

**MISKOLCI EGYETEM**  
**GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR**



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

**PhD értekezés**

Készítette:

**Hardai Ibolya**  
okleveles logisztikai mérnök

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.

## NYILATKOZAT

Alulírott Hardai Ibolya kijelentem, hogy ezt a doktori értekezést magam készítettem, és abban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalommal, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem. A dolgozat bírálatai és a védésről készült jegyzőkönyv a későbbiekben a Miskolci Egyetem Dékáni Hivatalában lesz elérhető.

Miskolc, 2025. augusztus 18.

---

Hardai Ibolya

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik támogatásukkal, biztatásukkal, segítségükkel hozzájárultak az értekezésem elkészítéséhez.

Az értekezés a Miskolci Egyetem Logisztikai Intézetében készült a Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola képzésének keretein belül. Különösképpen szeretnék köszönetet mondani tudományos vezetőimnek Dr. Illés Béla Professor Úrnak és Dr. Bányainé Dr. Tóth Ágota Professor Asszonynak, amiért szakmai iránymutatásukkal, segítőkész munkájukkal és támogatásukkal segítették munkám elkészültét.

Köszönet illeti a Logisztikai Intézet munkatársait a szakmai és erkölcsi támogatásért, hogy tanácsaikkal és útmutatásukkal hozzájárultak disszertációm elkészítéséhez. Munkámban meghatározó segítséget jelentett, hogy támaszkodhattam a Logisztikai Intézet széleskörű nemzetközi tudományos és ipari kapcsolatrendszerére. Nagyon hálás vagyok a Logisztikai Intézetet vezetőjének, Dr. Tamás Péter Professor Úrnak, azért, hogy részt vehettem többek között a magdeburgi Otto von Guericke Egyetem Doktorandusz Fórumain, valamint a Santa Clara Marta Abraeu Egyetem konferenciáin, több alkalommal előadást tarthattam és kutatási eredményeimet publikálhattam, továbbá részt vehettem ipari projekteken is. Szeretném megköszönni Bálint Richárdnak a sok eszmecserevel és ötleteléssel eltöltött órákat.

Köszönöm a Gépészmérnöki és Informatikai Kar vezetőségének, valamint Dr. Kovács László és Dr. Szigeti Jenő Professor Uraknak, a Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola jelenlegi és volt vezetőjének, hogy lehetőséget biztosítottak a magas szintű kutatómunka elvégzésére. Hálás vagyok Homonnai Emesének, a Gépészmérnöki és Informatikai Kar Dékáni Hivatal dolgozójának, aki a doktori képzésem és a kutatásaim folyamán segítségemre volt adminisztrációs ügyeim intézésében.

Szeretném megköszönni Édesanyámnak a sok áldozatot, hogy mindvégig ösztönözött a céljaim elérésében. Köszönettel tartozom továbbá páromnak, Besse Zoltánnak, aki nélkül ez a disszertáció nem készülhetett volna el, és két gyermekemnek, Daninak és Dorotinak a türelmükért és a biztatásukért, hogy végig mellettem álltak.

Végezetül ajánlanám az értekezést a két számomra legmeghatározóbb személynek, Nagymamámnak, Icinék, aki a legcsodálatosabb ember volt a világon és gépészmérnök Nagyapámnak, Józsi papának, akinél okosabb és bölcebb embert sosem ismertem.

Miskolc, 2025. augusztus 18.

---

Hardai Ibolya

## TÉMAVEZETŐI AJÁNLÁS

### **Hardai Ibolya „AZ IPAR 4.0 KIHÍVÁSAI ÉS LEHETŐSÉGEI, A MÁTRIX RENDSZERŰ GYÁRTÁS LOGISZTIKAI SZEMPONTÚ VIZSGÁLATA” c. PhD értekezéséhez**

Hardai Ibolya a Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola Anyagáramlási rendszerek és logisztikai informatika tématerületéhez kapcsolódóan 2018-ben kezdte meg PhD tanulmányait. Kutatásai során az Ipar 4.0 technológiák logisztikai rendszerekben való alkalmazási lehetőségeit vizsgálta, különös tekintettel a mátrix rendszerű gyártásra.

A kutatómunka iránti érdeklődése már a logisztikai mérnöki mesterképzés során megmutatkozott, amit több tudományos dolgozat elkészítése is alátámaszt. E kutatómunka eredményességet az intézményi és az országos Tudományos Diákköri Konferenciákon elért helyezések is igazolják.

Hardai Ibolya PhD tanulmányai során kiemelkedő szorgalommal, önállósággal és szakmai elhivatottsággal végezte munkáját. Aktívan részt vett a Logisztikai Intézet oktatási és kutatási tevékenységében, ahol ötleteivel és elemzéseivel érdemben hozzájárult az Intézet eredményességéhez. Tudományos eredményeit rendszeresen bemutatta hazai és nemzetközi tudományos konferenciákon, valamint lektorált szakmai folyóiratokban publikálta.

Az értekezés Hardai Ibolya önálló kutatási eredményeit tartalmazza, és minden szempontból megfelel a Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola szabályzatában előírt követelményeknek. A disszertáció elméleti és gyakorlati szempontból is értékes hozzájárulást jelent az Ipar 4.0 technológiák és a gyártási rendszerek fejlődésének kutatásához, különös tekintettel a mátrix rendszerű gyártás logisztikai aspektusaira.

A dolgozat Hardai Ibolya kutatási eredményeit foglalja össze, mely alapján a jelölt részére a PhD cím odaítélését messzemenően támogatjuk.

Miskolc, 2025. augusztus 18.

Prof. Dr. Illés Béla

témavezető

Dr. Bányainé Prof. Dr. Tóth Ágota

társtémavezető

# TARTALOMJEGYZÉK

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>BEVEZETÉS .....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>A KUTATÁS HÁTTERE ÉS CÉLKITŰZÉSEI .....</b>                                    | <b>3</b>  |
| 2.1      | IPAR 4.0 HATÁSA .....   | 5         |
| 2.1.1    | <i>A fejlesztési stratégia dimenziói, pillérei.....</i>                           | <i>6</i>  |
| 2.1.2    | <i>Cselekvési területek .....</i>   | <i>7</i>  |
| 2.1.2.1  | Teljes digitalizálás.....   | 7         |
| 2.1.2.2  | A szervezeti és működési struktúrák újratervezése .....                           | 8         |
| 2.1.2.3  | Emberi erőforrások .....  | 8         |
| 2.1.2.4  | A gépek, berendezések és a logisztikai parkok összehangolása.....                 | 9         |
| 2.1.2.5  | Az értéklánc átalakítása .....  | 10        |
| 2.1.2.6  | Az üzleti modell kiigazítása és új bevételi modellek kidolgozása .....            | 11        |
| 2.1.2.7  | Az ipar diverzifikációja.....   | 11        |
| 2.1.2.8  | A számítógépes biztonság .....  | 11        |
| 2.1.2.9  | Jogi követelményeknek való megfelelés .....                                       | 12        |
| 2.1.3    | <i>A digitális érettség kategóriái, az Ipar 4.0 Készenléti Indexe.....</i>        | <i>13</i> |
| 2.1.4    | <i>Az ipar 4.0 hatása a vállalatokra .....</i>                                    | <i>17</i> |
| 2.2      | A KUTATÁS FŐBB CÉLKITŰZÉSEI.....  | 19        |
| <b>3</b> | <b>A DISSZERTÁCIÓ MÓDSZERTANA, A KUTATÁS SORÁN ALKALMAZOTT MÓDSZEREK .....</b>    | <b>21</b> |
| <b>4</b> | <b>IRODALOMKUTATÁS .....</b>  | <b>28</b> |
| 4.1      | IPAR 4.0.....   | 28        |
| 4.1.1    | <i>Leíró elemzés .....</i>  | <i>29</i> |
| 4.1.2    | <i>Tartalom vizsgálat .....</i>   | <i>32</i> |
| 4.1.3    | <i>IPAR 4.0 elvek alkalmazásának .....</i>  | <i>36</i> |
| 4.1.3.1  | Beszerezési és elosztási logisztika .....   | 37        |
| 4.1.3.2  | Termelési logisztika .....  | 37        |
| 4.1.3.3  | Recycling logisztika.....   | 38        |
| 4.1.3.4  | Blockchain .....  | 38        |
| 4.2      | MÁTRIXGYÁRTÁS.....  | 38        |
| 4.2.1    | <i>Leíró elemzés .....</i>  | <i>39</i> |
| 4.2.2    | <i>Tartalom vizsgálat .....</i>   | <i>42</i> |
| <b>5</b> | <b>MÁTRIXGYÁRTÁS - AGV KISZOLGÁLÁSSAL .....</b>                                   | <b>48</b> |
| 5.1      | A MÁTRIXGYÁRTÁS ÁLTALÁNOS MODELLJE, LEHATÁROLÁSA, PARAMÉTEREK MEGHATÁROZÁSA ..... | 49        |
| 5.1.1    | <i>A mátrixgyártás építőelemei .....</i>  | <i>49</i> |
| 5.1.1.1  | A gyártócellák.....   | 50        |
| 5.1.1.2  | A közlekedési útvonalak, főbb pontok .....  | 52        |
| 5.1.1.3  | A bejárat és a kijárat .....  | 52        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 5.1.1.4   | Az áru- és az szerszámraktár, az AGV raktár .....  | 53         |
| 5.1.1.5   | A szállítóeszközök, az AGV-k .....   | 54         |
| 5.1.2     | <i>A működtetési főbb stratégiai elemeinek bemutatása egy mintagyár példáján.....</i>    | <i>55</i>  |
| 5.1.2.1   | A gyártási folyamat, a gyártócellák működésének jellemzői .....                          | 55         |
| 5.1.2.2   | A gyártandó termékek meghatározása .....   | 56         |
| 5.1.2.3   | A gyártás teljes időszükséglete .....  | 58         |
| 5.1.2.4   | Az AGV-k számának meghatározása .....  | 59         |
| 5.1.3     | <i>A mátrixgyártás irányítórendszere és a mátrixgyártás elemei közötti relációk.....</i> | <i>59</i>  |
| <b>6</b>  | <b>ÁLTALÁNOS MATEMATIKAI MODELL.....</b>   | <b>62</b>  |
| 6.1       | GYÁRTÓCELLÁK ELRENDEZÉSÉNEK OPTIMALIZÁLÁSA .....   | 62         |
| 6.2       | AGV ÚTVONALAK OPTIMALIZÁLÁSA .....   | 63         |
| 6.3       | AGV-SORREND OPTIMALIZÁLÁSA.....  | 65         |
| 6.4       | INTEGRÁLT OPTIMALIZÁLÁS.....   | 66         |
| <b>7</b>  | <b>A SZIMULÁCIÓS SZOFTVER .....</b>  | <b>71</b>  |
| <b>8</b>  | <b>A MÁTRIXGYÁRTÁS FOLYAMATAINAK JAVÍTÁSÁRA SZOLGÁLÓ LEHETŐSÉGEK.....</b>                | <b>75</b>  |
| 8.1       | AZ ANYAGMOZGATÁSI ÚTVONALAK MEGHATÁROZÁSA.....   | 75         |
| 8.2       | A CELLÁK ELRENDEZÉSÉNEK OPTIMALIZÁLÁSI LEHETŐSÉGEI .....                                 | 77         |
| 8.3       | A GYÁRTÁSI LISTA JAVÍTÁSÁRA SZOLGÁLÓ LEHETŐSÉGEK .....                                   | 84         |
| 8.4       | ÚTVONAL JAVÍTÁSÁRA SZOLGÁLÓ LEHETŐSÉGEK.....   | 86         |
| 8.5       | ÖSSZEHASONLÍTÁS A LINEÁRIS GYÁRTÓSORRAL .....  | 95         |
| <b>9</b>  | <b>ÖSSZEFOGLALÁS .....</b>   | <b>97</b>  |
| <b>10</b> | <b>SUMMARY .....</b>   | <b>98</b>  |
| <b>11</b> | <b>AZ ÉRTEKEZÉS TÉZISEI.....</b>   | <b>99</b>  |
| <b>12</b> | <b>THESES.....</b>   | <b>100</b> |
| <b>13</b> | <b>IRODALOMJEGYZÉK .....</b>   | <b>101</b> |
| 13.1      | AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN HASZNÁLT SAJÁT PUBLIKÁCIÓK .....                                | 101        |
| 13.2      | AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN HASZNÁLT IDEGEN PUBLIKÁCIÓK.....                                | 103        |

## JELÖLÉSEK

- a, b, c, d, e, f, g, h: a mintagyár gyártási műveletei,
- 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, amely megmondja, hogy az  $i$ -edik cellát a  $p$ -edik pozícióba helyezzük-e,
- $L_{j,q} \in \{0,1\}$ : bináris változó, amely megmondja, hogy az  $j$ -edik cellát a  $q$ -edik pozícióba helyezzük-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,
- $P_H, P_L$  prímszámok, ahol  $P_L < P_H$ ,
- 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,
- $\mathbf{s}_{x,y} = \left[ \Theta_{x,y,0}; \Theta_{x,y,1}; \Theta_{x,y,2}; \Theta_{x,y,3}; \dots; \Theta_{x,y,\beta_{x,y}+1}; \Theta_{\beta_{x,y}+2}; \Theta_{\beta_{x,y}+3} \right]^T$ : az  $x$ -edik AGV az  $y$ -edik szállítmány esetében a teljes útvonalának pontjai a bejárás sorrendjében,
- $\mathbf{s}_y = \left[ \Theta_{y,0}; \Theta_{y,1}; \Theta_{y,2}; \Theta_{y,3}; \dots; \Theta_{y,\beta_y+1}; \Theta_{\beta_y+2}; \Theta_{\beta_y+3} \right]^T$  az  $y$ -edik munkadarab esetében az AGV teljes útvonalának pontjai a bejárás sorrendjében,
- $t_{0,z_k}$ : a gyártás megkezdésétől a  $k$ -edik termék gyártásának kezdetéig eltelt idő,
- $t_{gyártás}$ : a teljes gyártási idő,
- $t_{M,y}^{\Theta_{y,i},\Theta_{y,i+1}}$  az anyagmozgatási idő az  $i$ -edik és az  $(i+1)$ -edik pont között,
- $t_{Pr,y}^{\Theta_{y,i}}$  az  $i$ -edik ponton a munka ideje,
- $t_x$ : az  $x$ -edik AGV által szállított munkadarabok összesített gyártási ideje,

- $t_x^{Eng}$ : Útvonal engedélyre való várakozások idejei az  $x$ -edik AGV esetében,
- $t_x^{Gyárt}$ : gyártási idők (cellákban) az  $x$ -edik AGV esetében,
- $t_x^{Rakfel}$ : rakodási idők a bejáratnál az  $x$ -edik AGV esetében,
- $t_x^{Rakle}$ : rakodási idők a kijáratnál az  $x$ -edik AGV esetében,
- $t_x^{Száll}$ : anyagmozgatási idők az  $x$ -edik AGV esetében,
- $t_x^{Techn}$ : technikai idők az AGV-POOL-ban az  $x$ -edik AGV esetében,
- $t_x^{Útv}$ : útvonalra várakozási idők az  $x$ -edik AGV esetében,
- $T_{x,y,i,i+1,w_c} \in \{0,1\}$ : 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,
- $t_y$ : Az  $y$ -edik munkadarab gyártásának ideje,
- $t_{WR_j,y}^{\theta_{y,i},\theta_{y,i+1}}$  az  $i$ -edik pontban és az  $(i+1)$ -edik pontig tartó útvonalon az útra való várakozási idők elemei ( $k_i$  db),
- $t_{WP,y}^{\theta_{y,i}}$  az  $i$ -edik pontban az útvonalra várakozás ideje,
- $t_{\theta_{x,y,i},\theta_{x,y,i+1},P_q,y}^{Útv}$ : 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  $\Phi_q$  pontban,
- $t_{\theta_{x,y,i},y}^{Eng}$ : az útvonal engedélyre való várakozások idejeit az  $x$ -edik AGV  $y$ -edik rakománya esetében a  $\theta_{x,y,i}$  pontban,
- $X$ : 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  $\Phi_q$  pontot érinti-e,
- $\mathbf{z} = [z_1; z_2; \dots; z_K]^T$ : a gyártandó termékek sora,
- $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_\mu$ : gyártási műveletek,
- $\beta_{x,y}$ : a gyártási műveletek száma az  $x$ -edik AGV  $y$ -edik rakománya esetében,
- $\beta_y$ : az  $y$ -edik munkadarab gyártási folyamatlistájának elemszáma (elvégzendő műveletek száma),
- $\beta_{z_k}$ : a gyártási műveletek száma a  $z_k$  termék esetében,
- $\delta_1$ : a bejáratnál egyidőben ott tartózkodó AGV-k maximális száma,

- $\delta_2$ : a kijáratnál egyidőben ott tartózkodó AGV-k maximális száma,
- $\Delta s$ : két AGV közötti minimális követési távolság,
- $\theta$ : gyártócellák, AGV-POOL, ENTRANCE, EXIT pontok,
- $\lambda_1\%, \lambda_2\%, \dots, \lambda_\mu\%$ : a gyártási műveletekre vonatkozó előfordulási valószínűségek,
- $\mu$ : különböző gyártási műveletek száma,
- $\rho$ : termékek száma a gyártási listában,
- $\sigma_1$ : a mátrixgyártás cellasorainak száma,
- $\sigma_2$ : a mátrixgyártás cellaoszlopainak száma,
- $\tau$ : az alkalmazott prioritás módozat,
- $\Phi_q$ :  $q$ -edik szakaszhatároló pont,
- $\omega$ : a tárolt útvonalakvektorok száma.

# 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 átkezeléséhez 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 üzem belüli ellátás pedig autonóm járműveken alapul. Adaptív és rugalmas anyagmozgatási megoldásokra van szükség a szabványosított és kategorizált gyártócellák dinamikusan változó ellátási igényeinek kielégítéséhez [I/5].

