbb{N} \quad (1)$$

$$e_2 = p \pmod{\sigma_2} \quad \text{ahol } e_2 \in \mathbb{N}, p \in \mathbb{N}, \sigma_2 \in \mathbb{N}^+ \quad (2)$$

p és σ_2 maradékos osztásakor a maradék és

$$e_1 = \frac{p - e_2}{\sigma_2} + 1 \quad \text{ahol } e_1 \in \mathbb{N}, e_2 \in \mathbb{N}, p \in \mathbb{N}, \sigma_2 \in \mathbb{N}^+ \quad (3)$$

A q -edik pozíció meghatározása hasonlóan történik, mint a p -ediké.

Célfüggvény:

$$Z_1 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^P (f_{i,j} \cdot d_{p,q} \cdot L_{i,p} \cdot L_{j,q}) \rightarrow \min, \text{ ahol } p \neq q \quad (4)$$

Korlátozások:

1. Cella-pozíció hozzárendelés:

$$\sum_{p=1}^P L_{i,p} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, M \in \mathbb{Z}^+ \quad (5)$$

Minden cellához pontosan egy pozíciót kell rendelni.

2. Pozíció-cella hozzárendelés:

$$\sum_{i=1}^M L_{i,p} \leq 1 \quad p = 1, 2, \dots, P \in \mathbb{Z}^+ \quad (6)$$

Minden pozícióhoz legfeljebb egy cella rendelhető.

5.2 AGV ÚTVONALAK OPTIMALIZÁLÁSA

Cél: Minimalizálni az AGV-k szállítási idejét az útvonal hosszak és az átlagsebesség alapján, feltételezve, hogy a gyártócellák elrendezése már ismert.

Minden termék esetében az AGV az AGV-POOL-ból indul $(\theta_{x,y,0})$ és először a bejáráthoz megy (ENTRANCE, $\theta_{x,y,1}$), a munkadarab felrakódása után felkeresi a termék gyártásához szükséges $\beta_{x,y}$ db cellát $(\theta_{x,y,2} \dots \theta_{\beta_{x,y}+1})$, majd az $\theta_{\beta_{x,y}+2}$ pontként az EXIT-hez, érkezik, a késztermék lerakódása után végül $\theta_{\beta_{x,y}+3}$ állomásként az AGV-POOL-ba mozog. Adottnak vesszük, hogy minden termék elkészítéséhez minimum 3 műveletre van szükség, ezért $\beta_{x,y}$ értéke 3 és 8 közötti természetes szám lehet.

Célfüggvény:

$$Z_2 = \max_x \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{i=0}^{\beta_{x,y}+2} \frac{d_{x,y,i,i+1}}{v_{x,y,i,i+1}} \rightarrow \min \quad (7)$$

Korlátozások:

1. Egy terméket egy AGV szállít

$$\sum_{y=1}^{N_x} \sum_{x=1}^X R_{x,y,z_k} = 1 \quad k = 1, 2, \dots, K \in \mathbb{Z}^+ \quad (8)$$

2. Egy AGV egy terméket szállít

$$\sum_{k=1}^K R_{x,y,z_k} = 1 \quad x = 1, 2, \dots, X \in \mathbb{Z}^+, y = 1, 2, \dots, N_x \in \mathbb{Z}^+ \quad (9)$$

3. A termékek gyártása a gyártási lista szerinti sorrendben kezdődik meg:

$$\text{minden } i < j \text{ esetében igaz, hogy } t_{0,z_i} < t_{0,z_j} \quad i, j = 1, 2, \dots, K \in \mathbb{Z}^+ \quad (10)$$

5.3 AGV-SORREND OPTIMALIZÁLÁSA

Cél: Az AGV-k útvonalkiszolgálási sorrendjének optimalizálása a gyártási átfutási idő minimalizálása érdekében. Figyelembe kell venni: az AGV-k egymás utáni indulását (prioritás), a lehetséges várakozási időket, a biztonságos üzemeltetést (követési távolság), a gyártási műveletek kiszolgálásához szükséges szállítási időket.

Célfüggvény:

$$Z_3 = \sum_{x=1}^X t_x(\Delta s, \tau) \rightarrow \min \quad (11)$$

Korlátozások:

1. Prioritások kezelése:

Abban az esetben magas a prioritás, ha az AGV sok mindenkit akadályoz a továbbhaladásban. A következő lehetőségek fordulhatnak elő: nem alkalmazunk prioritást ($\tau = P0$), a magasabb prioritású AGV kap hamarabb útvonalat ($\tau = P+$), az alacsonyabb prioritású AGV kap hamarabb útvonalat ($\tau = P-$).

2. Torlódások, egymásra futások, ütközések elkerülése:

Minden egyes útvonalszakaszon két AGV közötti távolság legalább Δs mértékű kell legyen. Elágazáshoz érkezve a rögzített szabályrendszer szerinti sorrendben történhet a továbbhaladás (pl.: a korábban érkező AGV élvez elsőbbséget, míg a másik várakozik. Amennyiben egyszerre érkeznek oda, akkor az alacsonyabb sorszámú AGV haladhat tovább először, de a prioritásoknak megfelelően is történhet a sorrend meghatározása).

5.4 INTEGRÁLT OPTIMALIZÁLÁS

Cél: A teljes gyártási idő minimalizálása.

Bontsuk az AGV-k által bejárható úthálózatot szakaszokra a következőképpen: minden olyan pontnál, ahol az AGV elágazáshoz ér és/vagy irányt változtathat, továbbá a bejáratnál, a kijáratnál, az AGV tárolónál, a szerszámraktárnál és az alapanyag raktárnál képezzük egy-egy szakaszhatároló pontot ($\Phi_0, \Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_Q$), majd az így kapott pontok közötti útszakaszokat lássuk el sorszámmal ($w_1, w_2, \dots, w_C$). A 2. ábra egy példát mutat be a szakaszhatároló pontok

kijelölésére (fekete számok 0-tól 43-ig). Az útvonalszakaszok és a szakaszhatároló pontok száma a gyár adottsága, a gyár „térképének” ismeretében meghatározhatók.

A pozíciók száma és a maximálisan elhelyezhető cellák száma: $\sigma_1 \cdot \sigma_2$, tehát $p \leq \sigma_1 \cdot \sigma_2$, illetve $i \leq \sigma_1 \cdot \sigma_2$. A p -edik pozíció meghatározása: a p -edik pozíció a mátrix e_1 -edik sorában és e_2 -edik oszlopában van, azaz

$$p = (e_1 - 1) \cdot \sigma_2 + e_2 \quad \text{ahol } e_1 \in \mathbb{N}, e_2 \in \mathbb{N} \quad (12)$$

$$e_2 = p \pmod{\sigma_2} \quad \text{ahol } e_2 \in \mathbb{N}, p \in \mathbb{N}, \sigma_2 \in \mathbb{N}^+ \quad (13)$$

p és σ_2 maradékos osztásakor a maradék és

$$e_1 = \frac{p - e_2}{\sigma_2} + 1 \quad \text{ahol } e_1 \in \mathbb{N}, e_2 \in \mathbb{N}, p \in \mathbb{N}, \sigma_2 \in \mathbb{N}^+ \quad (14)$$

Célfüggvény:

$$t_{gyártás} = \max_x(t_x) \rightarrow \min \quad (15)$$

Egy termék gyártása során az AGV állapotjelzői a következők lehetnek:

- a bejáratnál rakodási művelet történik,
- az AGV útvonal engedélyre vár (pl. az i -edik cellából a j -edikbe szeretne menni),
- az AGV útvonalra vár (pl. kereszteződésnél),
- anyagmozgatási feladatot végez,
- egy cellában áll, a gyártási művelet zajlik,
- a kijáratnál rakodási művelet történik,
- AGV-POOL-ban technikai időt tölt.

Az előző felsorolásnak megfelelően a következő időket különböztethetjük meg, ha az x -edik AGV-t megfigyeljük a gyártás teljes időtartama alatt:

- Rakodási idők a bejáratnál:

$$t_x^{Rakfel} = \sum_{y=1}^{N_x} t_y^{Rakfel} \quad (16)$$

- Útvonal engedélyre való várakozások idejei:

$$t_x^{Eng} = \sum_{y=1}^{N_x} \sum_{i=0}^{\beta_{z_k}+2} t_{\Theta_{x,y,i},y}^{Eng} \quad (17)$$

$t_{\Theta_{x,y,i},y}^{Eng}$ jelöli az útvonal engedélyre való várakozások idejei az x -edik AGV y -adik rakománya esetében a $\Theta_{x,y,i}$ pontban.