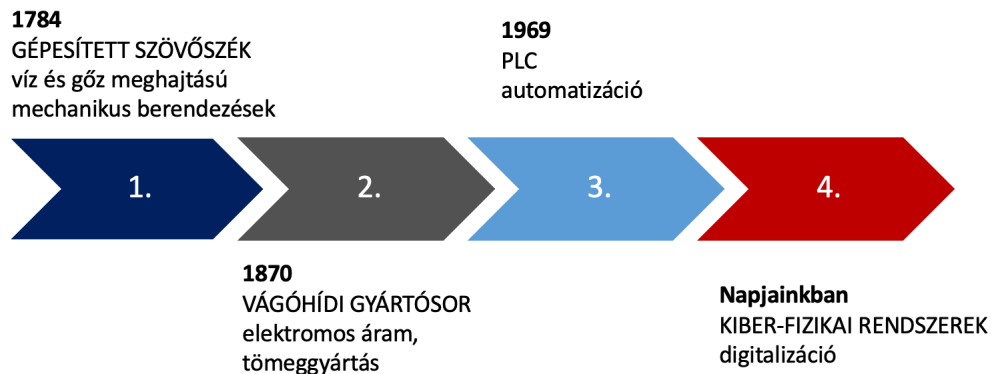
Disszertációmban egy szisztematikus irodalmi áttekintést követően bemutatom a mátrix típusú gyártórendszer általános modelljét. Logisztikai szempontokra összpontosítva

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].



*1. ábra: Ipari forradalmak (saját szerkesztés [I/7] alapján)*

*Az első, a második és a harmadik ipari forradalom:*

Az első ipari forradalmat a gőzgép feltalálásával az emberi, illetve állati izomerő termelésbeli kiváltása jelentette a XVIII. század végétől az 1830-as évekig terjedő időszakban.

A második ipari forradalom két legmeghatározóbb eleme az elektromos áram elterjedése, majd az 1930-as években a Henry Ford nevéhez kapcsolható tömeggyártás volt.

A harmadik ipari forradalom az 1970-es években kezdődött, amikor megindult az automatizált gyártás, mindehhez az elektronika és az információtechnológia megfelelő szintű fejlettségére volt szükség. Mind gyártási mind logisztikai szempontból is fokozódó kihívást jelentett a változékony vevői igények kielégítése, az alacsony termelési volumen szükségessé tette a tömeges testre szabást, a késleltetett gyártásra egyfajta köztes fejlődési pontként tekinthetünk a fejlődés során.

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/8].

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:

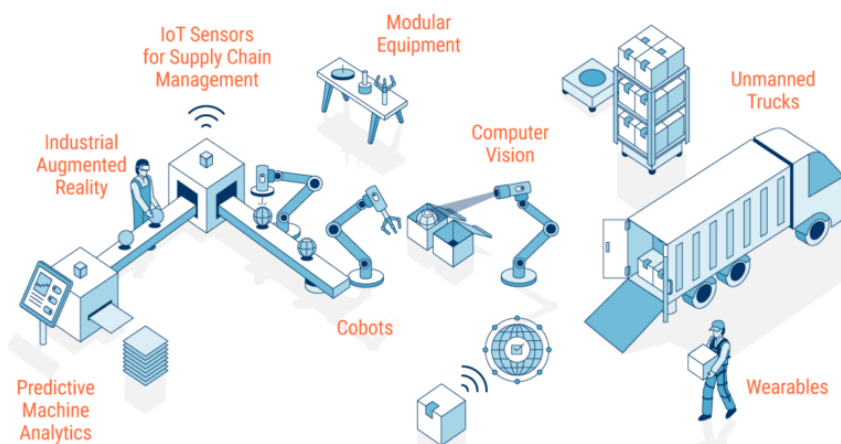
- környezeti károkon keresztül klímaváltozáshoz vezetnek,
- energiaintenzívek, de nem megújuló energiát hasznosítanak,
- csökken a munkaerő létszáma az öregedő társadalom következtében [I/9].

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/10]*

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/11]. A negyedik ipari forradalom a technológiák olyan fúziója, mely a fizikai, a digitális és a biológiai szférák közötti határvonalakat elmosza [I/12].



2. ábra: Ipar 4.0 elvű gyártás [I/13]

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/14]*

## 2.1 Ipar 4.0 hatása

Ebben a fejezetben az Ipar 4.0 szervezetre, az értékláncre, az emberi erőforrásokra, a biztonságra, a jogi és gazdasági környezetre gyakorolt hatásait tekintem át.

### 2.1.1 A fejlesztési stratégia dimenziói, pillérei

A változási folyamatban három nagy dimenziót és ezek mellett öt pillért különböztethetünk meg. [I/8]

A dimenziók:

- *A technológiai változás* nagy hajtóereje a digitalizáció. Az értékláncok integrálásával hat a folyamatokra (új alapokra állított horizontális és vertikális értékláncok, digitális üzleti modellek, fogyasztói hozzáférés).
  - *A társadalmi változások* kapcsán meghatározó szerepet tulajdoníthatunk a technológia bevezetésében élenjáró vállalatoknak, az őket összefogó szakmai szervezeteknek, a közpolitikai intézményeknek, melyek hatékonyan segíthetik a stratégiát a munkaerőpiaci feltételek megújításában, a szakképzés reformjában.
  - *A változások ökológiai és szociológiai hatásai*, melyek különösen érzékennyé tehetik a társadalom tagjainak hozzáállását, reakcióját.

A pillérek:

- *Digitalizáció és vállalkozásfejlesztés*: Gyártó és logisztikai entitások, a velük szoros kapcsolatban állók közvetlen működésére ható új üzleti és működési modellek (üzemszervezés, vállalati digitalizáció) szinergikus hatását támogató pillér.
- *Gyártás és logisztika megvalósítása*: Az ipari szektor, a gyártás és logisztika elsősorban nagyvállalati résztvevőinek mikrokörnyezetét egyedi, konkrét igényeiben megjelenítő pillér.
- *Munkaerőpiaci fejlesztések*: Oktatási, humánerőforráspiaci és munkaerőpiaci stratégia és annak integrációja a mindenkori technológiai fejlettség által meghatározott iparfejlesztési stratégiával. Ez a koncepció sikerének előfeltétele.
- *Kutatás-fejlesztés-innováció*: Az Ipar 4.0 a kutatás-fejlesztés-innovációs tevékenység multiplikátor hatásait aknázza ki. Ezt a területet önálló prioritásként kell kezelni.
- *Ökoszisztéma*: Az Ipar 4.0 társadalmi és nemzetgazdasági beágyazottsága megköveteli, hogy holisztikus egységként kezeljük a másik négy pillért, a releváns

tudományágak bevonását (szociológia, környezetgazdálkodás, jogalkotás) és az állami szabályozó- végrehajtó intézményrendszer adaptációját.

1. táblázat: A stratégia pillérszerkezete [I/8]

| Pillér/Dimenzió                        | Üzlet  | Társadalom, szabályozás, fenntarthatóság  | Technológia   |
|--|--|---|---|
| Digitalizáció és vállalkozásfejlesztés | KKV-k üzleti és működési modelljének megújítása    | Felmérés és nézet formálás  | Célzott ipari digitalizációs fejlesztési programok                            |
| Gyártás és logisztika megvalósítása    | Vállalkozások, ipari szereplők, klaszterek         | Koncentrált stratégiai projektek, beszállítói programok                             | Hatékony- és kapacitásnövelés   |
| Munkaerőpiaci fejlesztések             | Vállalati képzések                                 | I4.0 szemléletű elméleti és gyakorlati ismeretek a szakképzésben és felsőoktatásban | Infrastruktúra-fejlesztés az I4.0 szemléletű képzések elterjesztése érdekében |
| Kutatás-fejlesztés, innováció          | Új üzleti modellek és K+F+I inkubációs tevékenység | Tudományos szféra megerősítése, Ipar 4.0 K+F+I programok                            | Gyártás és hozzá kapcsolódó K+F szolgáltatások                                |
| Ökoszisztéma                           | Ipar 4.0 digitális hálózatépítő platformja         | Szabályozás eszközszerkezete  | Technológia- és (IKT) infrastruktúra-fejlesztés                               |

## 2.1.2 Cselekvési területek

Az Ipar 4.0-ra való áttérés nem hirtelen lépés, hanem egy folyamat. A vállalatok legfontosabb kihívásait először azonosítani, majd kezelni kell.

A következő cselekvési területek állnak a középpontban [I/15]:

- Teljes digitalizálás,
- a szervezeti és működési struktúrák áttervezése,
- emberi erőforrások,
- a gépek, berendezések és a logisztikai parkok összehangolása,
- az értéklánc szerkezeti átalakítása,
- az üzleti modell kiigazítása, új bevételi modellek kidolgozása,
- az iparág adózási dimenziója,
- kiberbiztonság,
- a komplex jogi követelményeknek való megfelelés.

### 2.1.2.1 Teljes digitalizálás

Az automatizált gyártás alapja az összes folyamat digitalizálása, ami megfelelő gyártási folyamatokat, technológiákat, valamint operatív és szervezeti struktúrákat igényel.

- *Termék DNS:* Az Ipar 4.0-ben már nincsenek "meztelen" termékek, minden paramétert, szabványt és normát már rögzítettek a virtuális termékfejlesztés részeként. A munkadarabok "memóriával" rendelkeznek, melyet a gép ért, és amelyben a tervet, a gyártását, az összeszerelését ismertetik, de tartalmazhatják akár az ügyfél megrendelésének egyéb paramétereit is.
- *Paradigmaváltás hardveres és szoftveres környezetben:* A jövő "gyárában" az üzleti menedzsment szoftver és a termelési IT megoldások közötti határok egyre vékonyabbá fognak válni, ami egyúttal lehetővé teszi majd a módosítások és bővítések rugalmas és kedvező megvalósítását.
- *Hosszú ideig használatlan belső adatok:* A belső adatok feldolgozásából üzleti előnyökre tehet szert a vállalat, egy adatvezérelt szervezet a marketing, az ellátási lánc elemeinél és a pénzügy területén is csökkentheti a kockázatokat azzal, hogy a megfelelő szolgáltatásokat és termékeket, a megfelelő ügyfél számára, a megfelelő időben, helyen és módon értékesítheti.
- *Az alkalmazottak képessége, mint biztonsági tényező:* Az intelligens gyártási rendszerek, a meglévő informatikai hálózatokhoz hasonlóan, sebezhetőek, előfordulhatnak rendszerhibák, hacker támadások és más kockázatok is, de számolni kell újabb kockázatok felmerülésével is. A védelmi intézkedések között kulcsfontosságú a naprakész biztonsági szoftverek alkalmazása és az informatikai személyzet és a munkaerő folyamatos képzése.

### 2.1.2.2 A szervezeti és működési struktúrák újratervezése

Az IKT és az automatizálási technológiák működési folyamatokba való integrálása megköveteli az üzemeltetési funkciók és üzleti folyamatok újraértékelését, a vállalat koordinált működését. Meg kell határozni a jelenlegi állapotot, a már beazonosítható célokat és a digitalizálással, automatizálással és hálózatépítéssel kapcsolatban felmerült intézkedéseket. A szervezeti erőforrások reallokálásának egy meghatározott folyamaton kell alapulnia ezt számos integrált ERP rendszer támogatja. A vállalat funkcionális szervezetét folyamatorientált szervezetté kell átalakítani.

### 2.1.2.3 Emberi erőforrások

A cél a magasabb termelékenység az alacsonyabb költségekkel való megvalósítása, mindeközben a vállalatnak meg kell felelnie a növekvő egyéni igények következtében

fellépő nagyobb számú termékváltozatoknak, a termékek növekvő összetettségének. A gyártási folyamatok bonyolultabbakká válnak ezáltal, így még fontosabb tényező lesz a munkaerő, az alapvető ismeretek és a szakértelem.

Intelligens termelési rendszer bevezetéséhez a vállalatok ma még jellemzően külső szakértői segítséget vesznek igénybe, ezzel szemben a „jövő gyáranak” alkalmazottai már rendelkezni fognak az ehhez szükséges kompetenciákkal. A jövőben nagy szükség lesz olyan szakemberekre, akik a vállalat komplex működését átlátják, egyszerre képesek a termelési, a logisztikai, a szervezeti és informatikai rendszerek mélyreható megértésére. Az ilyen, interdiszciplináris tudással rendelkező szakértők ritkák, így komoly versenyelőnyt jelenthet a vállalat számára az alkalmazásuk.

A jövő termelési folyamatainak jelentős része közvetlen emberi beavatkozás nélkül fog zajlani. Az ember-gép hatékony együttműködéshez a magas szintű szabványosítás is elengedhetetlen a folyamatokat, kapcsolódásokat a lehető legpontosabban definiálni kell.

A gépek és a technológia helyettesítheti a munkaerőt, de ugyanakkor új funkciókat is teremt, pozíciók, munkahelyek szűnnek, de újak is születnek. Lesznek munkamódszerek, melyek elavulttá válnak és lesznek készségek, melyek nagyobb jelentőséget kapnak. A fejlődéssel lépést tartva, új tudásokra is szert kell tenni a munkatársak. A munkaerőpiacon az átstrukturálódási folyamat jelei már napjainkban is megfigyelhetők.

Az emberek, a technológia, a gépek folyamatos kölcsönhatásban vannak, a jövőben egyre innovatívabb megoldások jelennek majd meg például a szenzorok, az RFID technológia és a mobil eszközök további fejlesztésének segítségével.

#### **2.1.2.4 A gépek, berendezések és a logisztikai parkok összehangolása**

Amint a feldolgozóiparban az IKT-technológiák átszövik a vállalati folyamatokat, technológiai innovációs ciklusai is megváltoznak. A termékinformációs ciklusok lerövidülése a termelési kapacitások folyamatos kiigazítását maga után vonja: az új anyagokat saját hozzáadott értékük szerint kell értékelni és feldolgozni, lehetőleg új termelési technológiákkal. Az új technológiákat és szolgáltatásokat integrálni kell a megoldásokba, az ehhez szükséges képességeket folyamatosan fejleszteni kell. Előfordulhat, hogy egy új termék fejlesztéséhez teljesen új gyártóberendezéseket kell tervezni és építeni. A megfelelő kínálat és hatékonyság elérésének érdekében bővíteni kell a vállalat saját

hozzáadott értéket képviselő hálózatát és folyamatosan figyelemmel kell kísérni az ehhez kapcsolódó fejlesztéseket.

A "jövő gyára" előkészítésében egyre rugalmasabb gépek és technológiai fogalmak honosodtak meg, ezt jelzik például az additív gyártási eljárások és a belső logisztika. Az additív gyártási eljárások a költségigényes, szűk piaci szegmens részére tervezett megoldásokból gyors gyártási technikává alakultak át számos, különféle alapanyagú termék esetében. Az additív gyártás egyik legnagyobb előnye a fejlesztő termékfejlesztésbéli nagyfokú szabadsága. Ezen lehetőségek kihasználásához új ismeretekre, képességekre és készségekre van szükség. A közvetlen digitális termeléshez a gyártás és folyamat azon paramétereinek többségét már definiálni kell, melyek körét a termékfejlesztési fázisban már meghatározták. Az egyetlen korlát az objektum külső mérete. Az alacsonyabb anyagfelhasználásnak köszönhetően az additív gyártás gyakran kisebb költséget jelent.

A vállalaton belüli gyártást, raktározást és a csomagolási műveleteket általában maguk a vállalatok végzik, de az alkalmazott üzleti modelltől függően átadhatják a feladatok egy részét a szállítóknak vagy más külső szolgáltatóknak is. A logisztikai szolgáltató nemcsak a feldolgozóipar megrendelését és előszerelését veheti át, hanem beszállítóként is integrálódhat a vállalati értékláncba. Az Ipar 4.0 technológiák új lehetőségeket teremtenek a logisztika határainak további kiszélesítésére. A logisztika integrálása a jövő gyárába sikerre fog vezetni, köszönhetően a teljesen automatikus raktározási és szállítási koncepcióknak, a munkafolyamatok tervezésében és menedzselésében alkalmazott valós idejű adatfeldolgozásnak. Az Ipar 4.0 koncepcióban a termékek (hatékonysági számítások elvégzése után) maguk választhatják meg közlekedési módot és az ügyfélhez vezető optimális utat is meghatározhatják.

#### **2.1.2.5 Az értéklánc átalakítása**

A vállalatok összegyűjthetik tudásukat felhő alapú megoldások segítségével, tesztelhetik ötleteiket és integrálhatják azokat innovációs folyamataikba. Az integráció most már meghaladja a korábbi határokat.

Az integráció kiterjedtségének szintjei: az oktatási és kutatási intézményekkel való együttműködés, a belső integráció (házon belüli folyamatok optimalizálása), a beszállítók bevonása az anyagáramok digitalizálására, az ügyfelek közreműködése a termék tervezési, létrehozási folyamatába.

### **2.1.2.6 Az üzleti modell kiigazítása és új bevételi modellek kidolgozása**

A vállalatok fel kell ismerjék, hogy egy állandó változási folyamat részesei. A digitális átalakulás eredményeképpen ez a változás soha nem látott sebességgel zajlik. A merev üzleti modellek középtávon erre túl lassan reagálnak, így a vállalat lemaradhat a versenyben. Ennek megakadályozása érdekében a jelenlegi üzleti modelleket át kell alakítani a digitális átalakulásoknak megfelelően.

### **2.1.2.7 Az ipar diverzifikációja**

Az Ipar 4.0 megvalósítása gazdasági és technológiai változásokkal jár együtt és ennek jelentős jogi és szabályozási dimenziója is van. A döntéshozóknak ezt az adótörvények kialakításakor figyelembe kell venniük.

Az immateriális javak, például maguk az ügyfeladatok, a szakértelem, a szabadalmak már ma is kulcsszerepet játszanak egy vállalat sikerében. Ez még inkább így lesz a "jövő gyárában". A technológiai fejlesztéseknek köszönhetően az összegyűjtött adatok mennyisége exponenciálisan növekszik. A folyamatokból származó adat hozzáadott érték, autonóm termelési tényezővé válik az Ipar 4.0 kontextusában. Az immateriális javak megnövekedett jelentősége miatt az országok közötti adózásbeli eltérésekből adódó feszültség is megoldásra vár. A "jövő gyárában" a hozzáadott érték keletkezésének helye eltérhet magától a termelés helyétől, máshol történhet a kutatás-fejlesztés, a marketing vagy például a piackutatás is.

Az országhatárokon átnyúló vállalati határok és a globalizáció eredményeként egyre nehezebb lesz meghatározni a vállalatok és a tevékenységük helyét. A nemzetközi személyzet, a decentralizált, virtuális együttműködés vetette fel a kérdést, hogy hol kell a jövedelemadót megfizetni és milyen szabályozási és megfelelési követelményeknek kell teljesülniük. Mi történjen akkor, amikor a szolgáltatásokat egy olyan országban végzik, ahol a cég még nincs is jelen?

### **2.1.2.8 A számítógépes biztonság**

A jövő új lehetőségeket kínál a vállalatok hálózatba ültetett ökoszisztémájában, ugyanakkor új kihívások jelennek meg az IT biztonság terén. Fenyegetést jelenthet az ipari kémkedés, az adatlopás, egy szabotázs akció, de infrastruktúra kritikus pontjaival szembeni terrortámadások is.

A szabványos biztonság nem elegendő. A szabványosított technikai biztonsági megoldások semmiképpen sem megfelelőek, mivel vakok a modern támadások ellen. Csak egy olyan koordinált intézkedéscsomag lehet célravezető, amely célzottan befolyásolja az egyes infrastrukturális elemek releváns kockázatait, védelmet nyújt, de megfelelő szinten tartja az IT biztonsággal kapcsolatos költségeket.

A számítógépes támadások megelőzésére, azonosítására és kezelésére szolgáló megoldások a számítógépes biztonsági program részeit kell képezzék. A lehető legteljesebb módon biztosítani kell, hogy a berendezések és a feldolgozott adatok biztonságban legyenek, de jogosult felhasználóik számára elérhető módon.

2. táblázat: Biztonsági veszélyforrások [I/15]

| Fenyegetés jellege    | Jellemzője                                | Motiváció                                       | Hatások   |
|-----------------------|---|---|---|
| Hackerek              | ideológia által inspirált                 | új lojalítás: dinamikus, kiszámíthatatlan       | a közvélemény hatása, a jó hírnév elvesztése                        |
| Szervezett bűnözés    | globális, nehéz nyomon követni és üldözni | pénzügyi előny                                  | információ lopás  |
| Bennfentesek          | Szándékos vagy véletlen?                  | elégedetlenség, irigység, pénzügyi előny        | működési zavarok, lopás, hírnév elvesztése                          |
| Hírszerző szolgálatok | Kémkedés vagy szabotázs?                  | Politikai előny, gazdasági előny, katonai előny | Működési zavarok, megsemmisítés, információlopás, hírnév elvesztése |

### 2.1.2.9 Jogi követelményeknek való megfelelés

Az Ipar 4.0-ra való áttérés során a felelős társasági szervezeteknek számos jogi követelményt és szabályozást kell teljesíteniük a szervezeti feladatok részeként azért, hogy a felelősségbiztosítási kockázatokat minimalizálják. Kötelességszegés esetén az automatizálás és a hálózatépítés, valamint a nagy mennyiségű és rendkívül értékes adat kezelésének hibái is végzetesen véget vethetnek mind a vállalatnak, mind a vállalat végrehajtó szerveinek.

A jövő jogi osztályainak jogi szakembereitől a kiváló szakmai szakértelem mellett az üzleti folyamatok mélyreható megértését is el fogják várni. Az innováció növekvő üteme mellett a vállalaton belüli ügyvédeknek kreatívnak kell lenniük ahhoz, hogy a vállalat vezetőségének biztonságos, ugyanakkor egyszerű és gyakorlati megoldásokat tudjanak biztosítani a felmerülő jogi problémákra. Hogy ez megvalósulhasson, interdiszciplináris csapatokként kell dolgozniuk más üzleti egységekkel közösen.

A vállalatok többségében a vállalati érték stratégiai fontosságú részét képezik a szellemi tulajdonjogok, a szabadalmak és a szakértelem. A szellemi tulajdon és a szakértelem védelme nemcsak a vállalat sikeréhez, hanem a folyamatos működéséhez is kulcsfontosságú.

Az egyes országok különféle védelmi szinteket határoznak meg az érzékeny adatok védelmével kapcsolatban, szabályozva ezzel az értéklánc következő szakaszaiban történő felhasználásukat. Ez vonatkozhat például az alkalmazottak személyes adataira, de a különféle licenzekre is.

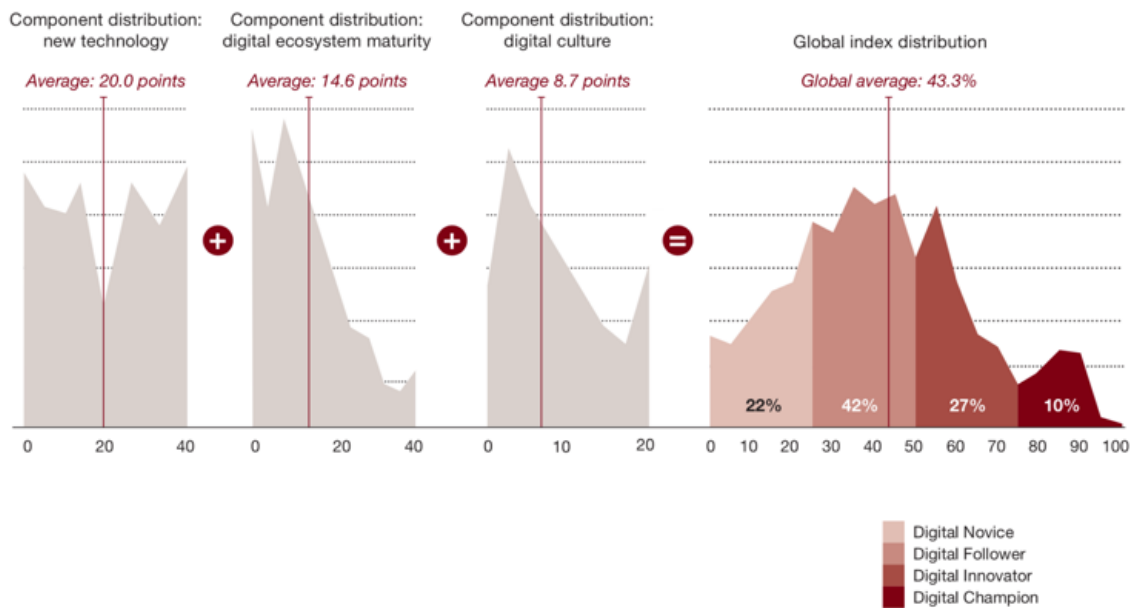
### 2.1.3 A digitális érettség kategóriái, az Ipar 4.0 Készenléti Indexe

Számos nemzetközi és külföldi felmérés, tanulmány készült, melyek az Ipar 4.0-val kapcsolatos fejlettséget vizsgálják, mégsem egyszerű és egyértelmű ezeket a Magyarországon kapott eredményekkel összehasonlítani és pozicionálni hazánkat.

A PwC munkatársai 265 országban 1155 vezetővel lefolytatott interjú alapján négy kategóriát definiáltak a digitális érettség folytonosságának különböző szakaszaiban [I/16]. A Digitális Bajnokok iparáguk élvonalában állnak. A megkérdezett vállalatok a következő iparágakból kerültek ki: az autóipar, az elektronika, az ipari berendezések és a mérnöki, a feldolgozó iparágak, a fogyasztási cikkek és az ipari gyártás.

- *Digitális Kezdő:* A vállalat alkalmaz elszigetelt digitális megoldásokat és alkalmazásokat, de ezek csak a szervezet funkcionális szintjén léteznek.
- *Digitális Követő:* A belső funkciók, pl. a tervezés, a beszerzés, a gyártás, az értékesítés már integráltak és szorosan együttműködnek, de a vállalaton belül csak kevés a tevékenység esetében valósul meg a vertikális digitális integráció. A vállalati kultúra és a munkaerő még nem digitálisan orientált.
- *Digitális Innovátor:* A vállalat digitálisan kapcsolódik külső partnereihez és ügyfeleihez, integrált platformokat használnak az információcserére és az együttműködésre. A horizontális digitalizáció azonban csak a közbenső ellátási láncra korlátozódik, nincs szélesebb ökoszisztéma az ügyfél-megoldások, a technológia vagy az emberek számára. Digitális innovátorok jutalma a digitalizáció. A munkaerőt ösztönözik az új digitális megoldások azonosítására, de fejlődésük korlátozott.
- *Digitális Bajnok:* A vállalat világos stratégiai pozícióval rendelkezik a piacon. Komplex és személyre szabott vevői megoldásokkal, többszintű ügyfél-

interakciókkal támogatja folyamatait. Ezek a vállalatok közel valós idejű, végponttól végpontig terjedő integrációt valósítottak meg, értékláncuk a belső és külső hálózatok összekapcsolódásán keresztül jön létre. Tudják, hogyan alkalmazzák a technológiát az ügyfelek, a partnerek, a műveletek és az emberek összekapcsolására, hogyan teremtsenek új értékeket az ökoszisztémákon keresztül. A digitális bajnokok a digitális kultúrát építették ki új munkamódszerek megalkotásával és jelentős beruházásokat eszközöltek képzésekre és új képességek és készségek fejlesztésére.



3. ábra: A digitális érettség szerinti csoportok a pontszámok alapján [I/16]

Az egyes csoportokba való besoroláshoz olyan digitális érettségi mutatót dolgoztak ki, amelyben a digitális képességek és fejlettség különböző szintjeihez társítottak pontszámokat: legfeljebb 40 pontot adtak a digitális ökoszisztéma érettségére, 40 pontot az új technológiák bevezetésére és 20 pontot a digitális kultúra fejlettségére.

A vállalkozásoknak csupán a 10 százaléka ért el 75 és 100 pont közötti eredményt, ők reprezentálják a digitális bajnok kategóriát. A vizsgált vállalatok 42 százaléka tartozik a Digitális Követők, 27 százaléka a Digitális Innovátorok, 22 százaléka a Digitális Kezdők közé.

Ipar 4.0 Mintagyár Projekt [I/7] négy érettségi szintet határoz meg az Ipar 4.0 vonatkozásában:

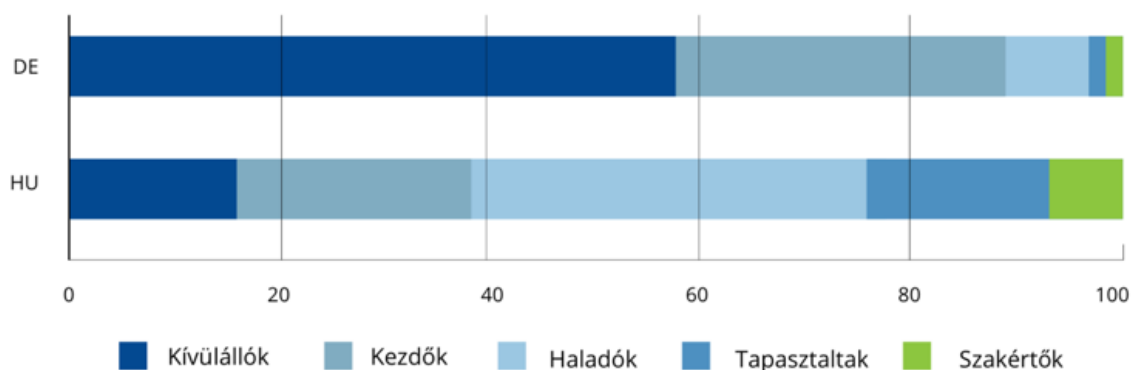
- *Alap szint:* Csak a pénzügyi rendszer digitális.

- *Ipar 4 belépő szint:* A készlet- és a gyártástervezés történik digitális módon. Ez kb. 20% erőforrás hatékonyság növekedést eredményezhet.
- *Ipar 4 megvalósító szint:* A termelési cellák adatai online elérhetők, az adatgyűjtés kiterjed minden erőforrásra és félkésztermékre. Kb. 20% humán erőforrás hatékonyság növekedés érhető el.
- *Ipar 4 kiválósági szint:* A termelés számítógépek segítségével automatikusan vezérelt. A raktárkészletet prediktív információkkal történő csere jellemzi. A költség várhatóan 15%-kal, a raktárkészlet 30%-kal csökken a teljes ellátási láncban, az átbocsátóképesség 10%-kal emelkedik.

A kétféle csoportosítás összevetésekor megállapítható, hogy a PwC által definiált kategóriák nagyobbak és komplexebbek, más távlatokból vizsgálják a vállalatokat, azok együttműködését a mikro és makró környezetükkel, míg a hazai csoportosítás az üzemkapun belüli fejlettséget veszi figyelembe, nem igazán tekint messzebbre, nem elemzi a vállalatok közötti interakciókat, kapcsolatokat, azok integráltságát és fejlettségét.

Az „Ipar 4 kiválósági szint” a másik besorolás szerint nagyjából a „Digitális Követő” -nek feleltethető meg. A kategóriák ilyen nagymértékű eltérése abból adódhat, hogy a magyarországi vállalatok digitális fejlettsége elmarad a piacvezetőkétől.

Az Ipar 4.0 Nemzeti Technológiai Platform Kérdőív projekt [I/8] alapja az IMPULS Alapítványa által kidolgozott Industrie 4.0 Readiness kérdőív és a hozzá tartozó tanulmány [I/17] volt. Mindkét elemzésben ugyanazt a hatfokozatú minősítő skálát használták a vállalatok Ipar 4.0 Készenléti Indexét: 0. szint: Kívülállók, 1. szint: Kezdők, 2. szint: Haladók, 3. szint: Tapasztaltak, 4. szint: Szakértők, 5. szint: Csúcsteljesítők. A német tanulmány a vizsgált cégeket a 3. táblázat szerinti arányban sorolta be az egyes csoportokba.



4. ábra: A német és a magyar Ipar 4.0 Készenléti Index eredmények [I/7]

A magyar felmérésben a minősítési kategóriákat a VDMA felméréssel való összevethetőség érdekében megtartották. A pontozást és az osztályozás módszerét viszont maguk alkották, így a kétfajta skála eltéréseiből adódnak különbségek. Szerintük a magyar helyzet némettel való összevetése (3. ábra) kapcsán levonható az a következtetés, hogy hazánk esetében a megkérdezett vállalatok *„az Ipar 4.0 digitalizációs témában aktívabban vettek részt a kérdőív kitöltésében, míg a német átlag szerint a felmérésben résztvevők kevésbé tűntek fogékonynak a téma iránt.”*

Az eltérést más tényezők (is) befolyásolják, talán ennél nagyobb mértéken is. Hasonlóak a kérdések és azonos a skála, ennek ellenére a kapott eredmények mégsem vethetők össze közvetlenül. Ennek oka lehet:

- Az egyik tanulmány 2015-ben, a másik 2017-ben készült, nem ugyanazt az időpillanatot vizsgálják, ez lényeges lehet, hiszen egy dinamikusan fejlődő kérdéskört vizsgálnak.
- A vizsgált minták összetétele eltér (más szektorokból kerülnek ki a cégek, más arányban).
- A mintán belül más azon cégek aránya, akiket az Ipar 4.0 változások nagyobb mértékben érintenek.
- A kérdések egy jelentős része arra irányul, az adott momentum nem létezik, létezik, de nem megfelelő vagy megfelelő-e. Az ilyen jellegű kérdésekre adott válaszokat szubjektív tényezők befolyásolják (kinek mi számít megfelelőnek), ami önmagában is megnehezít bármiféle korrekt összehasonlítást.

Egy másik megállapítás a magyar elemzésből: *„Ennek ellenére téves lenne azt a következtetést levonni, hogy a német vállalatok ugyanott járnak, ahol mi, hiszen náluk azok, akik foglalkoznak a témával, előrébb tartanak, s ezt igazolja a csúcsteljesítők megléte és aránya is.”*

A német és magyar eredményeket tartalmazó diagram alapján egyértelműen az látszik, hogy a magyar helyzet minden szempontból jobb, fejlettebbek a vállalatok az Ipar 4.0 vonatkozásában. Nem tűnik reálisnak az eredmény. A csúcsteljesítők megléte és aránya nem magasabb Németországban a vizsgált vállalatok tekintetében, a német felmérés szerint a vizsgált vállalatok 0%-a tartozik a legfelső kategóriába.

#### 2.1.4 Az ipar 4.0 hatása a vállalatokra

A gyorsan változó vevői igények következtében a termékek életciklusa lerövidül, így 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 mind egyedi beállításokat, azonosítást és nyomon követést igényelnek. Ki kell dolgozni a pótalkatrész ellátás metodikáját is [I/15]. Mindezeket a digitalizáció és a hálózati működés révén tudja megvalósítani az Ipar 4.0 vállalata. A szükséges szimulációk és gyors prototípus gyártás (pl. additív termelés) lerövidíti a fejlesztés és piacra vitel idejét, míg a gyors és rugalmas gyártósorok mindig annyit és azt termelnek, amit a vevő szeretne. A termelési adatok azonnal rendelkezésre állnak, ezáltal hatékonyságot és magas minőséget eredményező döntéseket tudunk hozni. Magának a szervezetnek is meg kell újulnia, alkalmazkodnia kell a változásokhoz.

A negyedik ipari forradalom várható hatásai a termelő vállalatokra:

- lényegesen csökkenni fognak a készletek,
- csökkennek a logisztikai és anyagkezelési költségek,
- rövidebbek lesznek az átfutási idők.