- Útvonalra várakozási idők:

$$t_x^{Útv} = \sum_{y=1}^{N_x} \sum_{i=0}^{\beta_{x,y}+2} \sum_{q=1}^Q (t_{\Theta_{x,y,i},\Theta_{x,y,i+1},\Phi_{q,y}}^{Útv} \cdot W_{x,y,i,i+1,\Phi_q}) \quad (18)$$

$t_{\Theta_{x,y,i},\Theta_{x,y,i+1},P_q,y}^{Útv}$ jelöli az útvonalra várakozási idő az x -edik AGV és annak az y -edik rakománya esetében a $\Theta_{x,y,i}$ és a $\Theta_{x,y,i+1}$ pontok közötti szállítás során a Φ_q pontban.

- Anyagmozgatási idők:

$$t_x^{Száll} = \sum_{y=1}^{N_x} \sum_{i=0}^{\beta_{x,y}+2} \frac{d_{x,y,i,i+1}}{v_{x,y,i,i+1}} = \sum_{y=1}^{N_x} \sum_{i=0}^{\beta_{x,y}+2} \sum_{c=1}^C \frac{S_{w_c} \cdot T_{x,y,i,i+1,w_c}}{v_{x,y,i,i+1}} \quad (19)$$

- Gyártási idők (cellákban):

$$t_x^{Gyárt} = \sum_{y=1}^{N_x} \sum_{i=2}^{\beta_{x,y}+1} t_{i,y}^{Gyárt} \quad (20)$$

- Rakodási idők a kijáratnál:

$$t_x^{Rakle} = \sum_{y=1}^{N_x} t_y^{Rakle} \quad (21)$$

- Technikai idők az AGV-POOL-ban:

$$t_x^{Techn} = \sum_{y=1}^{N_x} t_y^{Techn} \quad (22)$$

Az x -edik AGV gyártásban töltött ideje:

$$t_x = t_x^{Rakfel} + t_x^{Eng} + t_x^{Útv} + t_x^{Száll} + t_x^{Gyárt} + t_x^{Rakle} + t_x^{Techn} \quad (23)$$

Célfüggvény:

$$t_{gyártás} = \max_x(t_x) \rightarrow \min \quad (24)$$

$$t_{gyártás} = \max_x \left(\sum_{y=1}^{N_x} t_y^{Rakfel} + \sum_{y=1}^{N_x} \sum_{i=0}^{\beta_{x,y}+2} t_{x,y,i,y}^{Eng} + \sum_{y=1}^{N_x} \sum_{i=0}^{\beta_{x,y}+2} \sum_{q=1}^Q (t_{\Theta_{x,y,i},\Theta_{x,y,i+1},\Phi_q,y}^{Útv} \cdot W_{x,y,i,i+1,\Phi_q}) + \right. \\ \left. + \sum_{y=1}^{N_x} \sum_{i=0}^{\beta_{x,y}+2} \sum_{c=1}^C \frac{S_{w_c} \cdot T_{x,y,i,i+1,w_c}}{v_{x,y,i,i+1}} + \sum_{y=1}^{N_x} \sum_{i=2}^{\beta_{x,y}+1} t_{i,y}^{Gyárt} + \sum_{y=1}^{N_x} t_y^{Rakle} + \sum_{y=1}^{N_x} t_y^{Techn} \right) \rightarrow \min \quad (25)$$

Korlátozások:

1. Cella-pozíció hozzárendelés:

$$\sum_{p=1}^P L_{i,p} \geq 1 \quad i = 1, 2, \dots, M \in \mathbb{Z}^+ \quad (26)$$

Egy cellához(művelethez) több pozíciót is lehet rendelni.

2. Pozíció-cella hozzárendelés:

$$\sum_{i=1}^M L_{i,p} \leq 1 \quad p = 1, 2, \dots, P \in \mathbb{Z}^+ \quad (27)$$

Minden pozícióhoz legfeljebb egy cella rendelhető

3. Egy terméket egy AGV szállít:

$$\sum_{y=1}^{N_x} \sum_{x=1}^X R_{x,y,z_k} = 1 \quad k = 1, 2, \dots, K \in \mathbb{Z}^+ \quad (28)$$

4. Egy AGV egy terméket szállít:

$$\sum_{k=1}^K R_{x,y,z_k} = 1 \quad x = 1, 2, \dots, X \in \mathbb{Z}^+, y = 1, 2, \dots, N_x \in \mathbb{Z}^+ \quad (29)$$

5. A termékek gyártása a gyártási lista szerinti sorrendben kezdődik meg:

$$\text{minden } i < j \text{ esetében igaz, hogy } t_{0,z_i} < t_{0,z_j} \quad i, j = 1, 2, \dots, K \in \mathbb{Z}^+ \quad (30)$$

6. Az AGV két cella közötti útvonalán bármelyik Φ_q pont csak egyszer szerepelhet:

$$\sum_{y=1}^{N_x} \sum_{x=1}^X W_{x,y,i,i+1,\Phi_q} = 1 \quad (31)$$

$$q = 1, 2, \dots, Q \in \mathbb{Z}^+, i = 0, 1, 2, \dots, \beta_{x,y} + 2 \in \mathbb{Z}^+$$

7. Az AGV két cella közötti útvonalában bármelyik w_c szakasz csak egyszer szerepelhet:

$$\sum_{y=1}^{N_x} \sum_{i=0}^{\beta_{x,y}+2} T_{x,y,i,i+1,w_c} = 1 \quad (32)$$

$$c = 1, 2, \dots, C \in \mathbb{Z}^+, i = 0, 1, 2, \dots, \beta_{x,y} + 2 \in \mathbb{Z}^+$$

8. Torlódások elkerülése (7.3 alfejezet szerint)

9. Egy gyártócellába legfeljebb egyszer lép be egy AGV egy termék gyártási folyamata során.

$$\theta_{x,y,i} \neq \theta_{x,y,j}, \text{ ha } i \neq j \quad (33)$$

$$i = 2, 3, \dots, \beta_{x,y} + 1 \in \mathbb{Z}^+, j = 2, 3, \dots, \beta_{x,y} + 1 \in \mathbb{Z}^+$$

Tetszőleges layout esetében meghatározható a fenti $t_{\text{gyártás}}$ időtartam. Azt az elrendezést érdemes választani, ahol a gyártási idő a legalacsonyabb.

A fentebb ismertetett modell segítségével meghatározhatók az anyagmozgatási munkára, szállítási időre, gyártási időre vonatkozó célfüggvények. A bemutatott eredmények alapján fogalmaztam meg második tézisémet.

2. TÉZIS

Az általam kidolgozott általános modell alapján megadtam annak matematikai leírását, amely alkalmas a mátrix gyártórendszer építőelemei közötti kapcsolati rendszer leírására és definiáltam a logisztikai paraméterrendszert a vizsgálatok számára. [S/18]

6. A MÁTRIXGYÁRTÁS FOLYAMATAINAK JAVÍTÁSÁRA SZOLGÁLÓ LEHETŐSÉGEK

Az anyagmozgatási útvonalak meghatározása után bemutatom, milyen módszerekkel lehet javítani a cellák elrendezését, a gyártási lista elemeinek sorrendjét és az AGV-útvonalválasztását annak érdekében, hogy a teljes gyártási idő csökkenjen.

6.1 AZ ANYAGMOZGATÁSI ÚTVONALAK MEGHATÁROZÁSA

A továbbiakban a mátrixgyártás során a munkaállomások közötti anyagmozgatással, az azzal kapcsolatban fellépő útvonaltervezési problémákkal foglalkozom. Egy olyan útvonal meghatározási algoritmust kerestem, mely alkalmazásával hatékonyan végezhető el a munkadarabok mozgatása, továbbá meghatároztam, hogy milyen mennyiségű AGV-re van szükség ezen anyagmozgatási feladatok ellátásához.

Mindegyik, a termelési folyamatban résztvevő AGV kap egy egyedi sorszámot, 1-től felfelé történő számozással. Egy-egy AGV, ha a pozícióját meg szeretné változtatni (pl. A cellából C-be menne), útvonalengedélyt kell kérjen. Ezzel megakadályozható, hogy egymással szemben haladó járművek legyenek két szomszédos csomópont között vagy nem várt torlódások alakuljanak ki. Útvonal kéréskor csak akkor kaphat útvonalat az AGV, ha a célpont fogadni tudja őt (pl. a gyártócella üres vagy a bemeneti puffere szabad). Az aktuális helyzet és a célpont közötti lehetséges útvonalak közül a lehető legrövidebb anyagmozgatási idővel rendelkező olyat választom, amely vonalán más AGV még nem kapott ellentétes irányú haladásra engedélyt. Két pont között a legrövidebb 32 útvonalat vizsgálom meg. Ha több egyenlő hosszúságú megfelelő útvonal is lehetséges, akkor választanom kell közülük. Mivel azt szeretném elérni, hogy az egyforma hosszúságú útvonalak egyenletes terhelés alá essenek, azért a Round-robin (RR) algoritmust használom, ezt a következő szerint teszem: a gyártás kezdete óta eltelt időt maradékosan osztom a jó útvonalak számával, majd a (maradék-1)-nek megfelelő sorszámút választom ki (mivel az útvonalak számozása 0-ról indul). Pl. ha a gyártás kezdete óta eltelt idő 298 és 6 jó útvonal is adódik, akkor az ötödiket választom, mivel $298 \bmod 6 = 4$ ($298 = 49 \cdot 6 + 4$) és $4 + 1 = 5$. Így megoldható, hogy az algoritmus nem mindig az első jó megoldást válassza és így ne egyenletlenül terhelje a csomópontokat. Ugyanakkor – mivel nem használtam véletlen szám generátort – tetszőleges számú (azonos paraméterekkel rendelkező gyártási feladat esetén) futtatás esetén mindig pontosan ugyanazt az eredményt kapom. A kiválasztott útvonal ezután lefoglalásra kerül (piros nyílak, 2. ábra), ezen az AGV áthaladásáig részeiben sem engedek szembe irányú forgalmat. Két AGV, megfelelő védőtávolság betartásával, közlekedhet egymás mögött azonos irányba haladva. Ha egy csomóponthoz két, egymás útvonalát keresztező AGV is érkezik, akkor az kap áthaladási elsőbbséget, amelyik hamarabb érkezik oda, ha egyszerre érnek oda, akkor a kisebb sorszámú AGV haladhat először tovább.

Mindezekkel a korlátozásokkal elérhető, hogy ne legyenek felesleges várakozások, ne alakuljanak ki egy-egy cella bemeneti puffere előtt torlódások, melyek akadályoznák a forgalmat, a lehető legrövidebb legyen az anyagmozgatási út.

Az AGV-kel kapcsolatos sztochasztikus hatások (pl. blokkolás, meghibásodás, kezelési késés, kommunikációs hiba) a szimulációs szoftverbe beépítésre kerültek. A nem várt hibák, késések időpontját és időtartamát tartalmazó fájl legenerálható a futtatás előtt. Az elkészült fájlt az előre megadott paraméterek figyelembevételével és véletlenszerűen kerül generálásra. Mivel a mérési eredmények reprodukálhatóak és összehasonlíthatóak kell legyenek, a fájl a futtatás előtt rendelkezésre kell álljon. Természetesen tetszőleges számú fájl generálható, aminek akkor van nagy jelentősége, ha a váratlanul fellépő problémák hatását szeretnénk átfogóbban vizsgálni.

6.2 A CELLÁK ELRENDEZÉSÉNEK OPTIMALIZÁLÁSI LEHETŐSÉGEI

Mintagyáramban 8 különféle művelet történik a gyártás során, így minden típusú cellából kell legyen 1-1-darab, tehát a 12 cellából 4 határozható meg szabadon.

Ez a 4 cella lehet: 4 egyforma (x, x, x, x); 3 egyforma, 1 különböző (x, x, x, y); 2-2 egyforma (x, x, y, y); 2 egyforma, 1-1 különböző (x, x, y, z); 4 különböző (x, y, z, w). Mindösszesen 6 411 968 640 eset írható fel.

Meghatároztam, hogy a teljes gyártási folyamat során mennyi időt igényel egy-egy típusú művelet elvégzése (előfordulás x idő [s]):

1. táblázat: A műveletek összes időigénye (saját szerkesztés)

a		b		c	
előfordulás (db)	idő (s)	előfordulás (db)	idő (s)	előfordulás (db)	idő (s)
2135	70	2425	60	1194	80
149450 s		145500 s		95520 s	

d		e		f	
előfordulás (db)	idő (s)	előfordulás (db)	idő (s)	előfordulás (db)	idő (s)
2115	75	2842	50	744	90
158625 s		142100 s		66960 s	

g		h	
előfordulás (db)	idő (s)	előfordulás (db)	idő (s)
2541	55	3000	45
139755 s		135000 s	

A 1. táblázat adatai szerint megállapítható, hogy a 4 legnagyobb időráfordítás az a,b,d,e műveletek esetében adódik. Feltételeztem, hogy az optimális elrendezésben a következő műveletekkel rendelkező cellák fognak szerepelni: a, a, b, b, c, d, d, e, e, f, g, h. Lefuttattam az összes lehetséges elrendezést (36 db maximális AGV számmal, AGV prioritáció nélkül, be- és kimeneti várakozóhellyel a gyártócellákban).

$$\begin{array}{cccc} a & b & c & d \\ \text{Az abcdefghxyzw layout értelmezése: } e & f & g & h. \\ x & y & z & w \end{array}$$

Az összes lehetséges elrendezést tekintve a legkedvezőbb és a legrosszabb idők a következő elrendezések esetében adódtak:

2. táblázat: A legrövidebb és a leghosszabb gyártási idővel rendelkező elrendezések (saját szerkesztés)

elrendezés	gyártási idő (min)	elrendezés	gyártási idő (min)
bbdcfdeeagha	2424,65	bgchhffaeachd	3002,39
aabdefebdghc	2425,09	afedhffbfhgc	3002,49
abbcefaedddgh	2425,32	eghffbfhfdac	3002,99
cebedaghadfb	2425,42	hhdcgeffhfhba	3003,33
bdbeaedfacgh	2425,56	behfgfhcdhfa	3003,44
aaacefghddbb	2425,87	hffbdcefheagf	3003,72
bgabaechedfcd	2425,89	dcbgfheccca	3003,79
eghbeacbfdd	2425,92	ffchhdaebhg	3003,87
afghbebedcda	2425,97	aghhdgfbeggc	3003,87
cbeafghadbd	2425,98	eghbgfhfchda	3004,10
cfbdeeghdaab	2426,09	bfgcfefhhafl	3004,42
dbahfcedgaeb	2426,09	fhfdebfcfafg	3005,08
bbafeghaeddc	2426,20	bhhgffhadecf	3005,12
baahefidedcgb	2426,24	edgffahfbhfc	3005,63
efghdebbcaad	2426,26	dhebahfghchh	3006,21
bdcebfghaeaa	2426,34	aefdhhhcbffg	3006,34
daadbefcbegh	2426,39	hchaheffidbg	3006,45
dadbafghebbe	2426,45	ahfdhgfbcegf	3007,04
efedbaghdabc	2426,46	bfgchhehafdf	3007,10
abebdegahacd	2426,54	afcgghfhedbh	3011,69

Az 1000 legrövidebb idejű gyártás mindegyike a feltételezésem szerinti a, a, b, b, c, d, d, e, e, f, g, h cellákat tartalmazta.

Ha a mintagyár az a, a, b, b, c, d, d, e, e, f, g, h cellákat tartalmazza, akkor összesen $\frac{12!}{2! \cdot 2! \cdot 2! \cdot 2!} = 29\,937\,600$ különféle elrendezés képezhető az elemek ismétléses permutációjával. Ezen elrendezéseket vizsgálva a legjobb gyártási idő 2424,65 perc, míg a legrosszabb 2470,33 perc volt. Az eltérés 45,68 perc, ami a leghosszabb gyártási idő 1,85%-a.

Két prímek módszere

A számítási kapacitás mindig véges és különösen nagyobb üzem esetén hamar bekövetkezik az a szituáció, hogy minden lehetséges elrendezést fizikailag képtelenség lepróbálni. Ezért nagyon fontos, hogy annyira redukáljuk le a számítási igényt, amennyire az csak lehetséges azáltal, hogy a lehető legtöbb elrendezést kihagyjuk. Ettől a megoldástól azt várom, hogy ugyan nem találja meg a legjobb elrendezést, de talál egy elfogadhatóan jót.

Az elfogadhatóan jó megoldás kereséséhez választok egy nagyobb P_H és egy kisebb P_L prímet és ezzel redukálom a variációs listát egy jobban kezelhető méretűre. A P_H használatával eldobom mindazon elrendezéseket a vizsgálandó listából, aminek sorszáma (i) teljesül, hogy $i \bmod P_H \neq 0$. Ez a megoldás a példában szereplő 6 411 968 640 elemszámot 2 138 036 -ra redukálja, amennyiben $P_H = 2999$. A szükséges számítási igény további csökkentéséhez ugyanezen elvek alapján a kapott listát $P_L = 13$ értékkel tovább szűkítem. Az így kapott 164 465 elemszám már lefuttatható az eredetihez képest $\frac{1}{40000}$ időigénnyel. Mivel az eredeti szisztematikusan generált, tehát rendezett volt, így a prímekkel való szelektálás várhatóan egy az eredetit jól reprezentáló részhalmazt generál, amelyen az elfogadhatóan jó megoldás megtalálható.