A digitalizáció bevezetése, az Ipar 4.0 forradalom megjelenése gyökeresen meg fogja változtatni a gyártási folyamatokat. Az Ipar 4.0 a termelésben fejti ki legnagyobb mértékben a hatását, de a felhasznált módszerek és eljárások különbözőek lehetnek. Beépíthetők szenzorok, így érzékelhetők és jelezhetők az eltérések a termelési folyamatban, ugyanakkor számos statisztika és értékelés készíthető a begyűjtött adatok felhasználásával, továbbá hasznos lehet a karbantartási munkák ütemezésénél is, így csökkenhetnek az állásidők. A gépek egy nagy összefüggő hálózatba köthetők. A fejlett architektúrának és vezérlésnek köszönhetően a gépsor, géppark rugalmasan és gyorsan átalakítható, ha a gyártás ezt kívánja meg. A termelés újszerű támogatása valósulhat meg a kiterjesztett valóság alkalmazásával, például okos szemüveg használatával, mely a termelési folyamat több pontján is hasznos segítség lehet [I/14]. A negyedik ipari forradalmat a termelőszektorral kapcsolatban szokták említeni, de nem csak az üzemekben találkozhatunk ezekkel a megoldásokkal. Az Ipar 4.0 hatására a hagyományos gazdaságok okosfarmokká alakíthatók, már ki sem kell

mozdulnunk lakásunkból, ha méretre szabott ruhát szeretnénk vásárolni és vannak országok, ahol a drónok pár perc alatt házhoz szállítják a megrendelt ételt.

Az Ipar 4.0 az automatizáció, a dolgok internete és a big data segítségével soha nem látott mértékben alakítja át az ipari szektorokat. Az intelligens eszközök hatalmas mennyiségű adatot képesek gyorsan begyűjteni, feldolgozni és értékelni. Ezen információk teszik lehetővé a gyorsabb és hatékonyabb működést, a termelés optimalizálását, amivel jelentős költségmegtakarításokat érhet el a vállalkozás.

Az Ipar 4.0 Nemzeti Technológiai Platform - Kérdőív projektjében [I/8] az Ipar 4.0 vízióját VDMA's IMPULS-Stiftung: Industrie 4.0 Readiness [I/17] a következő fogalmak segítségével határozták meg:

- Horizontális integráció: Az okos gyár alkalmazkodik környezetének minden új körülményéhez, a termelési folyamatait önmaga optimalizálja, ami a beszállítókkal és az vevőkel való integrációval valósul meg.
- Vertikális integráció: Az okos gyárban az emberek, a gépek, berendezések és az egyéb erőforrások egymással digitális módon összekapcsolódva, kiberfizikai rendszerek segítségével kommunikálnak.
- Okos termékek: saját gyártási folyamatukról információkkal rendelkeznek, továbbá képesek arra, hogy további adatokat gyűjtsenek gyártásuk és használatuk fázisairól, majd azokat továbbítsák. Így lehetővé válik a valós termékadatokon alapuló kínálat kialakítása. Az ember maga az értékteremtés vezérlője, ugyanakkor ő áll a szolgáltatás középpontjában is.

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/18].

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 autóiipari gyártás paradigmaváltásának okai [I/19]:

- 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/20], 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.

## 2.2 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 összefoglaljam 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** végezek az érintett témakörökben, a vizsgálat során megmutatkozhat a tématerület újszerűsége, aktualitása és fontossága. A szakirodalmak feldolgozása és elemzése 2021-ben készült, majd később frissítésre került.
- **Összehasonlításokat** fogok végezni a hagyományos, lineáris gyártósor alkalmazásával működő, illetve a mátrixgyártást megvalósító termelési rendszerek között. Meg fogom vizsgálni, 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.

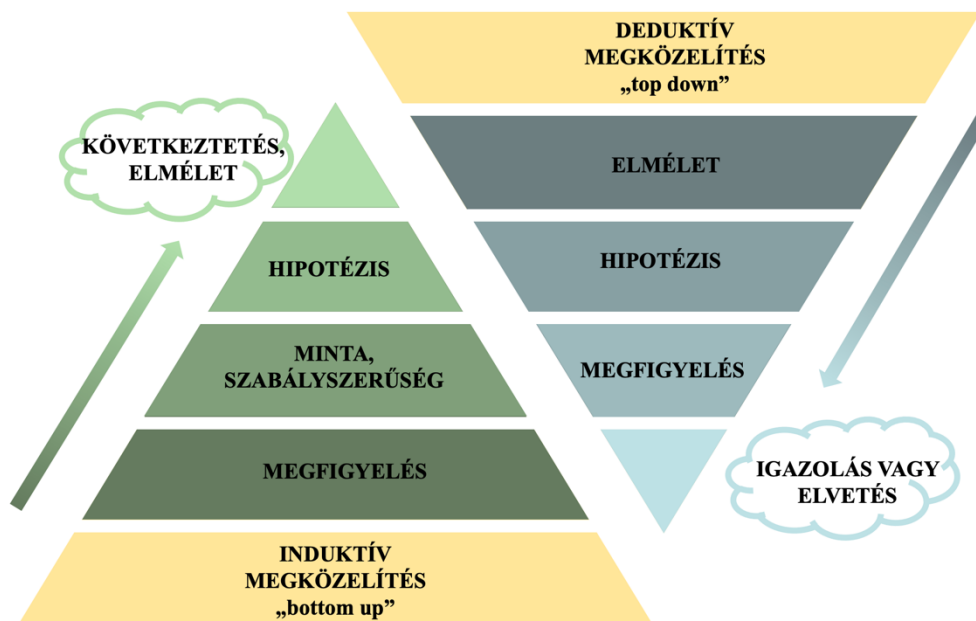
### 3 A DISSZERTÁCIÓ MÓDSZERTANA, A KUTATÁS SORÁN ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

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 (5. ábra) 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/21].

Az induktív módszert alkalmaztam az optimalizálással kapcsolatos kutatási célok megvalósítása érdekében.



5. ábra: Az induktív és a deduktív megközelítés lépései (saját szerkesztés)

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/21]. 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.

Deduktív gondolkodásmódot alkalmaztam, amikor más szakemberek, kutatók publikációit olvasva felmerült bennem a további elemzés igénye, illetve amikor más szerzők megoldási módszerének implementálása tűnt célravezetőnek egy-egy probléma legyőzésére [I/22].

A hazai és nemzetközi források feldolgozása során szisztematikus irodalomkutatást végeztem. 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/23]. 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 módszerének kiválasztása után, a főbb tudományos eredmények összefoglalását követően feltérképezhetők a kevésbé kutatott területek és a szűk keresztmetszetek [I/24]. 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/25], a Scopus [I/26] és a Web of Science [I/27], stb.) adatbázisokat használtam.

A releváns szakirodalmi ismeretek feltárása és áttekintése után lehetőségem nyílt beazonosítani a mátrixgyártás építőelemeit, funkcióit, kapcsolati rendszerét és mindezek segítségével tudtam meghatározni annak általános modelljét. Ennek részeként először részletesen bemutatom a mátrixgyártás gyárának főbb szegmenseit (a gyártócellákat, a közlekedési útvonalakat, a csomópontokat, a bejáratot, a kijáratot, az áruraktárat, az AGV raktárat, a szerszámraktárat).

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

A modell megalkotása során többféle célfüggvényt felírtam:

- a gyártócellák elrendezésének optimalizálására a  $Z_1$  függvényt, mellyel céloom minimalizálni a cellák közötti összes anyagmozgatási munkát figyelembe véve a köztük lévő távolságot és az anyagáramlást,
- az AGV útvonalak optimalizálására a  $Z_2$  függvényt, ennek segítségével minimalizálni az AGV-k szállítási idejét az útvonal hosszak és az átlagsebesség alapján, feltételezve, hogy a gyártócellák elrendezése már ismert,
- az AGV-sorrend optimalizálására a  $Z_3$  függvényt, mellyel az AGV-k útvonalkiszolgálási sorrendjének optimalizálható a gyártási átfutási idő minimalizálása érdekében,
- az integrált optimalizálás során a teljes gyártási idő minimalizálása volt a cél.

Meghatároztam a célfüggvények komponenseit, az azokhoz tartozó korlátozásokat.

A modellalkotás fejezetei után az javítási, optimalizációs lehetőségeket vettem számba.

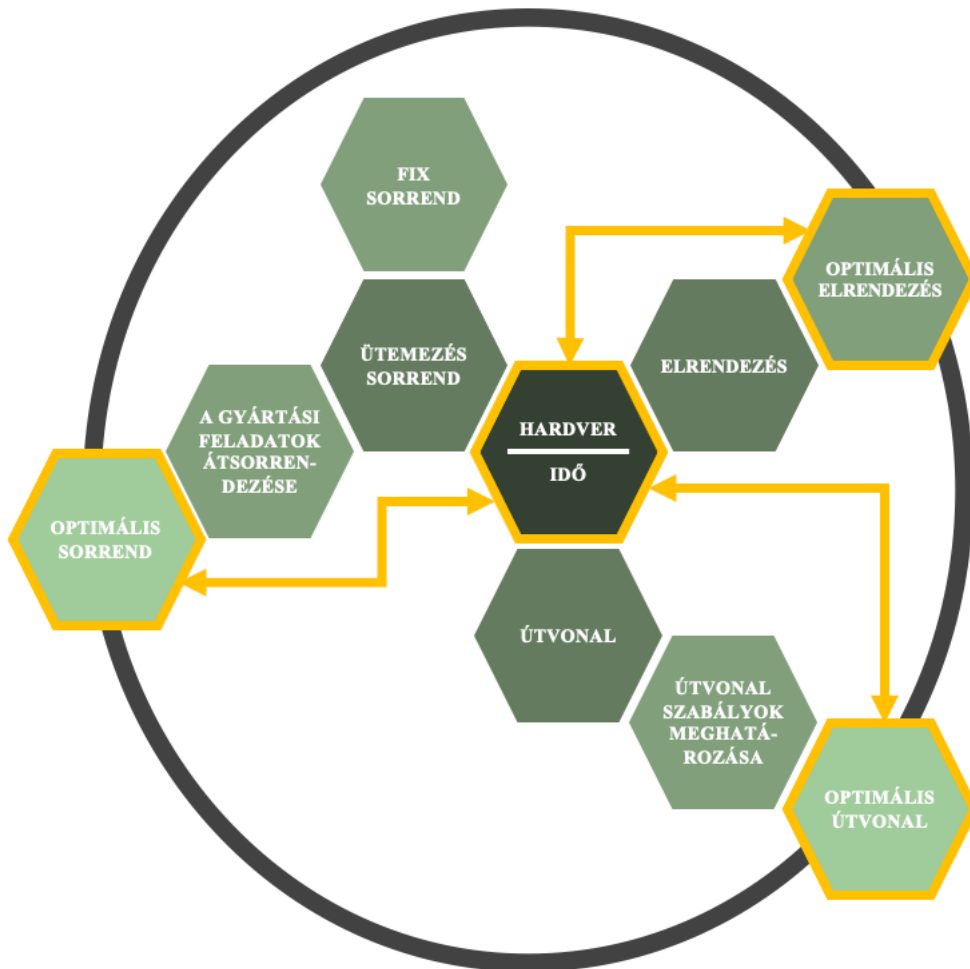
A mérések elvégzésére és az elméletek kipróbálására, validására egy saját tervezésű, egyedi fejlesztésű szimulációs szoftver került elkészítésre.

Az optimalizációs folyamatot 3 részproblémára bontottam (6. 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].

A három részprobléma önállóan is vizsgálható, ugyanakkor hatással vannak egymásra:

- ha megváltozik a gyártandó termékek listája, más cella-művelet hozzárendelés (layout) lehet kedvezőbb, az AGV-k más útvonalakat fognak bejárni,

- ha megváltozik a layout, az hatással lesz az AGV-k útvonalára és hiába változtatlan a terméklista, más gyártási időt fogunk kapni.



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

Első lépésben meg kellett határozni az anyagmozgatási útvonalak kiválasztásának módszerét, majd az AGV-k útvonalválasztási stratégiáját az alapkonzfiguráció 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 ( $\omega$ ). A tömbök adattal való feltöltését végző algoritmus számba veszi a lehetséges útvonalakat és az  $\omega$  számú legrövidebbet eltárolja. A tömb minden sora egy útvonalat reprezentál, annak csomópontjainak megadásával, továbbá tartalmaz két segédváltozót, az útvonal tényleges

fizikai hosszát és a csomópontok darabszámát. A tömb sorai az útvonalhossz szerint monoton növekvő sorrendbe vannak rendezve.

Az anyagmozgatási útvonalak meghatározásakor az egyformán kedvező útvonalak esetében biztosítani szeretném, hogy az egyforma hosszúságú útvonalak egyenletes terhelés alá essenek, ezért 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 időszelést kap a működése során és ezt folyamatosan sorban egymás után kapják meg az egyes folyamatok. A Round-robin elv több olyan területen is ismert, ahol a résztvevők egyenlő eséllyel vesznek részt egy folyamatban, ilyen például processzorok időosztása vagy a sportversenyeken a körmérkőzés [I/28]. Logisztikai vonatkozású alkalmazásra példa az, amikor igazságos elosztási stratégiára van szükség olyankor, amikor több katasztrófa sújtotta régió között a kereslet és a rendelkezésre álló erőforrások alapján kell megszervezni a logisztikai folyamatokat. Egy Round-robin alapú mohó algoritmus használata igazságos elosztására ad lehetőséget. Az algoritmusok iteratívan 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/29].

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: a keresztezés, a mutáció, a szelekció [I/30]. 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/31].

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/32].

A genetikus algoritmussal kapcsolatos alapfogalmak [I/32], [I/33], [I/34]:

- populáció: az adott probléma megoldásának a részhalmaza,
- kromoszóma: egy lehetséges megoldás,

- gén: egy kromoszómának az egyik elemi része,
- fitness függvény: olyan függvény, amely a megoldást bemenetként veszi, és kimenetként a megoldás alkalmasságát adja, egyfajta jósági mérce
- genetikai operátorok: ide tartozik a keresztezés, a mutáció és a szelekció,
- keresztezés: két régi egyedből két újabb keletkezik, úgy, hogy minden korábbi gén megmarad úgy, hogy az egyik egyed génje az egyik utódba, a másik egyed ugyanazon génje a másik utódba kerül [I/30],
- mutáció: egy egyed valamelyik génje véletlenszerűen megváltozik,
- szelekció: alkalmazásának két célja lehet, az egyik a szülők kiválasztása az új egyedek létrehozásához, a másik a következő generációba kerülő, túlélő egyedek meghatározása [I/35].

A gyártási lista optimalizálásakor többféle algoritmust és algoritmus alapú alkalmazást alkalmaztam, ezek a következők voltak:

- Huffman-kódolás,
- DEFLATE algoritmus,
- GNU gzip alkalmazás,
- LZ77 algoritmus,
- GNU shuf alkalmazás.

A gyártási lista információtartalmának vizsgálatokor 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/36]. A Huffman-kódolás alkalmazási lehetőségei: faxok és szövegek továbbítására, hagyományos tömörítési formátumok előállítására (mint például a GZIP) és a multimédiás codec-ek, mint a JPEG, PNG és MP3 [I/37].

Az elméleti háttér tényleges megvalósításához az iparban ismert DEFLATE [I/38] algoritmust használtam a GNU gzip [I/39] 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. A formátum könnyen megvalósítható olyan módon, amelyet nem védenek szabadalmak.

Az LZ77 [I/40] egy szótár alapú tömörítést alkalmazó veszteségmentes adattömörítési algoritmus. Lényege, hogy a tömörítés során egy csúszó ablakot használ, amiben a már feldolgozott adatok tárolódnak és a korábban látott adatsorokat keresi még feldolgozásra váró adatokban (a kereső pufferben). Ha talál egyezést, akkor az egyezés hosszát és távolságát tárolja el, nem magát az ismétlődő szekvenciát.

A gzip egy adatok tömörítésére és kibontására fejlesztett számítógépes alkalmazás. Alapja a DEFLATE algoritmus, mely a Lempel-Ziv által készített LZ77 és a Huffman-kódolás kombinációja. Az alkalmazás a korai Unix rendszereken használt compress algoritmus szabad szoftveres helyettesítése készült, a GNU projektben való használat céljára [I/39].

A GNU shuf parancs a sorok véletlenszerű permutációjának előállítására szolgál [I/41]. Ezen alkalmazás segítségével készítettem további 100db véletlenszerűen sorrendezett listát az eredeti gyártási listából.

## 4 IRODALOMKUTATÁS

Ebben a fejezetben szisztematikus irodalomkutatás segítségével lehatárolom a pontos kutatási témát.

### Szisztematikus irodalomkutatás

A negyedik ipari forradalom mind a termelési, mind a szolgáltatási szférában jelentős változásokat indukál. Az Ipar 4.0 koncepció egyik legfontosabb célja az európai ipari gyártás kiszervezésének mérséklése, illetve a magasabb hozzáadott értékű termelés felé történő elmozdulás elősegítése. Az Ipar 4.0 technológiák és az azokhoz kapcsolódó különböző módszerek és eljárások révén a rendszerek rugalmassága és hatékonysága nagymértékben növelhető. Jelen irodalomkutatás célja, hogy áttekintést adjon a szakirodalomban megjelent azon publikációkról, melyekben az Ipar 4.0 koncepció adta lehetőségek kerülnek bemutatásra a gyártás optimalizálására vonatkozóan.

A fejlődést a gépek és eszközök összekapcsolódásának, a gazdaság nagyméretű intelligens információs rendszerekbe való integrálódásának folyamata jellemzi. Az ipar legfontosabb feladata a költséghatékony termékgyártás, de ehhez elengedhetetlen az ezt elősegítő és támogató anyag- és információáramlási rendszer megléte. Mindez ma már elképzelhetetlen fejlett informatikai rendszerek és eszközök nélkül. A folyamatokra jellemző a digitalizáció, a hálózatosodás és nem utolsósorban az automatizáltság egyre magasabb foka. Ha az értéklánc teljes hosszában optimalizálásra kerülnek a termelési folyamatok, akkor növekszik a gyártási folyamatok rugalmassága, sebessége, minősége, termelékenységük és csökkennek az állásidők [1/42].