A módszer empirikus igazolásához futtatott szimuláció azt mutatta, hogy a legjobb (legkisebb időigényű gyártáshoz tartozó) elrendezés mindössze 8.09 perccel (0.33%) jobb, mint amit a fenti redukált algoritmusokból képzett szűkített listában találtam. Eközben a szükséges futtatási időigény mindössze 0.0025%-a az eredeti redukció előtti állapothoz képest. A két prímet úgy kell megválasztani, hogy a szükséges redukció olyan mértékű legyen, ami megfelel a rendelkezésre álló erőforrásoknak.

A redukció két lépése és okai: tárolókapacitásnak megfelelő redukció (diszk, adatbázis), (hálózatot keresztül elérhető) számítási kapacitásnak megfelelő redukció (CPU, memória).

A szűkített elrendezés lista tíz legjobb időeredménnyel rendelkező elrendezését a következő táblázatban láthatjuk.

Az előzőekben részletezett módon a redukciót elvégeztem a $P_H = 3061$ és $P_L = 13$ prímelek segítségével is, 2431,14 perc adódott a legrövidebb gyártási időnek.

Véletlenszámos módszer

A két prímszám használata helyett a variációs lista redukálható véletlenszámok segítségével is, ekkor szükségünk lesz a fenti példának megfelelő méretű redukció esetében – 164 465 darab random számra 1 és 6 411 968 640 között. Felosztottam az intervallumot 164 465 részre úgy, hogy az utolsó kivételével mindegyik $2999 \cdot 13$ hosszúságú legyen. Minden intervallum esetében generáltam egy véletlen számot, majd az ennek a sorszámnak megfelelő layout-ot beemeltem a vizsgálandó elrendezések közé. 20 esetben végeztem el ezt a redukciót. Az így kapott eredményeket összehasonlítottam a két prímes módszerrel kapott eredményekkel (3. táblázat). A két prímes módszernél, amikor $P_H = 2999$ volt, a random számos módszer 20-ból 13 esetben adott kisebb gyártási időt eredményül, míg $P_H = 3061$ esetén 20-ból csak 4 esetben bizonyult jobbnak a véletlenszámos megoldás.

3. táblázat: A két prímes és a véletlenszámos redukcióval kapott eredmények (saját szerkesztés)

módszer	elrendezés	gyártási idő (perc)	módszer	elrendezés	gyártási idő (perc)
prím1	acebdaghfdb	2432,74	prím2	fdbaeghaced	2431,14
random1	eabdafghcedb	2429,65	random1	eabdafghcedb	2429,65
random2	bghaebefadcd	2432,20	random2	bghaebefadcd	2432,20
random3	ghceabfbaded	2432,64	random3	ghceabfbaded	2432,64
random4	bcfeadgheadb	2432,38	random4	bcfeadgheadb	2432,38
random5	aefcdaghebbd	2432,51	random5	aefcdaghebbd	2432,51
random6	cdadbbfheaeg	2432,99	random6	cdadbbfheaeg	2432,99
random7	baacdbghefde	2433,78	random7	baacdbghefde	2433,78
random8	eafdcghabebd	2430,12	random8	eafdcghabebd	2430,12
random9	ehdfageabcbd	2433,31	random9	ehdfageabcbd	2433,31
random10	bdbfecedghaa	2432,78	random10	bdbfecedghaa	2432,78
random11	afeacdehbbgd	2434,50	random11	afeacdehbbgd	2434,50
random12	ghceabfbaded	2432,64	random12	ghceabfbaded	2432,64
random13	bcfeadgheadb	2432,38	random13	bcfeadgheadb	2432,38
random14	aefcdaghebbd	2432,51	random14	aefcdaghebbd	2432,51
random15	cdadbbfheaeg	2432,98	random15	cdadbbfheaeg	2432,98
random16	baacdbghefde	2433,78	random16	baacdbghefde	2433,78
random17	cddebegaafbh	2431,47	random17	cddebegaafbh	2431,47
random18	acfadeghbbde	2431,46	random18	acfadeghbbde	2431,46
random19	decfbaghedba	2428,78	random19	decfbaghedba	2428,78
random20	dagabefcbedh	2431,13	random20	dagabefcbedh	2431,13

Genetikus algoritmus

Az optimális elrendezés keresésekor genetikus algoritmust használtam.

Az egyedeket – jelen esetben az elrendezéseket – alkotó gének a gyártási műveletek (a, b, c, d, e, f, g, h). Egy egyed 12 génből épül fel, mivel 3 sorban 4 oszlopban helyezkednek el a cellák a mintagyárban. Az egyed minden típusú génből kell tartalmazzon minimum egyet, mivel minden gyártási művelet legalább egy cellában meg kell jelenjen.

Kezdőpopulációnak 1000 egyedet (elrendezést) választottam véletlenszerűen az összes (6 411 968 640) layout lehetőség közül. A fitness függvény értéke a gyártási idő percekben meghatározva az adott layout esetében. Mivel az alacsonyabb gyártási idő a kedvezőbb, ezért az alacsonyabb fitness érték lesz a preferált. A szülők kiválasztásakor rangsoroló szelekciót alkalmaztam a következő módon: a legjobb 100 fitness értékű egyed 10-es súlyt kap, a következő 100 9-es súlyt stb. Minél nagyobb egy egyed esetében a hozzá rendelt súly, annál nagyobb lesz az esélye annak, hogy szülőként kiválasztásra kerül. Keresztezésként egyenletes keresztezés használtam (minden gén esetén véletlenszerű, hogy mely utód öröklí). Pl.:

Szülők:

a	b	c	d	e	f	g	h	a	a	a	a
b	c	d	e	f	g	h	a	a	a	a	d

4. ábra: Egy szülőpár génjei (saját szerkesztés)

Utódok:

a	c	d	d	e	f	g	a	a	a	a	a
b	b	c	e	f	g	h	h	a	a	a	d

5. ábra: Két utód egyed génjei (saját szerkesztés)

Az első utód nem életképes, mert nincs benne b és h művelet, a második utód életképes, mind a 8 gyártási műveletből tartalmaz legalább egyet. Mivel elég magas az életképtelen utódok száma, ezért, ha a kezdeti populáció méretéhez hasonló nagyságú új egyed mennyiséget szeretnénk kapni, nem 500 szülőpárt kell kiválasztani a keresztezéshez, hanem négyszer ennyit, 2000 párt. Ezt a módszert alkalmazva a kezdeti generációk esetében 850, míg az algoritmus futtatásának végén 1600 megfelelő új utód keletkezik.

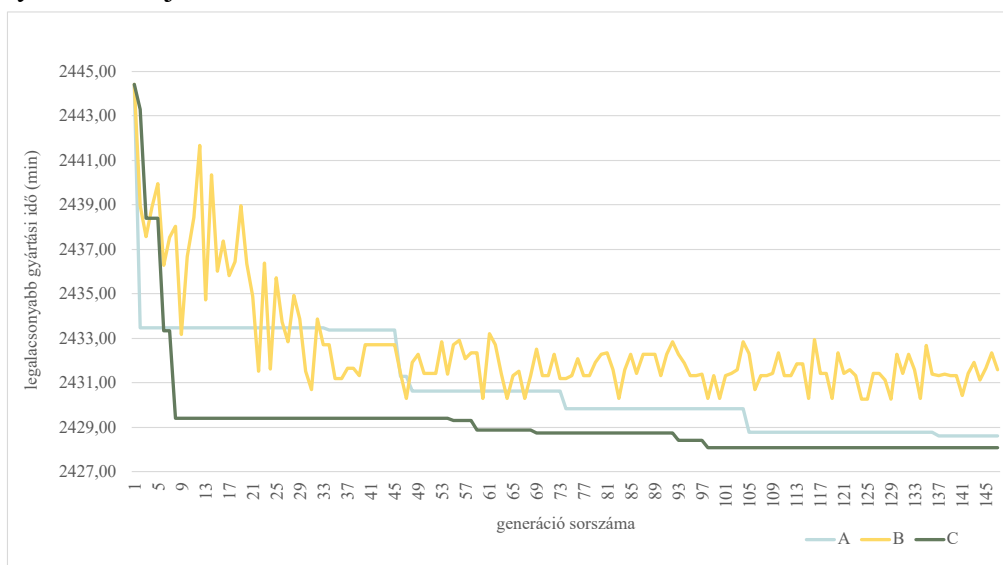
Mutációt átlagosan minden negyedik utód születésekor alkalmaztam a következőképpen: egy véletlenszerű sorszámú gént (1-12) egy véletlenszerű génre (a, ..., h) cseréljük le. Ha az utód így életképes, akkor megtartjuk.

Az új generáció egyedeinek kiválasztását három különböző módon tettem meg:

- A a szülőket és az új egyedeket fitness értékük szerint sorba rendeztem, majd az 1000 legalacsonyabb fitness értékű egyedemet választottam ki,

- B* az új egyedeket fitness értékük szerint sorba rendeztem, majd az 1000 legalacsonyabb fitness értékű egyedet választottam ki,
- C* a szülőket és az új egyedeket fitness értékük szerint sorba rendeztem, majd az 1000 legalacsonyabb fitness értékű egyedet választottam ki úgy, hogy a szülők közül maximum 100 szerepeljen a szelekcióban.

Hogy összehasonlítható legyen az eredmény a két prímes és a random kiválasztásos módszerrel, addig futtattam az algoritmust, míg kb. 164 465 egyedet meg nem vizsgáltam. Az *A* esetben a kezdő (0.) generáció után 146 továbbit vizsgáltam meg (164 380 egyed). A *B* és *C* eset szerinti módszerrel is ugyanennyi generációig futtattam az algoritmust. Mindhárom esetben minden generációnál kiválasztásra került a legalacsonyabb fitness értékű egyed, az eredményeket mutatja a következő ábra.



6. ábra: A genetikus algoritmusok futtatása során kapott legalacsonyabb gyártási idők alakulása generációnként (saját szerkesztés)

6.3 A GYÁRTÁSI LISTA JAVÍTÁSÁRA SZOLGÁLÓ LEHETŐSÉGEK

A gyártási lista egy FIFO puffer, amely előírja, hogy az egyes gyártmányok milyen sorrendben kerülnek gyártásba és milyen műveletekből állnak. Az alkalmazott példában 3000 elemből álló listával készültek a mérések és a szimuláció. Kiindulási állapotként a 0 pontban ismertetett módon elkészítettem a gyártási listát, majd annak sorait ábécé szerint sorba rendeztük. Így két listával rendelkezünk, egy véletlenszerűvel és egy rendezettel. Mindkét esetben lefuttattam a szimulációt a bbdcfdeeagha layout esetében (36 db maximális AGV számmal, be- és kimeneti várakozóhellyel a gyártócellákban). A következő időeredményeket kaptuk:

- kezdeti véletlenszerű sorrendű gyártási lista: 2436,74 perc,
- rendezett gyártási lista: 3399,07 perc.

Első átsorrendezési kísérlet

A 6.2 pontban vizsgáltam az egyes műveletek összes időigényét. Ez az “f” művelet esetében a legkevesebb. Egy potenciális lehetőség adódik a lista kettéválasztására: első körben

elkészülnek azok a gyártmányok, amelyek az “f” műveletet tartalmazzák, amikor ez végéhez ért, akkor az addig “f” műveletet végző cellá(k) átáll(nak) más műveletre és elkészül a többi termék. Még nulla átállási idővel számolva is több időt vett igénybe a két allista elkészülte, mint az eredeti véletlen sorrendű gyártási lista.

Gyártási lista elemzése

A sikertelen első átsorrendezési kísérlet tapasztalatai miatt a terméklistát alaposabb vizsgálatnak vettem alá. Ezen L_R lista adattartalma két tényezőből áll össze: sorrendi információ és összeszerelési szekvencia információ.

A továbbhaladáshoz szükséges, hogy az L_R lista információtartalma meghatározható legyen. Adódik a Huffman-kódolás [I/28] használata, amelyben az információtartalom arányos a kódolás után kapott adatmennyiséggel. Az elméleti háttér tényleges megvalósításához az iparban ismert DEFLATE [I/30] algoritmust használtam a GNU ‘gzip’ [I/31] kiegészítőjén keresztül. Ez LZ77 [I/32] tömörítéssel előállítja azt a kimeneti M_L fájlt, amelynek méretét megfeleltettem az L_R lista tényleges információtartalmának. Nagyobb M_L fájl méret egyúttal kisebb tömöríthetőséget és több hordozott információt jelent.

4. táblázat: A tömörített és a tömörítés nélküli fájlok mérete (saját szerkesztés)

	ábécé szerinti sorrendbe rendezett gyártási lista mérete (byte)	első átsorrendezési kísérlet utáni gyártási lista mérete (byte)	kezdeti véletlen sorrendű gyártási lista mérete (byte)
tömörítés nélkül	19996	19996	19996
tömörítve	314	2743	3197

A GNU ‘shuf’ [I/33] alkalmazás segítségével készítettem további 100db véletlenszerűen sorrendezett listát az eredeti L_R -ből. A mérések szerint a legrövidebb gyártási idő 2423,99 perc, míg a leghosszabb 2446,69 perc. Az eltérés 22,7 perc, ami 0,93% eltérés a leggyorsabb időhöz viszonyítva, így nem elhanyagolható. Az M_L lista mérete 3165 és 3259 byte között alakult.

Ismerve azt a tényt, hogy a terméklista véletlenszerű elrendezése és egy így kialakuló mérés elvégzése nem időigényes feladat, amennyiben a többi paraméter már rögzített, hasznos lehet több száz vagy akár ezres tételben is keresni a leggyorsabb gyártással rendelkező megoldást.

6.4 ÚTVONAL JAVÍTÁSÁRA SZOLGÁLÓ LEHETŐSÉGEK

Irányított útallokáció

Az irányított útallokáció során minden AGV a következő műveleti pont előtt lefoglalja a célponthoz vezető utat és csak a visszaigazolt foglalás birtokában indítja az adott szállítási folyamatot. A működése ebből a szempontból analóg az elektronikus buszrendszerek sínfoglalási mechanizmusával. Az útvonalak ilyen allokációja felszámolta a nagyon nehezen, legtöbbször csak tolatási, illetve egyéb jelentős, több AGV-t érintő manőverekkel feloldható közlekedési kaosz helyzeteket.

A lefoglalt útvonal irányba állítja a csomópontok közötti amúgy irányítatlan szakaszokat, ami egészen addig megmarad ilyen állapotban, amíg a szállítás rajta keresztül ténylegesen megtörténik.

Az irányított allokáció nyilvántartásához bal (-) / semleges (nem foglalt) / jobb (+), illetve fel (-) / semleges (nem foglalt) / le (+) irányok értelmezhetőek az útvonal szakaszok elhelyezkedésétől függően. A munkahelyek be- és kimenete egyirányú marad, itt az AGV soha nem tolat. Az AGV megérkezésével az allokáció felszabadítható.

Az útvonalak csomópontban történő kereszteződését az allokáló megengedi, ilyenkor az ütközést az AGV távolságtartó védelme meggátolja.

Többszörös útvonalfoglalás

Jelentős optimalizációra ad lehetőséget, ha az útallokációt irányító központ képes több, egymást részlegesen vagy teljesen fedő útvonal egyidejű engedélyezésére. Ezt a csomópontok közötti szakaszok foglaltsági (allokációs) számlálója teszi lehetővé. 0 esetén a szakasz semleges (azaz nem irányított, szabadon foglalható), negatív egész érték a fel illetve a bal irányt, pozitív egész a jobb és le irányt kódolja. Egy allokáció felszabadítása a nulla felé tolja a foglaltsági számlálót.

Szakaszonként visszaadott útvonal

Az AGV-k számának növelésével a szimulációk eredménye azt mutatta, hogy egyre növekszik az útvonalra történő várakozással töltött idő. Ennek lecsökkentésére lehetőséget ad, ha az AGV haladása során minden bejárt szakasz elhagyásakor visszaadja azt az allokátornak. Amennyiben az allokációs számláló -1 vagy +1 volt, úgy ezzel a visszaadáskor megnyílik a szakasz foglaltsága, potenciálisan lehetővé téve egy másik AGV elindulását.

Már a védőtávolságon belüli csomópont esetén is vissza lehet adni az allokációt a szakaszra. Ez a legtöbb elrendezés esetében 0,3-0,4% időcsökkenést jelentett, de vannak olyan elrendezések is, ahol 0,2%-os idő növekedés jelentkezett.

A gyártócella kibővítése input és/vagy output várakozóhellyel

A gyártócella állapotát a szimulátor a következő kategóriákba sorolja: (p) munkadarab művelet (gyártás történik), (io) munkadarab mozgatása (a gyártócellába az útvonal csomóponttól befelé és csomópontig kifelé), (w) várakozás a munkadarab mozgatására (útvonal allokáció sikertelensége vagy a fogadó gyártócella foglaltsága miatt), (o) üresjárat. Ezen időadatok elemzése során fel lehet tární, hogy hol vannak dugulások a rendszerben.

Felmerült, hogy érdemes lehet a cellákban várakozóhelyeket kialakítani, ezzel is csökkentve a várakozási időket és a torlódásokat.

Minden más paraméter változatlansága mellett futtattam méréseket várakozóhely nélküli (00), csak bemeneti várakozóhellyel (10), csak kimeneti várakozóhellyel (01), mindkét várakozóhellyel rendelkező (11) konfigurációk esetében.

Mindegyik mérést a *bbdcfdeeagha* layout esetében végeztem és 10 véletlenszerű sorrenddel generált gyártási listát használtam.