A disszertáció témakörének megfelelően az irodalomkutatást két nagyobb területre osztottam. Elsőként az Ipar 4.0 fogalomhoz, majd a mátrixgyártáshoz kapcsolható publikációkat vettem elemzés alá.

### 4.1 Ipar 4.0

A lehetséges adatbázisok (Google Scholar, ResearchGate, ScienceDirect [1/25], Scopus [1/26], Web of Science [1/27], stb.) közül a Scopus-t választottam. Három kifejezésre és ezek kombinációira végeztem el a keresést, ezek az "industry 4.0", az "optimization" és a "production" fogalmak voltak. Az eredményeket a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat: A keresés eredményei (saját szerkesztés [I/26] alapján)

| Kulcsszó   | Találatok száma | Találatok száma | Találatok száma |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|
|  | 2020-ig         | 2022-ig         | 2024-ig         |
| "production"                                       | 3 249 432       | 3 716 894       | 4 236 506       |
| "optimization"                                     | 1 705 962       | 2 028 741       | 2 443 573       |
| "optimization" AND "production"                    | 133 776         | 163 148         | 201 689         |
| "industry 4.0"                                     | 14 331          | 26 186          | 39 346          |
| "industry 4.0" AND "production"                    | 4 526           | 8 027           | 11 721          |
| "industry 4.0" AND "optimization"                  | 1 096           | 2 162           | 3 616           |
| "industry" 4.0 AND "optimization" AND "production" | 579             | 1 053           | 1 659           |

#### 4.1.1 Leíró elemzés

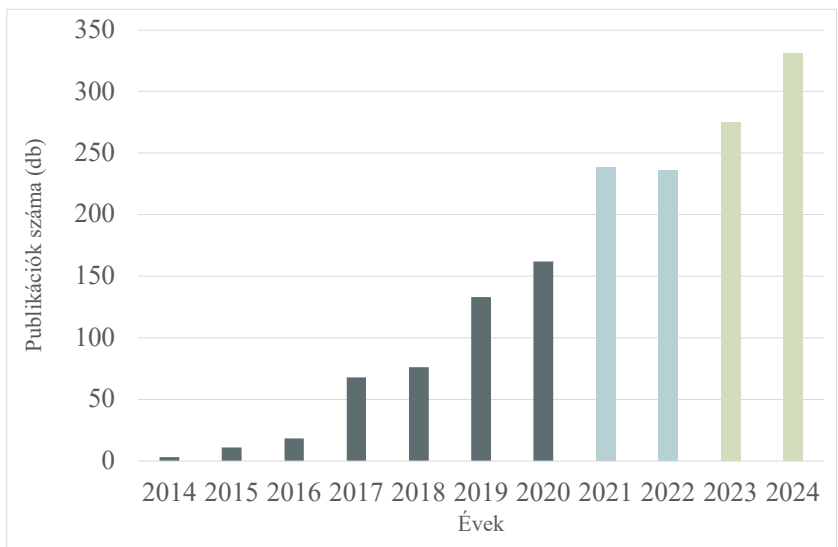
A szakirodalom áttekintésekor Scopus adatbázisában az "industry 4.0", az "optimization" és a "production" kifejezésekre együttesen keresve 1435 cikk volt található, melyekben a manufacture, scheduling, embedded systems (4. táblázat 1.oszlopa), míg 2024-re a digital twin, decision making, internet of things kulcsszavak fordultak elő a leggyakrabban.

4. táblázat: Kulcsszavak (saját szerkesztés [I/26] alapján)

| Kulcsszó                | Találatok száma | Találatok száma | Találatok száma |
|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                         | 2020-ig         | 2022-ig         | 2024-ig         |
| Industry 4.0            | 308             | 590             | 924             |
| Optimization            | 157             | 255             | 352             |
| Manufacture             | 85              | 111             | 111             |
| Embedded Systems        | 52              | 91              | 109             |
| Scheduling              | 50              | 86              | 94              |
| Decision Making         | 47              | 98              | 157             |
| Industrial Revolutions  | 46              | 70              | 87              |
| Internet Of Things      | 46              | 88              | 136             |
| Industrial Research     | 45              | 74              | 101             |
| Production Control      | 41              | 98              | 132             |
| Cyber Physical System   | 40              | 66              | 79              |
| Digital Twin            | 37              | 83              | 150             |
| Production Process      | 36              | 61              | 91              |
| Artificial Intelligence | 35              | 72              | 124             |
| Manufacturing Process   | 34              | 58              | 79              |
| Production System       | 34              | 66              | 109             |
| Simulation              | 28              | 49              | 78              |
| Process Control         | 27              | 50              | 75              |
| Big Data                | 26              | 43              | 57              |
| Automation              | 25              | 42              | 63              |
| Optimisations           | 15              | 78              | 162             |
| Smart Manufacturing     | 24              | 61              | 141             |
| Machine Learning        | 15              | 46              | 105             |

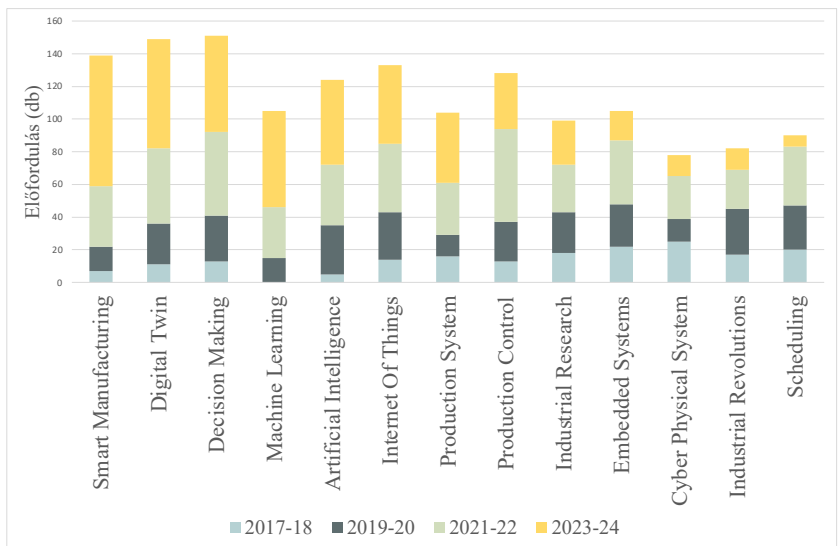
A továbbiakban azon szakirodalmi forrásokat tekintem át, melyek mindhárom kulcsszóra találatot adtak.

A választott témakörben megjelent cikkek – az „Industry 4.0” kifejezés újszerűségének köszönhetően – mind a közelmúltban íródtak (7. ábra). A legkorábbi publikáció 2014-ben jelent meg [I/43]. Az egyes években megjelent írások száma folyamatosan nő, ez is mutatja a téma növekvő fontosságát. A cikkek legnagyobb része 2019-ben és azt követően jelent meg.



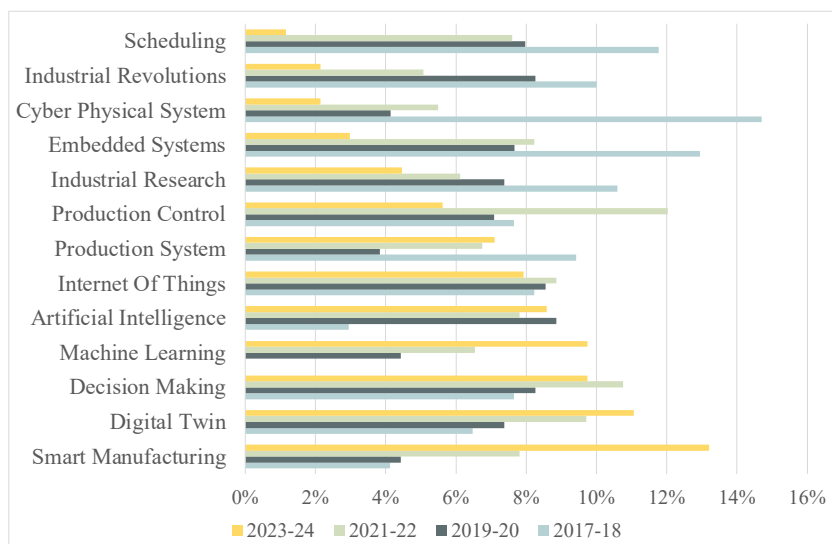
7. ábra: A megjelent cikkek száma (saját szerkesztés [I/26] alapján)

A leggyakrabban használt kulcsszavak megoszlását szemlélteti a következő két ábra évenkénti bontásban.



8. ábra: A kulcsszavak előfordulásának száma (saját szerkesztés [I/26] alapján)

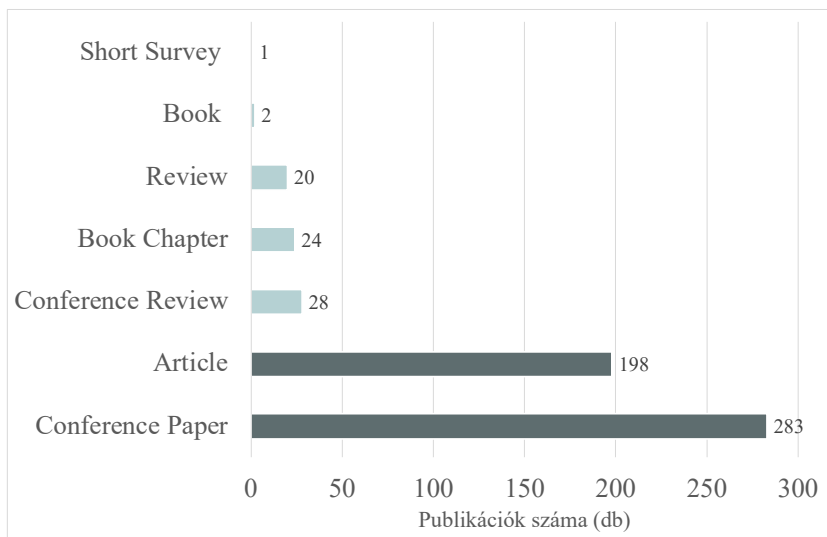
A 8. ábra kulcsszavak előfordulásának számát, míg a 9. ábra ezek arányát mutatja az adott évben megjelent (és a vizsgálatba bevont) publikációk arányában.



9. ábra: A kulcsszavak előfordulásának gyakorisága (saját szerkesztés [I/26] alapján)

Az előző két ábrán is látszik, hogy vannak kulcsszavak, melyek egyre kevésbé népszerűek, (Industrial Revolutions, Scheduling), de találhatóak olyanok is, melyeket gyakrabban jelölnek meg az újabb publikációkban (Smart Manufacturing, Digital Twin).

Az eredeti elemzésbe bevont cikkek hat nyelven íródtak: angol (556), német (16), orosz (3), kínai (2), spanyol (2), török (1), a továbbiakban az angol nyelvűekre szűkítjük a kutatást.



10. ábra: Publikációk száma a dokumentum típusa szerint (saját szerkesztés [I/26] alapján)

A publikációk a dokumentum típusa szerint is csoportosíthatók 10. ábra. Az elemzést az olyan cikkek és konferencia anyagok körére szűkítjük, melyekben szerepelt kulcsszóként az “industry 4.0” és az “optimization”. Az áttekintendő dokumentumok száma így 481-re redukálódott.

#### 4.1.2 Tartalom vizsgálat

A Miskolci Egyetem Logisztikai Intézete az elsők között kapcsolódott be az Ipar 4.0 logisztikai vonatkozásainak kutatásába. Ezt számos olyan publikáció is jelzi, melyeket az Intézet kollektívája készített az elmúlt néhány esztendőben. Ezek közül a következő főbb kutatási területeket emeljük ki: olyan innovatív üzleti modellek kidolgozása, melyek alkalmasak fenntartható ellátási láncok működtetésére, különös tekintettel a kihelyezés lehetőségeire [I/44]; milkrun alapú üzemen belüli ellátási folyamatok tervezési és modellezési aspektusai autóiipari környezetben [I/45]; mesterséges intelligencia módszerek alkalmazása logisztikai folyamatok tervezésében és irányításában, különös tekintettel a kiberfizikai termelési környezetre [I/46]. A tanulmányban rövid áttekintést adtunk az Ipar 4.0 témakörben az elmúlt öt évben megjelent szakcikkekről és ezen szakirodalomra vonatkozóan elvégzett elemzéseinkről.

Az automatizált megoldásokkal a kiberfizikai rendszerekben a munkavállalók jelenléte nem szűnik meg, a munkaterületek fognak megváltozni. Az emberi munkaerő rendszerbe való integrálását segíthetik a jövőbeli munkaterületekkel kapcsolatos trend-bebecslések [I/47]. A fejlesztéseknek azokra a megoldásokra kell összpontosítaniuk, melyek segítségével csökkenthető a munkaerőköltség, az energiaköltség és a gépköltség relatív aránya. A nemszött kelmék gyártása esetében ez egyrészt önoptimalizáló gépek alkalmazásával, másrészt olyan rendszerek használatával érhető ez el, melyek lehetővé teszik a gyártás során keletkező nagy mennyiségű adat biztonságos feldolgozását [I/48].

A jelenlegi CPS-ekben az adatok a gyártóberendezésekből gyűjthetők össze. Az összegyűjtött adatok a berendezés működési állapotát írják le. Az MTConnect egy adatgyűjtési protokoll, mely egyre népszerűbb a szerszámgépek vonatkozásában. További adatok gyűjthetők a számítógépes gyártásirányítási rendszer (MES) segítségével. Az MTConnect adatok és az MES adatok általában külön rendszerekben találhatóak. Android eszközök és felhőalapú számítástechnikai hardverek használatával az MTConnect adatok összekapcsolhatók a termelési adatokkal [I/49].

Az adatok rögzítése, tárolása és elemzése egyre nagyobb jelentőségű lesz. Főként a KKV-k körében az informatikai rendszerek csak részlegesen valósultak meg. Olyan tanulási koncepcióra van szükség, amely lehetővé teszi a résztvevők számára, hogy

megismerkedjenek a szükséges technológiákkal, a Digital Twin (DT) megvalósításának nehézségeivel és alkalmazásának előnyeivel [I/50].

A széles körben alacsony automatizáltsággal rendelkező kis- és középvállalkozások esetében nem elegendő csak az időtől függő pozícióadatokból álló információ ismerete. A termelési rendszerről csak akkor kaphatunk átfogó képet, ha figyelembe vesszük a munkavállalók és a termelési eszközök mozgásának további információit is. Biztosítani kell a kiberfizikai folyamatoknak a valós modellel való maximális összhangját, ennek érdekében multimodális adatgyűjtést és értékelést kell végezni. Mivel a KKV-k termelési adatainak adatbázisa heterogenitása és minősége miatt a Digitális Iker megvalósításához általában nem megfelelő, implementálni kell az érzékelő alapú követést és a gépi látás segítségével történő adatgyűjtést is [I/51].

A kamera-alapú érzékelő technológiák alkalmazásával hatékonyabbá és gazdaságosabbá válnak a logisztikai és termelési rendszerek folyamatai. A különböző adatforrások egyesítése a folyamatok javulásához vezet. A szenzoradatokkal kibővített termelési és logisztikai adatok segítségével optimalizálható a CPS vezérlése [I/52]. A CPS három pillére a gyártósor (termelés), a logisztika és a létesítmények (épületautomatizálás). Azonosítottak egy új csoportot, amely fejlett adatfeldolgozáson, IoT alapú M2M protokollon, valamint gépi tanulási és tudásképzési algoritmusokon alapul, felhő alapú platformot használva. Ez a digitális funkcionalitás szükséges ahhoz, hogy a valós idejű információmegosztás és az alrendszerek automatizálási interakciója a terméktervezéstől a logisztikai rendszerig megvalósulhasson [I/53].

A QoS (Quality of Service) követelményeknek való megfelelés a rendszerelemek késleltetésének csökkentésével és a megbízhatóságuk növelésével javítható. A technológia nyújtotta lehetőségek jobb kiaknázásához kulcsfontosságú az IoT és a CPS rendszerek grafikon alapú elemzése és optimalizálása [I/54].

A textilgyártóknak is meg kell küzdeniük azzal a tendenciával, hogy a sorozatnagyságok csökkennek, míg a termékváltozatok száma növekszik. A változó piaci trendeknek való megfelelés egyik lehetősége a CPPS (Cyber-Physical Production Systems) és a kognitív gépek alkalmazása. Egy önoptimalizáló rutin lehetővé teszi, hogy a szövőgép önállóan ki tudja számítani az optimális paramétereket, aminek köszönhetően a beállítási idő negyedére csökken a kézi gépbeállításhoz képest [I/55].

A vevői igények diverzifikálása, a növekvő munkaerőköltségek, az energiaforrások költségeinek növekedése jellemzi a feldolgozóipart. A problémák megoldása érdekében intelligens gyártási rendszereket (SMS) fejlesztenek. A Smart Manufacturing (SM) a beszerzést, a termelést, a logisztikát, a szolgáltatásokat és a termékeket kapcsolja össze a hálózattal és valós időben ellenőrzése alatt tartja a teljes termelési folyamatot. A CPS a valós idejű információcsere és a felhő rendszerekkel összekapcsolt tárgyak internete (IoT) segítségével teszi lehetővé a gyártás számára a termékfejlesztés optimalizálását és a termelési rendszer teljes ellenőrzését[I/56].

Az Ipar 4.0 bevezetése és a kiberfizikai rendszerek gyártásának gyors fejlődése, valamint kis mennyiségű és személyre szabott termékek iránti növekvő kereslet hatalmas kihívást jelent a hagyományos gyártási rendszerek számára. A gyors iterációra vonatkozó termelési követelményeknek való megfelelés, valamint az agilis és hatékony gyártási erőforrás-allokáció megvalósítása érdekében ontológiai alapú erőforrás-újratelepítési módszer alkalmazható [I/57]. Az ontológiai alapú módszer javíthatja a berendezések intelligenciáját, ugyanakkor csökkentheti az energiafelhasználást és növelheti a termelés hatékonyságát[I/58].

A vevői igények folyamatos változásából adódó bonyolultság és bizonytalanság miatt a gyártási rendszer (MS) tervezési tevékenysége ördögi problémának (wicked problem) tekinthető. A mesterséges intelligencia alapú tervező asszisztensek az emberek kognitív képességét használják ki a bizonytalanság és a kreativitás kezelésében, az AI nagyobb számítási erősségeit használják fel a nagy mennyiségű adat elemzésében [I/59].

Az intelligens gyár (smart factory) az Ipar 4.0 fogalmán alapul, a kiberfizikai rendszerekkel és a tárgyak internetével kapcsolatos technológiákat és fogalmakat jelöli. Az intelligens gyárakban a számítógépes fizikai rendszerek figyelemmel kísérik a fizikai folyamatokat, létrehozzák a fizikai világ virtuális példányát, és decentralizált döntéseket hoznak. A CPS-ek valós időben kommunikálnak és együttműködnek egymással. A smart shop floor architektúrája fizikai rétegre, kommunikációs rétegre és a logikai rétegre osztható fel. A fizikai rétegek közötti kommunikáció során a kommunikációs réteg átalakítja az üzenetet, az autonóm intelligenciaügynökök logikai rétegben végzett ütemezési döntései a fizikai entitásokhoz továbbítódnak, a fizikai réteg ütemezési parancsokat hajt végre és egyidejűleg frissíti a státuszát logikai réteg felé, így dinamikus ütemezése valósítható meg[I/60].

Nem olyan régen az IT-szolgáltatásokat egyéni kiszolgáló számítógépekhez rendelték, ami bonyolult karbantartást és alacsonyabb szintű megbízhatóságot eredményezett. Ma a felhőinfrastruktúrákban futó szolgáltatások dinamikusan és automatikusan rendelődnek hozzá a szervergépekhez, mindez a karbantartás csökkenéséhez és megbízhatóság javulásához vezetett. Hasonló okokból a CPS alkalmazások erőforrásmegosztása nélkül nem lehet hatékonyan végrehajtani a feladatokat. A fejlesztők, a telepítők és a karbantartók nem tudnak lépést tartani a felmerülő igényekkel, mivel azok bonyolultsága és komplexitása egyre gyorsabb ütemben növekszik. Felmerül a kérdés, hogy megoldást nyújthat-e az informatikai ipar mintájára a CPS infrastruktúrájának virtualizálása [I/61]. A létfontosságú folyamatparaméterek (VPP, vital process parameters) intelligens monitorozása és a Zero Defect Manufacturing (ZDM) minőségfejlesztése és jövőképe együttesen arról gondoskodnak, hogy a folyamatlánc minden egyes lépése meg fog felelni az előírásoknak. A szenzoroknak és a monitoring rendszernek köszönhetően a folyamatok során részletesen dokumentálható a CPS rendszer minden eseménye [I/62].

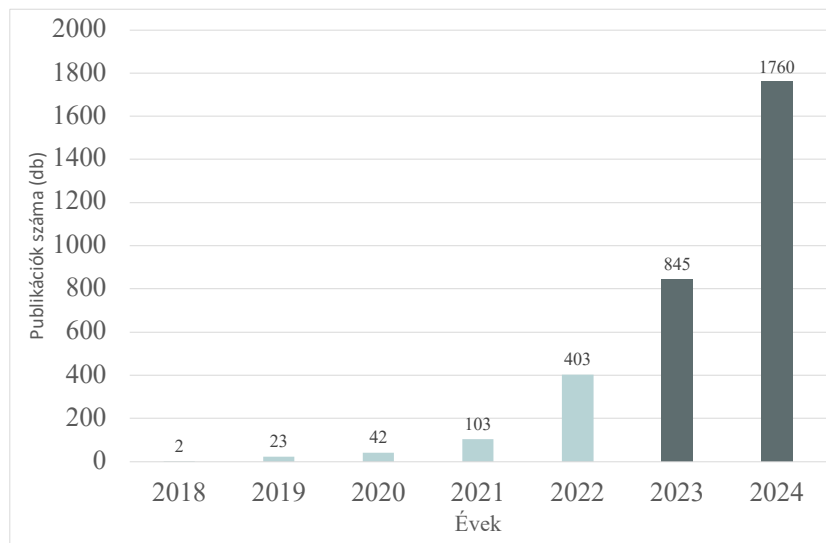
A feldolgozóiparnak a legmagasabb minőségű termékekre és szolgáltatásokra van szüksége ahhoz, hogy megőrizhesse versenyképességet a fogyasztói piacon. Az Ipar 4.0 a Smart Factory, a kiberfizikai rendszer és az IoT fogalmakon keresztül jelentős lehetőségeket kínál a minőségirányítás területén is [I/63]. A virtuális üzembe helyezés (VC, virtual commissioning) a jövőbeni szimulációs megoldások egyik fő alkalmazási területe lehet az autópárhazban. Új alkotóelem integrálása esetén, még mielőtt bármilyen fizikai változtatást végeznének a gyárban, a szimuláció lefuttatható és siker esetén az eszköz visszajelzést küldhet az újrakonfigurálási folyamat végrehajtására a valódi gyári környezetben [I/64].

A CPS, a DT és a Big Data hármas kombinációja alapozza meg, a gyártó üzem gépeinek döntéshozatali autonómiáját és önszabályozásának lehetőségét. A kombinált CPS-DT architektúra lehetővé teszi az erőforrások áramlásának stratégiai szintű optimalizálását [I/65]. A digitális ikrek robusztussága és pontatlansága komoly aggodalomra adhat okot, különösen akkor, ha az önállóan kifejlesztett gyártási rendszerek és a megfelelő digitális ikrek akadályozzák egymást a gyártási munkafolyamatban, és veszélyeztetik a gyártási rendszerek megfelelő viselkedését. Biztosítékok (futás közbeni megszakítók) hozzáadásával a probléma kezelhető [I/66].

Az Ipar 4.0 paradigmát a gyártási folyamatok minden szintjén jellemzi a gyártás egységeinek autonóm viselkedése és azok egymással való összekapcsolódása. Kulcsfogalom ezen a

területen a rendszerek szemantikai interoperabilitása. A formális koncepcióelemzés (FCA) alkalmazható különböző tudományos területeken, ilyenek például a mesterséges intelligencia és a gépi tanulás. Az FCA megközelítés adaptálható a tudás strukturálására és a CPS-en belüli együttműködés optimalizálására [I/67]. Az adatfelügyelet és adatfeldolgozás javulása a CPS-ben nemcsak a berendezések prediktív karbantartásának optimalizálását eredményezi, hanem az új vezérlési technikák integrálásának lehetőségét is [I/68]. Többgépes megelőző karbantartás ütemezésére a döntéshozatali folyamatot két döntési szintre (helyi, globális vállalati) lehet bontani. Ez a decentralizáció lehetővé teszi az elosztott számítást, aminek következtében csökken a futási idő. Nagyméretű problémákat oldhatók meg anélkül, hogy a megoldás pontosságát illetően kompromisszumot kellene kötni [I/69].

Érdemes megemlíteni az Ipar 5.0 fogalmát is, mely az Ipar 4.0 elveket egészíti ki az emberi tényező fontosságának hangsúlyozásával, az ember-robot együttműködés előnyeinek kihasználásával és a fenntarthatóság szem előtt tartásával [I/70], [I/71]. Környezetbarátabb gyártást ír le, kevesebb hulladékkal, megújuló energiák használatával [I/72]



11. ábra: A megjelent cikkek száma (saját szerkesztés [I/26] alapján)

#### 4.1.3 IPAR 4.0 elvek alkalmazásának

Az Ipar 4.0 témakör vizsgálta során kapott eredményeket publikációk formájában is összefoglaltam [S/1], [S/4], [S/5]. Az Ipar 4.0 elvek alkalmazhatóságának vizsgálata tekintetében a következő fókuszterületeim voltak:

- *beszerzési és elosztási logisztika* [S/6], [S/7], [S/8], [S/9],
- *termelési logisztika* [S/1], [S/2], [S/10], [S/11], [S/12], [S/13], [S/14],

- *recycling logisztika [S/15], [S/16].*

#### 4.1.3.1 Beszerzési és elosztási logisztika

A zavartalan anyagáramlási folyamatok biztosítása érdekében fontos, hogy meghatározzuk a hatékony működéshez szükséges készletszinteket. Egy étterem példáján mutattam be, hogy milyen módon alkalmazhatók a korszerű principiák a szolgáltató szférában. Ha a teljes ellátási láncot és minden egyéb ahhoz kapcsolódó folyamatot digitalizálunk, lehetőség nyílik a készletek real-time monitorozására, mesterséges intelligencia alapú megoldások alkalmazásával pontosabb becsléseket kaphatunk a várható vendégforgalomra, így az alapanyagok várható fogyására. Összességében a készletekkel kapcsolatos tevékenységeket költséghatékonyabban valósíthatjuk meg. Az elért eredményeket mutatja be több publikáció.

#### 4.1.3.2 Termelési logisztika

Új gyártási megoldások – Paradigmaváltás, okok:

- *Vevői elvárások differenciálódása.*
- *A modellsiklusok 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.*
- *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. Az újfajta gyártási koncepció főbb jellemzői:

- *A rendszer legyen megbízható, könnyen változtatható és rugalmas.*
- *A digitális munkafolyamat legyen adaptív, egyetemes, értékteremtő.*
- *A vezérlés, ellenőrzés legyen integrálható, ipari felhasználásra alkalmas és hatékony.*
- *A moduláris gyártás számos tervezési, rendszer- és folyamatváltozást magában foglal, de általában azt jelenti, hogy a gyártást különálló cellákra kell osztani, a folytonos vonal menti mód helyett.*

A megvalósításhoz szükség van az ellátási láncban a végponttól végpontig terjedő adatintegrációra, 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.

#### **4.1.3.3 Recycling logisztika**

Egy termelő vállalat inverz logisztikai rendszerének optimális kialakítására és működtetésére vonatkozó koncepció kidolgozását tűztem ki célul [S/15]. A tanulmányban egy, az Ipar 4.0 technológiával rendelkező mintagyár példáján keresztül mutattam be a szimuláció nyújtotta lehetőségek kiaknázásával, hogyan határozható meg az inverz logisztikai rendszer optimális kialakítása. Az optimalizációs folyamatot 3 fő szegmensre bontottuk, ezek az optimális elrendezés, az optimális begyűjtendő csoportok és az optimális útvonal meghatározása. Az optimális elrendezés esetében meghatározható a depo-k legjobb elhelyezkedése. Az optimális begyűjtési csoportok esetében azokat a hulladéktároló edényeket jelöljük ki, amelyeknél a szenzorok által jelzett szintek a hulladékbegyűjtés szükségességét mutatják. Az optimális útvonal a begyűjtésre jelölt hulladékot tartalmazó edények pozícióit tartalmazó olyan útvonal, amely esetében a legalacsonyabb a ráfordított idő, költség, károsanyag kibocsátás.

#### **4.1.3.4 Blockchain**

A teljes ellátási lánc átláthatósága az egyik legfontosabb logisztikai fejlesztési terület. A Blockchain egy olyan technológiai koncepció, amely lehetővé teszi az ellenőrzött tranzakciós adatok decentralizált és változatlan tárolását és emellett alkalmazásával kiküszöbölhető a szállítási folyamatokra jellemző papírmunka jelentős része. Másik nagy előnye, hogy segítségével megvalósítható az ellátási lánc mentén mozgó termékekhez kapcsolódó események nyomon követése és visszakereshetősége a gyártástól a vevői vagy végfelhasználási pontig, így hatékonyan alkalmazható olyan folyamatokban is, melyek a mátrixgyártást alkotják [S/17].

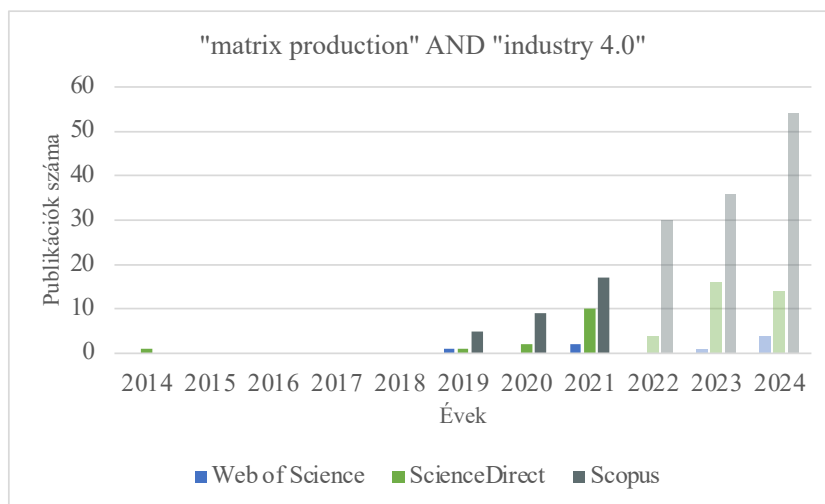
## **4.2 Mátrixgyártás**

A lehetséges adatbázisok (Google Scholar, ResearchGate, ScienceDirect, Scopus, Web of Science, stb.) közül a Scopus-t, Web of Science-et és a ScienceDirect-et választottam. Először két kifejezés együttesére végeztem el a keresést, ezek az "industry 4.0" és a "matrix

production" fogalmak voltak. Az útvonal tervezés esetében a „route”, „routing”, „AGV”, „automated guided vehicle” míg az elrendezés tervezéssel kapcsolatban a „layout” szavak jelenlétét kerestem a "matrix production" jelenléte mellett. Mivel nem kaptam sok találatot, így megvizsgáltam azt a lehetőséget is, hogy csak a "matrix production"-t használtam kulcsszóként. Ez utóbbi esetben ki kellett válogatni a kapott eredményeket a tudományterületnek megfelelően.

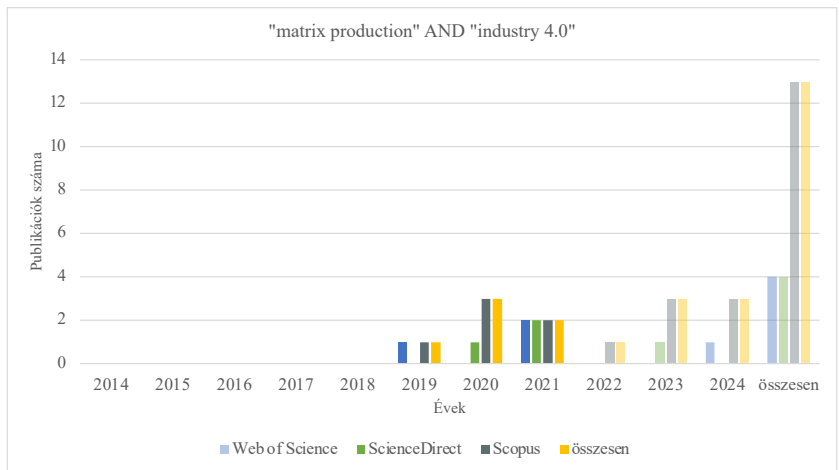
#### 4.2.1 Leíró elemzés

Az "industry 4.0" és a "matrix production" kifejezésekre együttesen „minden” mezőre keresve és a három adatbázis találatait összefésülve 32 cikk található (12. ábra), amennyiben csak a publikációk címében, az absztraktokban és a kulcsszavak közt vizsgáltam, csupán 6 találatot kaptam. Halványabb színnel a 2022 óta megjelent publikáció mennyiségét jelöltem. Megfigyelhető, hogy a témához kapcsolódó szakirodalmak száma dinamikusan növekszik.

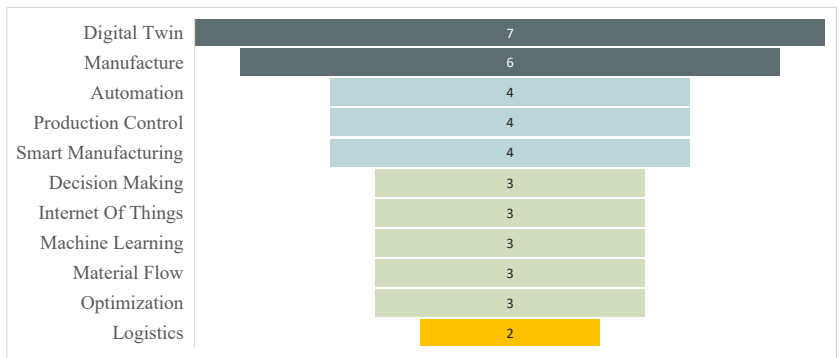


12. ábra: A megjelent cikkek száma („minden”) (saját szerkesztés [I/25], [I/26], [I/27] alapján)

A legkorábbi publikáció 2014-ben jelent meg [I/73]. Az évente közölt írárok számának növekedése mutatja a téma növekvő fontosságát. Az első vizsgálatba vont cikkek legnagyobb része 2021-ben jelent meg.