Az eredmények azt mutatják, hogy jelentős időcsökkenés érhető el a bemeneti várakozóhely alkalmazásával, mely tovább csökkenthető a kimeneti várakozóhely alkalmazásával. A további méréseket két puffer hely alkalmazásával végeztem el.

AGV priorizáció

Az alapvető útvonalallokációs algoritmus szerint az AGV sorszáma szerint növekvő sorrendben vizsgálom az útvonalkéréseket.

A gyártócella műveleti statisztikáiban megfigyeltem, hogy jelentős idő megy el azzal, hogy a már elkészült munkadarab nem képes tovább haladni, így feltartja a mögötte érkező munkadarab gyártását és ezzel a gyártócella kihasználtságát csökkenti. Felmerülhet az AGV priorizálásának ötlete attól függően, hogy a munkadarab mekkora sort tart fel. Legnagyobb prioritás a kettős pufferekkel ellátott gyártócella esetén akkor jelentkezik, ha mind a három helyen áll egy AGV és már a negyedik AGV is úton van a cella felé. Más megfogalmazásban: abban az esetben magas a prioritás, ha az AGV sok mindenkit akadályoz a továbbhaladásban.

Prioritás értékének számítása: alapesetben 0 és maximum 3 lehet a következő tagokból összesítve: +1-ha érkezik AGV (ez csak akkor, ha a kimeneti hely üres), +1-ha áll AGV a bemeneti pufferben, +1-ha áll AGV a gyártóhelyen, de már véget ért a gyártás, +1-ha áll AGV a kimeneti helyen és nem kap útvonalat.

Háromféle mérést végeztem a prioritásokkal kapcsolatban, majd ezek eredményeit hasonlítottam össze: nincs prioritás (P0), a magasabb prioritású AGV kap hamarabb útvonalat (P+), az alacsonyabb prioritású AGV kap hamarabb útvonalat (P-).

A bbdcfdeeagha cellaelrendezés és száz véletlenszerű sorrenddel generált gyártási lista esetében vizsgáltam a különböző prioritások függvényében a gyártási idő alakulását 27db AGV alkalmazásával. Meglepő módon a priorizálás alkalmazása csak kis (0.1% .. 0.5%) mértékben javítja az összesített teljesítményt, viszont jelentősen lassítja a teljes szimuláció számítási idejét.

AGV szám

5. táblázat: A gyártási idők az AGV szám függvényében (saját szerkesztés)

AGV-k száma	gyártási idő (min)	AGV-k száma	gyártási idő (min)
12	3412,61	27	2431,01
13	3187,07	28	2435,64
14	3004,90	29	2429,30
15	2851,59	30	2431,08
16	2725,76	31	2432,99
17	2624,06	32	2432,25
18	2547,61	33	2434,32
19	2493,28	34	2438,08
20	2463,61	35	2430,71
21	2438,98	36	2428,51
22	2433,79	37	2435,55
23	2435,21	38	2434,80
24	2434,34	39	2432,58
25	2431,66	40	2439,21
26	2434,32		

Az AGV-k száma minimálisan 12, ez biztosítja, hogy minden gyártócellához legyen legalább egy szállítóegység. Az elrendezéstől függően jellemzően az AGV számának növelése fokozza a teljesítményt, majd ez tetőzik 21-23 db AGV között. Ennél magasabb AGV szám

esetén már csak kisebb ingadozások figyelhetők meg a gyártási idő vonatkozásában, ugyanakkor megnövekednek a várakozási idők. A magasabb AGV szám miatt várhatóan az üzemeltetési költségek is emelkednek. Az bbdcfdeea cellaelrendezés és egy véletlenszerű sorrenddel generált gyártási lista esetében mutatja a mérési eredményeket a 5. táblázat.

A fentiekben bemutatott módszerek alkalmazásával lehetővé válik a logisztikai erőforrások igénybevétele több szempont szerinti optimalizálása, mely kutatási eredmények alapján került meghatározásra a disszertáció harmadik tézise.

3. TÉZIS

Holisztikus megközelítést alkalmazva, meghatároztam a rendszert leíró paraméterrendszert és kidolgoztam egy javító eljárást és megadtam optimalizáló eljárást is, amely alkalmas mátrixgyártás esetén a gyártócella elrendezés, a gyártási sorrend és az AGV útvonalválasztás egyidejű optimalizálására. [S/19]

6.5 ÖSSZEHAISONLÍTÁS A LINEÁRIS GYÁRTÓSORRAL

A 2. ábra szerinti cellánkénti gyártásidőket az abcdefgh gyártási sorrendre alkalmazva 525s adódik. Egy műveletre átlagosan 65,6s. Ha a különféle időigényű folyamatokat normalizálnom kell, akkor legjobb esetben 66s-ot kaphatok. Az AGV-POOL, ENTRANCE, EXIT idők mindegyike legyen 10s. A lineáris gyártósor két különböző „állomása” közötti idő legyen 4s, a bejárat- 1. állomás és a 8.állomás-kijárat közötti anyagmozgatási idő pedig 10s. A mintagyár térképét nem rendezem át, a bejárat, kijárat, AGV tároló elhelyezkedését nem módosítom, a harmadik sor minden cellájának az „i” folyamatot írom elő, így ezek a cellák nem fognak részt venni a gyártásban, az első sor celláiban rendre az a, b, c, d, a második sorban az e, f, g, h műveletek zajlanak. Mindezekkel előidézem, hogy a mátrix és a hagyományos elvű gyártás során is 8-8 munkaállomás legyen, de biztosak lehetünk abban, hogy a ki-bejáratok módosításával és a cella-művelet hozzárendelések megváltoztatásával kedvezőbb idő adatokat kaphatnánk a mátrixgyártás esetében.

A mátrixgyártás esetében a szoftver futtatása során 2958,0 perces összidőt kapunk. A 3000 termék gyártásához a lineáris gyártósor esetében a következő a számítás menete:

- az első termék legyártásának ideje $10s + 66s \cdot 8 + 4s \cdot 7 + 10s$, azaz 576s.
- ezután minden 66s eltelté után elkészül egy-egy újabb termék
- a gyártáshoz szükséges összes idő: $576s + 66s \cdot 2999 = 198510s$, azaz 3308,5 perc.

A mátrix elvű gyártás időszükséglete 10,6%-kal kevesebb még a rossz elrendezés esetében is.

Az előző fejezetben bemutattam a szimulációs szoftver futtatása során kapott különféle eredményeket, majd összehasonlítottam a lineáris és a mátrix rendszerű gyártás során fellépő időszükségletet. Ezen eredmények alapján fogalmaztam meg negyedik tézisem.

4. TÉZIS

A szimulációs módszer felhasználásával elvégeztem a lineáris és a mátrix elrendezésű gyártórendszerek összehasonlító vizsgálatát és megállapítottam, hogy mátrixgyártás alkalmazásával a gyártási idő csökkenthető. [S/2]

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Az Ipar 4.0 technológiát alkalmazó gyártóvállalatoknál a valós idejű információk folyamatosan biztosítják a megrendelések és az erőforrások aktuális állapotát. A klasszikus gyártósor-alapú összeszerelés nem alkalmas a jövőbeli diverzifikált termelési követelmények kielégítésére a magas gazdasági hatékonyság fenntartása mellett. A cél a termelési folyamat zökkenőmentességének fenntartása az egyenlő ciklusidők kiküszöbölése mellett. A mátrixgyártás megfelelően rugalmas megoldást kínál. Dolgozatomban egy modellgyár példáján keresztül mutattam be az optimális logisztikai rendszer tervezésének elemeit.

Egy komplex termelési rendszer létrehozása számos tényező és paraméter figyelembevételét igényli. Az optimális megoldás keresése során figyelembe kell vennünk a gyár elrendezési határait, pénzügyi megfontolásokat, a hardver erőforrásokat és a számítási teljesítmény idő korlátait. A 7. fejezetben olyan módszereket és megoldásokat mutattam be, amelyek segíthetnek az anyagmozgatás, a gyártandó termékek listája és a cellaterhelés optimalizálásában. Egyes módszerek csak kismértékű javulást eredményeznek, míg mások jelentősen növelhetik a termelékenységet. A legjobb megoldás helyett az „elég jó” megoldás keresése hatalmas erőforrásokat takaríthat meg. Az elrendezés, a gyártási sorrend és az AGV-útvonalválasztás egyidejű optimalizálásával holisztikus megoldást adhatok. Az ismertetett módszereket egyedi szimulációs szoftver segítségével validáltam.

A jövőbeni fejlesztés fókuszterületei lehetnek a következők: a figyelembe vett sztochasztikus hatások körének kiterjesztése, a korlátozások számának csökkentése, algoritmikus lehetőségek vizsgálata, beépítése a gyorsabb futás érdekében, a napon belüli átütemezésben és átszerszámolásban rejlő lehetőségek kiaknázása, a modell kiterjesztése a gyártási lista méretének és a gyártócellák számának növelésével.