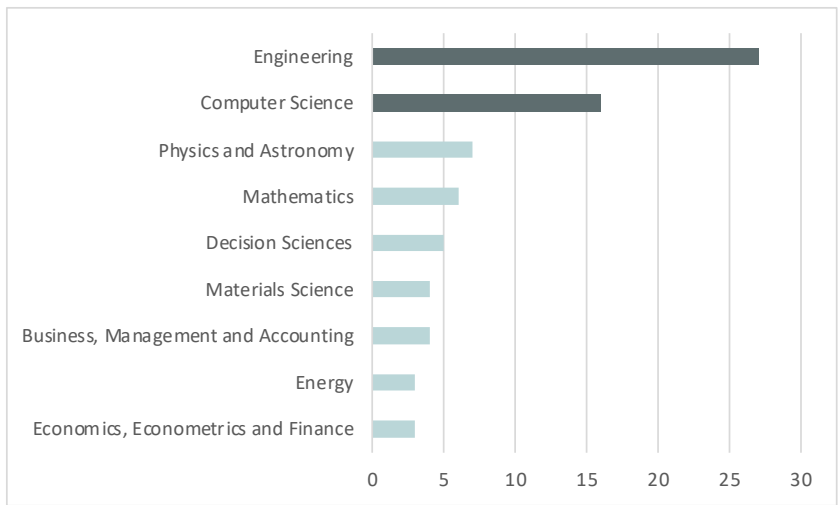


13. ábra: A megjelent cikkek száma („cím, kulcsszó, absztrakt”) (saját szerkesztés [I/25], [I/26], [I/27] alapján)



14. ábra: További kulcsszavak előfordulásának gyakorisága (saját szerkesztés [I/26] alapján)

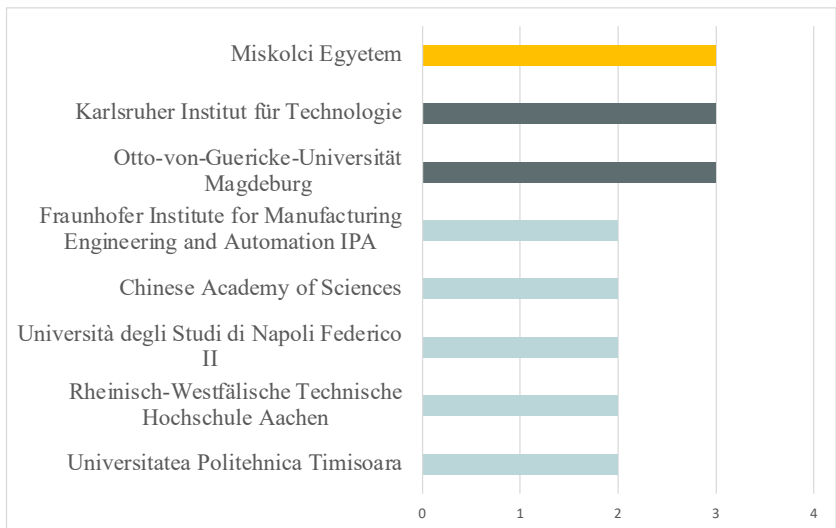
A leggyakrabban használt kulcsszavak előfordulását szemlélteti az előző ábra (14. ábra). A publikációk többsége a mérnöki tudományterülethez kapcsolódik (15. ábra).



15. ábra: A publikációk tudományterületei (saját szerkesztés [I/26] alapján)

Az elemzésbe bevont cikkek két nyelven íródtak: angol (30), kínai (1) a továbbiakban az angol nyelvűekre szűkítettem a kutatást.

A Miskolci Egyetem Logisztikai Intézetének kutatási témái között szerepel a mátrixgyártás, ezt mutatja az is, hogy ha a publikációk címében, az absztraktokban és a kulcsszavak között keresünk, előkelő helyen szerepel az egyetem (16. ábra).



16. ábra: A szerzők intézményi kötődései (saját szerkesztés [I/26] alapján)

Amikor a többi keresőszóval kapott találatokat összesítettem a következő ábra szerinti eredményt kaptam, mindösszesen 13 publikáció lett a keresések egyesített eredménye. Amennyiben a vizsgálatot 2021 helyett 2024-ig végzem, a lista is bővül további 25 elemmel.

5. táblázat: A kulcsszavakkal adott találatok 2021-ig (saját szerkesztés [I/26] alapján)

| MEGJELENÉS ÉVE | KULCSSZAVAK      |                     |                           |                            | SZAKIRODALOM  |
|----------------|------------------|---------------------|---------------------------|----------------------------|---|
|                | MATR.PROD. + AGV | MATR.PROD. + LAYOUT | MATR.PROD. + INDUSTRY 4.0 | MATR.PROD. + ROUTE/ROUTING |   |
| 2019           |                  | x                   | x                         | x                          | BÁNYAI Á. et.al.: <i>Smart cyber-physical manufacturing: Extended and real-time optimization of logistics resources in matrix production</i>                  |
| 2019           |                  |                     |                           |                            | x LYCZKOWSKI E. et.al.: <i>Wireless Communication in Industrial Applications</i>  |
| 2020           |                  |                     | x                         |                            | ASSADI A.A. et.al.: <i>User-friendly, requirement based assistance for production workforce using an asset administration shell design</i>                    |
| 2020           |                  |                     |                           |                            | x FRIES C. et.al.: <i>Design concept for the intralogistics material supply in matrix productions</i>   |
| 2020           |                  | x                   | x                         |                            | MAY M.C. et.al.: <i>Decentralized Multi-Agent Production Control through Economic Model Bidding for Matrix Production Systems</i>                             |
| 2020           |                  | x                   | x                         | x                          | MAY M.C. et.al.: <i>Product Generation Module: Automated Production Planning for optimized workload and increased efficiency in Matrix Production Systems</i> |
| 2020           |                  |                     |                           |                            | x TRIERWEILER M. et.al.: <i>Changeability of matrix assembly systems</i>  |
| 2021           |                  |                     | x                         | x                          | BÁNYAI T.: <i>Optimization of material supply in smart manufacturing environment: A metaheuristic approach for matrix production</i>                          |
| 2021           |                  |                     |                           |                            | x IHLENFELDT S. et.al.: <i>Increasing resilience of production systems by integrated design</i>   |
| 2021           | x                |                     |                           |                            | LI Z.-K. et.al.: <i>An effective discrete invasive weed optimization algorithm for multi-AGVs dispatching problem in a matrix production workshop</i>         |
| 2021           |                  |                     | x                         |                            | REGGELIN T. et.al.: <i>Introduction to the minitrack "modeling and decision making in manufacturing and logistics in the age of industry 4.0"</i>             |
| 2021           | x                | x                   |                           | x                          | ZWINGEL M.: <i>Hierarchical And Flexible Navigation For AGVs In Autonomous Mixed Indoor And Outdoor Operation</i>   |
| 2021           |                  |                     |                           | x                          | SCHMIDTKE N. et.al.: <i>Matrix production systems - Requirements and influences on logistics planning for decentralized production structures</i>             |

6. táblázat: *A kulcsszavakkal adott találatok száma 2022-2024 között (saját szerkesztés [I/26] alapján)*

| MEGJELENÉS<br>ÉVE | KULCSSZAVAK         |                        |                              |                               |                      |
|-------------------|---------------------|------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------|
|                   | MATR.PROD. +<br>AGV | MATR.PROD. +<br>LAYOUT | MATR.PROD. +<br>INDUSTRY 4.0 | MATR.PROD. +<br>ROUTE/ROUTING | MATRIX<br>PRODUCTION |
| 2022              | 1                   | 0                      | 1                            | 0                             | 4                    |
| 2023              | 2                   | 1                      | 3                            | 2                             | 5                    |
| 2024              | 0                   | 2                      | 3                            | 2                             | 3                    |

#### 4.2.2 Tartalom vizsgálat

A klasszikus vonal menti összeszerelés alkalmatlan arra, hogy magas gazdasági hatékonysággal teljesítsen a jövőbeli diverzifikált gyártási követelmények tekintetében. A cél a gyártási folyamat gördülékenységének fenntartása az egyenlő ciklusidők kiküszöbölése mellett. A mátrixgyártás megfelelően rugalmas szállítási rendszer dinamikát biztosít a munkacellák anyagellátásához. A vezérlőrendszer képes megbirkózni a meghibásodásokkal, és így a gyártási rendszer rendkívül robusztusnak tekinthető [I/73].

A mátrixgyártási koncepció lehetővé teszi a termelőcellák szabad összekapcsolását és így feloldja a vonalmenti gyártás korlátait. Sokféle termékváltozat állítható elő egyetlen termelési struktúrában. Egyetlen folyamatlépés időtartama már nem határozza meg a teljes gyártási ciklust. Inkább a folyamatlépéseket egymástól függetlenül hajtják végre, hogy olyan infrastruktúra jöhessen létre, amely a folyamatokra és a kapacitásigényekre irányul. A gyártócellák megvalósításához azonban olyan vezérlési módszerekre van szükség, amelyek lehetővé teszik a megmunkálási folyamatok képesség-alapú leírását. Ez az alapja a cella gyors újrakonfigurálásának és az új gyártási feladatokhoz való hatékony alkalmazkodásnak [I/74].

Az átkonfigurálást a termelési rendszer egyes részein végrehajtott mélyreható változásoknak tekintjük, amelyek a kölcsönös függőségek miatt hatással vannak a rendszer más részeire. Minél gyorsabban észlelik az konfigurálás szükségességét és elvégzik a megfelelő adaptációt, annál nagyobb a lehetséges haszna. A célzott végrehajtáshoz olyan holisztikus megközelítésre van szükség, amely figyelembe veszi a főbb technikai és szervezeti szempontokat és biztosítja a gyors megvalósítást [I/75].

Az ipari összeszerelő rendszereknek alkalmazkodniuk kell a termékek és a gyártási program megváltozásához, mindeközben fokozni kell az automatizálást és az újrafelhasználást. A mobil összeszerelés egy olyan vonal nélküli koncepció, mely az összeszerelés megszervezésének és a rugalmas automatizálásnak a legmodernebb szintjéről származik

[I/76]. A vonal nélküli mobil összeszerelési rendszer (LMAS, Line-less Mobile Assembly) kihasználja a termelési erőforrások mobilizálhatóságát és maximalizálja a piaci trendekre való reagálást [I/77]. Az alkatrészek többcélú jellege növeli a rendszer összetettségét, és több problémát okoz az üzemeltetés és a karbantartás során. Ez a többcélú jelleg felismerhető a mátrixgyártó rendszerek esetében, ahol a szabványosított, többcélú termelési cellák karbantartása befolyásolja a rugalmas termelési folyamat termelékenységet [I/78].

A mátrixgyártás rugalmasságából fakadóan nagyobb a szabadsági fok, emiatt azonban megbízhatóbb gyártásszabályozó rendszereket igényel, mint például a sormenti elrendezésű, hagyományos termelési rendszerek esetében. A megbízhatóságon túlmenően az intelligens gyártás igénye is felmerül annak érdekében, hogy biztosítani lehessen a célorientált gyártásellenőrzést a folyamatosan változó gyártási körülmények között is. Míg a központosított ellenőrzés jól teljesít egyetlen célkitűzés esetén, nehéz ellentmondó célokat elérni az egyes termékekre vagy erőforrásokra vonatkozóan. E kihívások leküzdése érdekében a decentralizált, többügynökségi ajánlattételi rendszeren alapuló gyártásellenőrzési koncepció alkalmazható [I/79]. A mátrixgyártás elválasztja az automatizált árutermelést a létrehozásuk szükséges lépéseitől. Ezeket a lépéseket a termelési cellákhoz (PC) rendelik hozzá. Számos munkadarab lép be a termelési cellába, ahol egy bizonyos munkafolyamatot alkalmaznak a munkadarabra, és a módosított munkadarab elhagyja a termelési cellát. Azáltal, hogy a cellákon áthaladó munkadarab útja megváltoztatható a gyártás során, teljesen más termék hozható létre. Ez a rendkívül rugalmas ötlet megköveteli az összes folyamat pontos irányítását. Egy intelligens logisztikai megoldás szállítja az árut a termelési cellák között. Az információcseréhez ebben az összetett rendszerben megfelelő kommunikációs technológia szükséges [I/2]. A mátrixgyártáshoz szükséges adatinfrastruktúrát gyártási adatokra kell bontani, időbélyegekkel, folyamatparaméterekkel és szerelési helyekkel, tesztelési információkkal, változó küszöbértékekkel, valamint a vizsgálati mélységre és az anyag infrastruktúrájára vonatkozó információkkal kell ellátni. A termelékenység kívánt javulásának elősegítése és különösen a szűk keresztmetszetek csökkentése érdekében minden gyártási és tesztelési lépésben biztosítani kell valós időben a gyártási és tesztadatok pontos korrelációját. A komplex telepítést igénylő gépeket inkább egy bonyolultabb rendszer részének kell tekinteni, mint önálló gépnek [I/80].

Megfelelő gyártási megrendelések generálása növeli a gépkihasználatot anélkül, hogy akadályozná az eredeti többdimenziós gyártási célokat. Így olyan új termelési stratégiák valósíthatók meg, amelyek magukban foglalják az értékteremtést a kisebb termékek és melléktermékek hatékony manipulálása révén [I/81]. Többféle kétdimenziós rendszer létezik, azokat széles körben alkalmazzák, ilyenek például a kooperatív robotok által támogatott mátrix jellegű gyártórendszerek. [I/82].

Működés közben a számítógépes fizikai munkacellák adatokat generálnak, amelyek az egyes folyamatokra és interakciós adatokra jellemzőek. A dolgozói és feldolgozási, valamint az interakciós adatok felhasználása lehetővé teszi a munkavállalók egyéni képességeiknek megfelelő támogatását, képzését. A gépigények és a munkavállalói készségek egyeztetése a munkavállalók munkaállomásokhoz való hozzárendelésének optimalizálását szolgálja az ergonomikus munkahelyi beállítás és a gép hatékonysága tekintetében [I/83]. A digitális iker olyan új koncepciónak tekinthető, amely magában foglalja az előrelátást, felméri a különböző gyártásszabályozási politikák hatását a rendszer teljesítményére és viselkedésére közel valós időben, így kiválasztható az adott helyzethez legmegfelelőbb stratégia. A megfelelő rendszer-előrejelzések egyik kritikus eleme az emberi viselkedés. Az esettanulmányban a mátrix jellegű gyártórendszert három automatizált vezetett jármű (AGV) és egy emberi felügyelő irányítja [I/84].

A mesterséges intelligenciával történő újragyártáshoz szükséges agilis termelési rendszert (AgiPROBOT projekt, 2019–2024) a Karlsruhe Technológiai Intézet (KIT) kilenc kutatóintézete végzi, és a Carl-Zeiss-Stiftung finanszírozza. Integrált félautomata bemutató gyár az újragyártáshoz, amely képes önállóan szétszerelni a Bosch által gyártott elektromos hajtásokat a Bosch által gyártott használati fázis után, amelyet nagyfokú változatosság, valamint állapotuk és specifikációjuk bizonytalansága jellemez. Ez az agilis rendszer egy mátrix elrendezéssel van kialakítva, amely lehetővé teszi a rendkívül rugalmas és alkalmazkodó anyagáramlást [I/85]. A Minitrack olyan hozzájárulásokat tartalmaz, amelyek középpontjában a modellezés és a döntéshozatal áll a gyártásban és a logisztikában az Ipar 4.0 kontextusában. A Minitrack dokumentumok közül kettő leírja a digitális ikrekre vonatkozó fogalmakat és modelleket. Az egyik dokumentum adaptív ütemezési keretet biztosít a többcélú hibrid áramlásüzemi ütemezési problémák megoldásához, a másik a mátrixgyártási rendszereket, azok követelményeit és a logisztikai tervezésre gyakorolt hatását vizsgálja [I/86]. A következő évtizedre előrevetített ideális rendszerekre számos

példát találhatunk, például a PSA (Groupe PSA-The Multi-Silhouette Production Line) több sziluettű gyártósorát, valamint a mátrixgyártáson alapuló kísérleti üzemeket, mint amilyen a KUKA által javasolt paradigma, amely a közelmúltbeli törekvést jelenti, hogy a hagyományos kapcsolt gyártósort szabványosított és kategorizált gyártási cellákra bontják, rácsos elrendezés mentén [I/87].

Az AGV-k bevezetése jelentősen javítja a belső logisztika hatékonyságát, csökkenti a balesetek kockázatát, és növeli a folyamatok rendszerbe szervezettségét [I/88]. Ezek az eredmények megerősítik az automatizálás iránti növekvő érdeklődést, amely hozzájárul a költségek csökkentéséhez, a bevételek növeléséhez és a környezetvédelmi előírások teljesítéséhez.

Az anyagmozgatást végző járművek útvonaltervezési és ütemezési stratégiája a termelési logisztikai rendszer központi eleme, az ütemező algoritmus minősége kulcsfontosságú a rendszer egyensúlya és stabilitása szempontjából. A több AGV-t alkalmazó rendszerek esetében az útvonaltervezése még összetettebb feladat. A többfunkciós automatizált, önvezető járművekből (AGV) álló szállítórendszerek alkalmazása elősegíti az FMS rugalmasságát, ami magasabb követelményeket támaszt az AGV ütemezési algoritmusokkal szemben [I/89].

Hu és társai mohó heurisztikus szabályokkal kombinálták a továbbfejlesztett iteratív lokális keresési (Improved Iterative Local Search, IILS) algoritmust, figyelembe véve a szállítási idő és a szállítási erőforrások korlátait [I/90]. Az ütközésmentes útvonalak tervezésének során a továbbfejlesztett Q-Learning (IQ) and democratic robotics particle swarm optimization (DRPSO) algoritmus kombinálása bizonyonyult előnyösnek [I/91].

A legrövidebb ütközésmentes út megtalálása adott célpont halmazok között robot munkakörnyezetében egy többcélú úttervezési problémát vet fel. Ekkor egyrészt optimalizálni kell a célpontok sorrendjét, majd meghatározni a legrövidebb utat. A meglátogatandó célpontok sorrendjének optimalizálására genetikusan alkalmazható [I/92].

Az AGV-k késleltetési idejének minimalizálására létrehozott vegyes egészértékű programozási modell az útvonal-optimalizáláson és az integrált ütemezésen alapul. A genetikusan algoritmus és részecske raj optimalizálás (HGA-PSO) kettősének alkalmazásával megoldás adható az AGV útvonalkonfliktus vagy holtponthely problémájára [I/93]. Ugyanerre a

problémára hierarchikusan kezelt a csomópontok közötti konfliktusok esetében a Dijkstra módszer implementálásával is fejleszthető megoldás [I/94].

Az AGVEESR (automatic guided vehicle energy-efficient scheduling problem with release time) mátrixgyártásbeli vizsgálatokor – többcélú mohó algoritmus (MOGA) segítségével – egyszerre optimalizálható az energiafogyasztás, a használt AGV-k száma és az ügyfél-elégedettség [I/95].