8. SUMMARY

At manufacturing companies using Industry 4.0 technology real-time information continuously shows the current status of orders and resources. Classic linear assembly line-based production is not suitable for meeting future diversified production requirements while maintaining high economic efficiency. The goal is to maintain a trouble-free production process while eliminating equal cycle times. Matrix production offers a adequately flexible solution. In my thesis, I presented the elements of optimal logistics system design using the example of a model factory.

Creating a complex production system requires consideration of numerous factors and parameters. While searching for the optimal solution, we must take into account the layout constraints of the factory, financial considerations, hardware resources, and computational time constraints. In Chapter 7, I presented methods and solutions that can help optimize material handling, the list of products to be manufactured, and cell load. Some methods result in only minor improvements, while others can significantly increase productivity. Instead of looking for the best solution, searching for a “good enough” solution can save a lot of resources. I can provide a holistic solution by simultaneously optimizing the layout, production sequence, and AGV route selection. I validated the presented methods using a custom simulation software.

Future development focus areas could include the following: expanding the range of stochastic effects considered, reducing the number of constraints, investigating algorithmic options, incorporating them for faster running, leveraging the potential of intraday rescheduling and retooling, and extending the model by increasing the size of the production list and the number of manufacturing cells.

9. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. TÉZIS

Megvizsgáltam és tanulmányoztam az ipar 4.0 technológiákat alkalmazó mátrixgyártás hazai és nemzetközi szakirodalmát. Megállapítottam, hogy a több AGV-t alkalmazó mátrixgyártás tervezési kérdéseinek vizsgálata egy új kutatási terület, ugyanis a mátrix rendszerű gyártás celláinak optimális elrendezésével foglalkozó szakirodalmat nem találtam. Ennek okán, a szakirodalmi ismeretek felhasználásával és a digitalizációra vonatkozó lehetőségek figyelembevételével kidolgoztam a mátrix gyártórendszer általános modelljét, meghatároztam a rendszer építőelemeit, funkcióit, kapcsolati rendszerét. [S/3], [S/4], [S/5], [S/10], [S/11], [S/14], [S/15]

2. TÉZIS

Az általam kidolgozott általános modell alapján megadtam annak matematikai leírását, amely alkalmas a mátrix gyártórendszer építőelemei közötti kapcsolati rendszer leírására és definiáltam a logisztikai paraméterrendszert a vizsgálatok számára. [S/18]

3. TÉZIS

Holisztikus megközelítést alkalmazva, meghatároztam a rendszert leíró paraméterrendszert és kidolgoztam egy javító eljárást és megadtam optimalizáló eljárást is, amely alkalmas mátrixgyártás esetén a gyártócella elrendezés, a gyártási sorrend és az AGV útvonalválasztás egyidejű optimalizálására. [S/19]

4. TÉZIS

A szimulációs módszer felhasználásával elvégeztem a lineáris és a mátrix elrendezésű gyártórendszerek összehasonlító vizsgálatát és megállapítottam, hogy mátrixgyártás alkalmazásával a gyártási idő csökkenthető. [S/2]

10. NEW SCIENTIFIC RESULTS

1. THESIS

I examined and studied the domestic and international literature on matrix production using Industry 4.0 technologies. I found that the examination of design issues in matrix production using multiple AGVs is a new area of research, as I could not find any literature dealing with the optimal layout of cells in matrix manufacturing systems. For this reason, using the knowledge gained from the literature and considering the possibilities offered by digitalization, I developed a general model of the matrix production system and defined its components, functions, and connection system. [S/3], [S/4], [S/5], [S/10], [S/11], [S/14], [S/15]

2. THESIS

Based on the general model I developed, I provided a mathematical description suitable for describing the relationship system between the components of the matrix production system. In addition, I defined the logistics parameter system for the examinations. [S/18]

3. THESIS

Using a holistic approach, I defined the parameter system describing the production system and developed an improvement procedure and provided an optimization procedure also, that is suitable for the simultaneous optimization of the production cell layout, the production sequence, and the AGV route selection in the case of matrix production. [S/19]

4. THESIS

Using the developed custom simulation method, I carried out a comparative analysis of linear and matrix-based production systems and concluded that manufacturing time can be reduced by using matrix production. [S/2]

11. IRODALOMJEGYZÉK

11.1 AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN HASZNÁLT SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

- [S/1] HARDAI, I., ILLÉS, B., BÁNYAI, Á. (2019): *Efficiency improvement of manufacturing and logistic processes in industry 4.0 environment*, In: Michael, Schenk (szerk.) 12th International Doctoral Students Workshop on Logistics, Magdeburg, Németország: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, pp. 1-6., 6 p., Könyvrészlet (Konferenciaközlemény)
- [S/2] HARDAI, I. (2019): *Az Ipar 4.0*, In: HARDAI, I., ILLÉS, B., BÁNYAI, Á. (2021): *Route Planning in Matrix Production*, 14th International Doctoral Students Workshop on Logistics Magdeburg, Németország: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- [S/3] HARDAI, IBOLYA (2019): *Az ipar 4.0 és okos környezetünk okos eszközei, megoldásai*, In: Jakopánecz, Eszter (szerk.) XXXIV. Országos Tudományos Diákköri Konferencia: Közgazdaságtudományi Szekció ú: Absztraktkötet, Pécs, Magyarország: Pécsi Tudományegyetem Közgazdaságtudományi Kar, p. 53, ISBN: 9789634293279, Könyvrészlet (Absztrakt / Kivonat)
- [S/4] HARDAI, I., ILLÉS, B., BÁNYAI, Á. (2019): *Az Ipar 4.0 alkalmazási lehetőségeinek áttekintése*, In: Barabás, István (szerk.) XXVII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia OGÉT 2019, Nagyvárad, Románia: Erdélyi Magyar Tudományos Társaság, (2019) pp. 1-4., 4 p., Könyvrészlet (Konferenciaközlemény)
- [S/5] HARDAI, I., ILLÉS, B., BÁNYAI, Á. (2019): *Áttekintés az Ipar 4.0 nyújtotta lehetőségekről*, GÉPGYÁRTÁS 58: 1-2 pp. 45-52., 8 p. (2019), Folyóiratcikk (Szakcikk)
- [S/6] HARDAI, IBOLYA (2019): *Optimális készletezési rendszer kialakításának logisztikai aspektusai*, In: Csákány, Anikó (szerk.) XXXIV. OTDK Műszaki Tudományi Szekció: Tartalmi kivonatok, Budapest, Magyarország: Műegyetemi Kiadó, p. 383, Könyvrészlet (Absztrakt / Kivonat)
- [S/7] HARDAI, I., ILLÉS, B., BÁNYAI, Á. (2019): *Logistic aspects of inventory optimization*, In: 10th International Conference of Mechanical Engineering COMEC 2019: 5th Symposium of Quality Management & Logistics. Paper: C2_13, 17 p., Egyéb konferenciaközlemény (Konferenciaközlemény)
- [S/8] HARDAI, I. (2019): *Optimális készletezési rendszer kialakításának módszertana*, Diáktudomány: A Miskolci Egyetem Tudományos Diákköri Munkáiból 12 pp. 56-64., 9 p., Folyóiratcikk (Szakcikk)
- [S/9] HARDAI, I. (2019): *Optimális készletezési rendszer kialakításának logisztikai aspektusai*, Logisztikai Híradó: A Magyar Logisztikai Beszerzési És Készletezési Társaság Hivatalos Szaklapja 29: 3 pp. 28-30., 3 p., Folyóiratcikk (Szakcikk)
- [S/10] HARDAI, I., ILLÉS, B., BÁNYAI, Á. (2019): *Logisztikai folyamatok hatékonyságnövelése az ipar 4.0 révén*, In: Bodzás, Sándor Antal, Tamás (szerk.) Műszaki tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2019: konferencia előadásai, Debrecen, Magyarország: Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, pp. 125-128. 4 p., Könyvrészlet (Konferenciaközlemény)
- [S/11] HARDAI, I. (2019): *Intelligens gyártórendszer logisztikai szempontú optimalizálása*, Doktoranduszok fóruma, Miskolci Egyetem
- [S/12] FÜKŐ, L., ILLÉS, B., SKAPINYEZ, R., HARDAI, I., BÁNYAI, Á., TAMÁS, BÁNYAI, T., SZENTESI, SZ., TAMÁS, P. (2020): *Increasing the sustainability of forklift material handling systems by using an innovative process development method*, Academic Journal Of Manufacturing Engineering 18: 2 pp. 87-94., 8 p., Folyóiratcikk (Szakcikk) Q3
- [S/13] SKAPINYEZ, R., ILLÉS, B., BÁNYAI, T., AKYLBEEK, U., HARDAI, I. AND TAMÁS, P. (2021): *Presenting an innovative process improvement method for the efficient forklift material handling systems in the industry 4.0*, Advanced Logistic Systems - Theory and Practice, 14(1), pp. 32-38. doi: 10.32971/als.2020.007.

- [S/14] HARDAI, I., ILLÉS, B., BÁNYAI, Á. (2020): *View of the opportunities of industry 4.0*, Advanced Logistic Systems – Theory and Practice, Vol. 14, No. 2, pp. 5-14., <https://doi.org/10.32971/als.2020.009>
- [S/15] HARDAI, I., ILLÉS, B., BÁNYAI, Á. (2019): *Efficiency improvement of reverse logistics in Industry 4.0 environment*, In: Szita Tóthné, Klára Jármay, Károly Voith, Katalin (szerk.) Solutions for Sustainable Development : Proceedings of the 1st International Conference on Engineering Solutions for Sustainable Development, (ICESSD 2019), London, Egyesült Királyság / Anglia : CRC Press, pp. 169-177., 9 p. DOI Scopus, Könyvrészlet (Konferenciaközlemény)
- [S/16] HARDAI, I., ILLÉS, B., BÁNYAI, Á. (2021): *Termelővállalat recycling logisztikai rendszerének optimális kialakítása*, In: Barabás, István (szerk.) XXIX. Nemzetközi Gépészeti Konferencia OGÉT 2021, Kolozsvár, Románia: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), pp. 298-301., 4 p.
- [S/17] HARDAI, I., ILLÉS, B., BÁNYAI, Á. (2020): *Blockchain and logistics 4.0*, In: 13th International Doctoral Students Workshop on Logistics, Magdeburg, Németország: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 6 p., Könyvrészlet (Konferenciaközlemény)
- [S/18] HARDAI, I., ILLÉS, B., BÁNYAI, Á. (2025): *Mathematical model of matrix production*, Advanced Logistic Systems - Theory and Practice, 19(2), 5–14. <https://doi.org/10.32971/als.2025.007>
- [S/19] HARDAI, I., ILLÉS, B., BESSE Z., BÁNYAI, Á. (2025): *Optimization opportunities in matrix production*, Acta logistica [megjelenés alatt]

11.2 AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN HASZNÁLT IDEGEN PUBLIKÁCIÓK

- [I/1] BÁNYAI, T. (2023): *Transformation of Conventional Manufacturing and Service Systems into a Cyber-Physical Environment: Review of Potential Solutions*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 456 – 471
- [I/2] LYCZKOWSKI, E., WANJEK, A., SAUER, C., & KIESS, W. (2019). *Wireless Communication in Industrial Applications*, 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). doi:10.1109/etfa.2019.8869323
- [I/3] NIELSEN C. P., FEI YU (2022): *Product Design for Matrix-Structured Manufacturing Systems*, Procedia CIRP, Volume 109, p. 407-412,
- [I/4] BÁNYAI, T. (2021): *Optimization of material supply in smart manufacturing environment: A metaheuristic approach for matrix production*, Machines, 9 (10), art. no. 220
- [I/5] BÁNYAI, Á., ILLÉS, B., GLISTAU, E., COELLO MACHADO, N.I., TAMÁS, P., MANZOOR, F., BÁNYAI, T. (2019): *Smart cyber-physical manufacturing: Extended and real-time optimization of logistics resources in matrix production*, Applied Sciences (Switzerland), 9 (7), art. no. 1287
- [I/6] HOLODNY, E. (2017): *A key player in China and the EU's „third industrial revolution” describes the economy of tomorrow*. Business Insider, <https://www.businessinsider.com/jeremy-rifkin-interview-2017-6> (letöltve 2018.11.10.)
- [I/7] MTA SZTAKI (2017): *Az Ipar 4.0 Nemzeti Technológiai Platform - Kérdőív Projekt*, 2017-es átfogó felmérés http://www.i40platform.hu/sites/default/files/2018-05/Flyer_v9.0.pdf (letöltve 2018.11.14.)
- [I/8] WANG, S., WAN, J., LI, D., ZHANG, C. (2016): *Implementing smart factory of industrie 4.0: an outlook*. International Journal of Distributed Sensor Networks, 12(1), 3159805.
- [I/9] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (2013): *Die Europäische Bildungs- und Forschungspolitik*, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/europa/die-europaeische-bildungs-und-forschungspolitik-442720> (letöltve 2018.11.14.)
- [I/10] BRETTEL, M., FRIEDERICHSEN, N., KELLER, M., ROSENBER, M. (2014): *How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape:*

- and Industry 4.0 perspective*. International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, 8(1), p. 37-44.
- [I/11] SCHWAB, K. (2016): *Fourth industrial revolution: what it means, how to respond*, World Economic Forum, p. 1-8.
- [I/12] NAGY, J. (2017): *Az ipar 4.0 fogalma, összetevői és hatása az értékláncra*, Nagy Judit, 167. sz. Műhelytanulmány HU ISSN 1786-3031 p.11.
- [I/13] KPMG (2016): *The factory of the future, KPMG guide Part I*, kpmg.de, Germany
- [I/14] SVÉHLIK, CS. (2005): *Paradigmaváltás az autóiparban: A technika-központúságtól a márka- és vevőközpontúságig*, In: Marketingoktatás és kutatás a változó európai unióban. Széchenyi István Egyetem: Győr. ISBN: 963 717 525 3
- [I/15] BÁNYAI, T. (2018): *Real-time decision making in first mile and last mile logistics: How smart scheduling affects energy efficiency of hyperconnected supply chain solutions*, Energies 11: 7 Paper: 1833
- [I/16] FÓNAI, M. HUSZTI, É.: *Általános kutatási ismeretek*, Debreceni Egyetem, 2020
- [I/17] LENGYELNÉ, M. T. (2013): *Kutatástervezés*, Eszterházy Károly Főiskola, Eger
- [I/18] CRONIN, P. RYAN, F. COUGHLAN, M. (2008): *Undertaking a literature review: A step-by-step approach*, Brit. J. Nurs, 17, 38–43.
- [I/19] ELY C, SCOTT I (2007): *Essential Study Skills for Nursing*, Elsevier, Edinburgh
- [I/20] ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/>
- [I/21] Scopus: <https://www.scopus.com>
- [I/22] Web of Science: <https://mjl.clarivate.com/home>
- [I/23] *Round-robin*: <https://hu.wikipedia.org/wiki/Round-robin> (letöltve 2025.05.22.)
- [I/24] MISHRA B.K., DAHAL K., PERVEZ Z. (2017): *Dual-mode round-robin greedy search with fair factor algorithm for relief logistics scheduling*, Proceedings of the 2017 4th International Conference on Information and Communication
- [I/25] GUBÁN, M., GUBÁN, Á. (2023): *Fenntartható raktárkezelés autonóm drónokkal*, Akadémiai Kiadó, ISBN: 978 963 454 934 5
- [I/26] HEGEDŰS, I.: *Mesterséges Intelligencia*, Előadás Segédanyag, SZTE, <https://www.inf.u-szeged.hu/~ihegedus/teach/09-evol.pdf> (letöltve 2025.07.22.)
- [I/27] KOVÁCS, D. L.: *Genetikus algoritmusok*, BME, https://www.mit.bme.hu/system/files/oktatas/targyak/7357/BIR_GA_Utmutato.pdf (letöltve 2025.07.22.)
- [I/28] HUFFMAN D. A. (1954): *A Method for the Construction of Minimum-Redundancy Codes*
- [I/29] *Huffman Coding | Greedy Algo-3* <https://www.geeksforgeeks.org/dsa/huffman-coding-greedy-algo-3/> (letöltve 2025.05.22.)
- [I/30] THE GO AUTHORS (2023): *The Go Programming Language, Package flate implements the Deflate compressed data format*, described in RFC issue 1951.
- [I/31] Free Software Foundation: *GNU Gzip*, <https://www.gnu.org/software/gzip/> (letöltve 2025.05.22.)
- [I/32] Data Compression Reference Center: RASIP working group (2013): *The LZ77 algorithm*, Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb
- [I/33] Free Software Foundation: *GNU Shuf* https://www.gnu.org/software/coreutils/manual/html_node/shuf-invocation.html (letöltve 2025.05.22.)
- [I/34] MSZ EN ISO 3691-4 (2020): *Ipari targoncák. Biztonsági követelmények és igazolásuk. 4.rész: Vezető nélküli ipari targoncák és rendszereik*
- [I/35] KOREN Y. (2010): *The Global Manufacturing Revolution: Product-Process- Business Integration and Reconfigurable Systems*, Hoboken: John Wiley & Sons
- [I/36] KPMG (2016): *The factory of the future*, <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/es/pdf/2017/06/the-factory-of-the-future.pdf>, Németország (letöltve 2018.11.12.)