Egy dinamikus AGV ütemezési modell, a statikussan ellentétben, képes az AGV-k új feladatokhoz történő átcsoportosítására. Li és társai az új modell mátrixgyártásbeli hatékonyságának bizonyítására egy diszkrét invazív gyomnövény-optimalizáló (discrete invasive weed optimization, DIWO) algoritmust alkalmaztak [I/96].

A piacon elérhető különféle alkatrészek lehetővé tehetik egy hagyományos targonca szervizrobotná váló átalakítását. Léteznek továbbá olyan AGV-k, amelyek ipari robotkarokkal felszereltek, ezzel is megkönnyítve a kezelési műveleteket. Az AGV-k gyártási folyamathoz való alkalmazkodóképessége és rugalmassága folyamatosan növekszik, így az Ipar 4.0 célkitűzéseinek megvalósításának egyik fő elemei lehetnek [I/97].

A Ranke et. al által kidolgozott módszer az anyagellátási stratégiák kiválasztásának terén támogatja a logisztikai tervezést. A kiválasztási folyamat a logisztikai költségek minimalizálására összpontosít, alkalmazásához három lépésre van szükség: először az anyagellátási rendszert elemzik és összegyűjtik a releváns adatokat, információkat, a második lépésben meghatározzák az alternatív ellátási stratégiákat, a harmadik lépés során egy matematikai optimalizálási problémát írnak fel, majd azt egy automatizált algoritmus segítségével oldják meg [I/98].

A kiberfizikai mátrixgyártást alkalmazó rendszer rugalmasan összekapcsolt, helyhez kötött folyamatmodulokból áll. A gyártás során munkadarab több ilyen helyhez kötött folyamatmodulon halad át. A modulok rugalmasan telepíthetők helyszínről helyszínre. Egy ilyen rendkívül dinamikus rendszerstruktúrával a kiberfizikai mátrixgyártás fluid termelésbe megy át. Fluid termelés esetén nemcsak a termelési objektum és a munkaerő mobil, hanem az üzemeltetési erőforrások is. A fluid termelésben csak az épület helyhez kötött, míg a szolgáltatás előállításához szükséges összes többi termelési erőforrás mobil [I/99]. A mátrix típusú gyártórendszerek magasabb érettségi szintjei integrálják a szállítási és értékteremtési feladatokat, helyfüggetlen berendezésekkel segítik elő, hogy a dinamikus változó gyártási

igényeknek megfelelően új erőforrásokká egyesülhessenek, azaz folyékony termelést biztosítanak [I/100]. A fluid gyártórendszerek (FLMS) új termelési rendszer koncepciókat írnak le. Az alapötlet az, hogy az összes logisztikai és termelési folyamat adaptálása és módosítása dinamikusan történik, ezáltal lehetővé téve a folyamatos változtatást a beállításban, a konfigurációban és a termékkörben. A CPS nagyfokú változtathatóságot biztosít, így lehetővé teszi, hogy a rendszer gyorsan alkalmazkodjon a változó követelményekhez [I/101]. Egy FLMS-ben az egyes termelési modulok mobilak és olyan kiberfizikai rendszerekből (CPS) állnak, amelyek esetleg kombinálhatók a változó követelményekhez való alkalmazkodás érdekében. A Különböző CPS-ek – például autonóm mobil robotok vagy intelligens szállítóeszközök – összekapcsolásával alkalmazkodóképes és rugalmas termelés érhető el [I/102].

#### *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 (5. táblázat) 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.

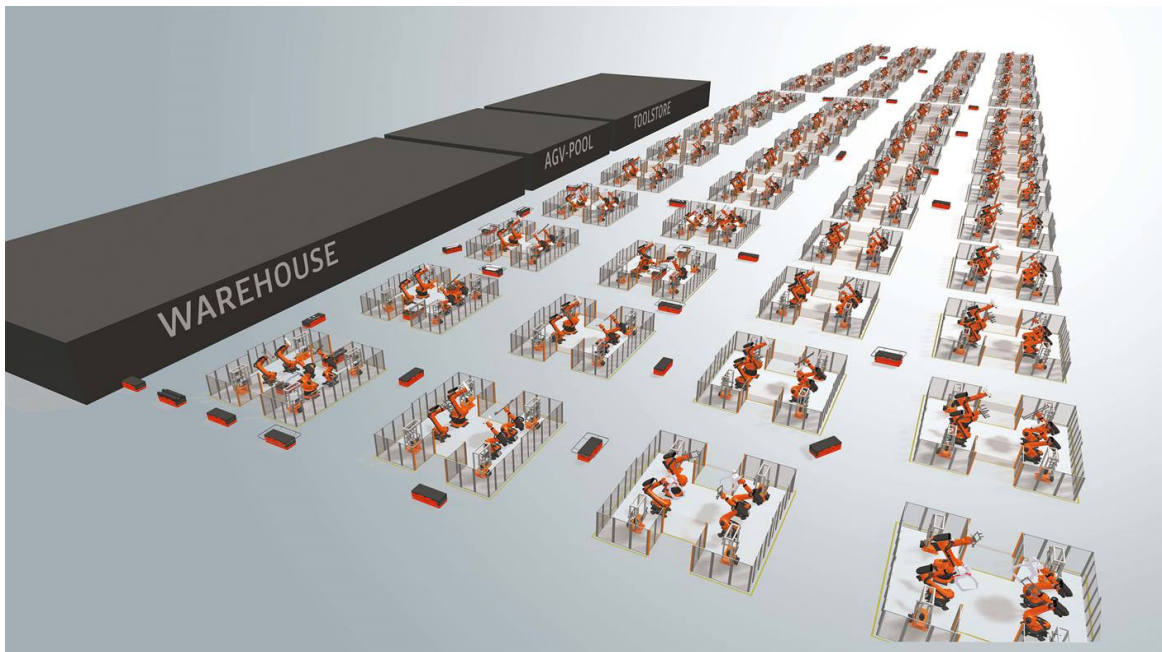
Mindezek alapján megállapítható, hogy a tématerület behatóbb tanulmányozása indokolt.

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

## 5 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 (17. ábra).



17. ábra: Mátrixgyártás [I/103]

A mátrixgyártás főbb jellemzői a KUKA meghatározása szerint [I/103]:

- Skálázható a holnap termékeinek sokfélesége szerint.
- Változtatható a teljes kapacitás a moduláris termelési terület segítségével.
- Autonóm járművek támogatják a folyamatokat.
- Magas rendelkezésre állás a standardizált berendezéseken keresztül, különböző folyamatokhoz modulárisan összeépített gyártócellák segítségével.

A mátrixgyártás legjelentősebb előnyei közé sorolható a modularitás: magas rendelkezésre állás standardizált berendezéseken keresztül; a teljes kapacitás skálázhatósága, valamint az, hogy az új termékek integrálása egyszerű és alacsony kockázatú.

A skálázhatóság megvalósítási szintjei:

- a rendszer mérete modulárisan bővíthető,
- a különböző változatokkal kapcsolatos rugalmasság,
- a termék-mix skálázhatósága [I/104].

A növekvő individualizáció a termelést is megváltoztatja. A volatilis piacokon egyre nagyobb hangsúlyt kap, hogy a termékek különféle, személyre szabott változatait kis sorozatnagyságban is gazdaságosan lehessen előállítani.

A mátrixgyártás főbb jellemzői, erősségei:

- a gyártást szolgáló modulok egy rács pontjaiban helyezkednek el (sorok száma:  $\sigma_1$ , oszlopok száma:  $\sigma_2$ ),
- 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.

## **5.1 A mátrixgyártás általános modellje, lehatárolása, paraméterek meghatározása**

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.

### **5.1.1 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 szerszámraktár.

#### 5.1.1.1 A gyártócellák

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, szerszámirtók és bizonyos folyamatokat végrehajtó robotok tárolására. Ezek a termelőcellák egyedileg bővíthetők folyamat-specifikus eszközökkel. Egy-egy cellába sokféle folyamat integrálható pl. összeszerelés, hegesztés, ragasztás, vágás, forrasztás, szegecseles.

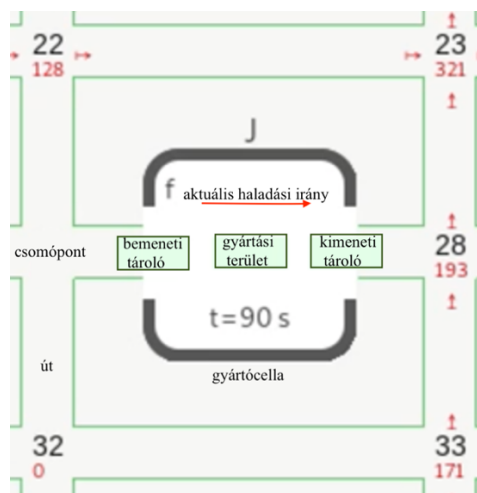
A valóságban a gépeknek különféle telepítési jellemzői lehetnek, előfordulhatnak speciális igények, így nem minden területegység lehet alkalmas bármelyik berendezés elhelyezésére. Az általam vizsgált modellben, hogy a rugalmasságot növeljem, a következő feltételrendszert alkalmaztam:

- azonos méretű cellák kerültek kialakításra.
- a cellák olyan alaprobotokkal, berendezésekkel, gépekkel felszereltek, hogy bármelyik cellában – a szükséges átszerszámítás, átalakítás után – elvégezhető legyen bármelyik technológiai művelet bármelyik gyártandó termék esetében, azaz a cellák egységesítettek, terméksemleges berendezésekkel és termékspecifikus alapfunkciókkal vannak ellátva,

- az azonos típusú műveletek mindegyik cellában azonos idő alatt végezhető el minden termék esetében,
- ha egy cellában több művelet, feladat, technológiai lépés kerül elvégzésre, akkor azokat a modell szempontjából egy egységnek (egy műveletnek, stb.) tekintem.

A rendelkezésre álló térrész egészében – az alapkonfiguráció szintjén – kialakításra kerülnek a cellák és a közlekedési útvonalak. Az adott gyártási feladat és az annak során fellépő várt (pl. tervezett karbantartás) vagy nem várt események (pl. meghibásodás) függvényében, a gazdaságos üzemeltetés szem előtt tartásával, dinamikusan kerül meghatározásra, hogy mely cellák mikor és milyen művelet elvégzésében vesznek részt a termelés során. 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.

Egy adott cella foglaltsága alatt azt értem, ha a benne található gép műveletet végez, valamelyik terméket gyártja és a bemeneti tárolóján is várakozik egy AGV egy újabb munkadarabbal, minden olyan cella, ami nem ilyen, elérhető, azaz legalább a bemeneti tároló szabad, még ha a cellában munkavégzés is történik.



18. ábra: A gyártócella részei (saját szerkesztés)

A cellák ellátása során mind az alkatrészeket mind a szerszámokat szállíthatják AGV-k. Miután az alkatrészek megérkeztek egy cellába, egy robot segítségével rakodják le azokat. Egy-egy cellában több robot is elhelyezésre kerülhet. Ezek elláthatnak különböző feladatokat, de vannak olyan műveletek, melyek elvégzéséhez egyidejűleg több robot kooperációjára van szükség, erre lehet példa a hegesztés. Hegesztéskor az egyik robot az

egyik részt, a másik pedig a másikat tartja, a két részt egy egységbe préselik, ekkor a harmadik robot - az úgynevezett folyamatrobot - össze tudja hegeszteni az elemeket.

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.

### **5.1.1.2 A közlekedési útvonalak, főbb pontok**

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, kereszteződések, illetve további minden olyan pont, ahol az AGV irányt válthat, kanyarodhat. A vizsgált modellben az utak egysávosak, a fordulók nem ívesek.

### **5.1.1.3 A bejárat és a kijárat**

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 kerülve 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).

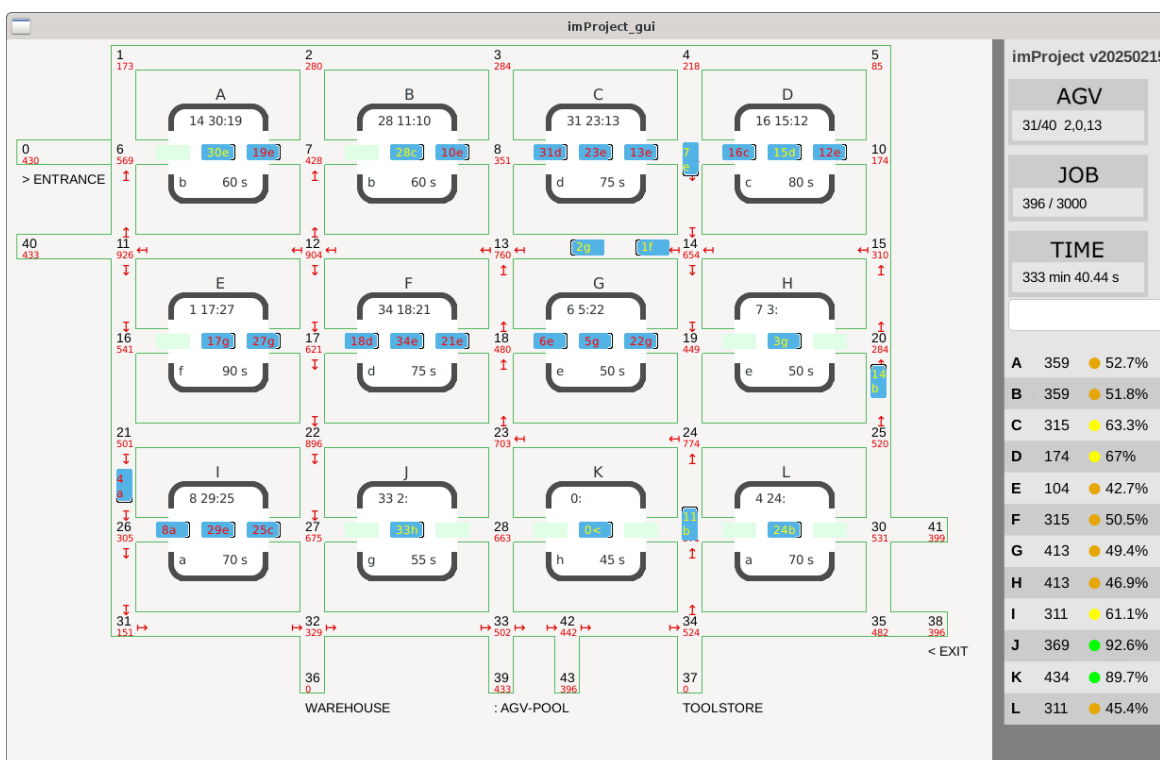
Az ENTRANCE és az EXIT helyeken egyszerre maximum  $\delta_1$  és  $\delta_2$  darab jármű tartózkodhat a fel-, illetve lerakódás idejére, ezzel is reprezentálva az ott rendelkezésre álló terület korlátozottságát.

### 5.1.1.4 Az áru- és az szerszámraktár, az AGV raktár

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 (17. ábra). A raktárban 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 (19. ábra) egy bejárata (ENTRANCE) és egy kijárata (EXIT), egy alkatrészraktára (WAREHOUSE), egy AGV tárolója (AGV-POOL), egy szerszámraktára (TOOLSTORE) van, ezek előre meghatározott helyeken találhatóak. Mintagyáramban 12 (3x4) gyártócella található, ezek pozíciója rögzített.

Mintagyáram méretének megválasztásakor ügyeltem arra, hogy az elég nagy legyen ahhoz, hogy a módszerek és az alkalmazásuk bemutatathatóak és validálhatóak legyenek, ugyanakkor a probléma megoldása (hardver és idő oldalról) még kezelhető méretű legyen, az eredmények belátható időn belül megszülethessenek.



19. ábra: A mintagyár (saját szerkesztés)

A mátrixgyártásban a termelés és az azt támogató logisztikai folyamatok külön vizsgálhatóak. Ezzel a koncepcióval a változtatható funkciójú cellákat tartalmazó rendszerek bármikor újrakonfigurálhatóak: a gyártási folyamat további cellákat is felhasználhat, de csökkentheti is azok számát, illetve átszerszámozással módosítható egy-egy cella által ellátandó feladat. Így az értékteremtési 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.

#### **5.1.1.5 A szállítóeszközök, az AGV-k**

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 munkaállomásra 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/105]

Az egyes cellákban elhelyezhető alkatrészek száma és az AGV-k szállítási kapacitása az adott alkatrész vonatkozásában meghatározható. Átszerszámozás során a maradék alkatrész(ek)e)t egy (több) AGV elszállítja és egy másik elviszi a szükségtelenné vált régi szerszámokat, egy harmadik meghozza az újakat. Egy-egy AGV csak annyi egység rakománnyal indul el, amit az indulás pillanatában is le tudna már rakni.

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.

## **5.1.2 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 idősükségletét, az anyagmozgatási és várakozási időket.

### **5.1.2.1 A gyártási folyamat, a gyártócellák működésének jellemzői**

A termelési logisztika feladata a munkadarabok üzemen belüli mozgatása a munkaállomások között, továbbá a munkaállomások ellátása az adott termelési feladathoz szükséges alapanyagokkal, nyersanyagokkal, alkatrészekkel és az ezekhez kapcsolódó rakodási és tárolási feladatok. A termelési térben egyidejűleg sok anyagmozgatási feladat jelentkezik.

A gyártandó termékek megváltoztatásakor, ha szükséges, a termelési cella automatikusan átáll az új feladatnak megfelelően. Az termelésstervező 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 *19. 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  $3 \times 4$  ( $\sigma_1 = 3$  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 (megtett út, a gyártáshoz szükséges idő, kapacitás-kihasználás, állásidők mennyisége, energiafelhasználás mértéke, költségek) összehasonlításával határozhatjuk meg minden egyes gyártási sorrend esetében és a későbbiekben részletezett útvonal szabályok figyelembevételével. A 19. ábra a mintagyár egy véletlenszerűen kiválasztott elrendezését mutatja be.

### 5.1.2.2 A gyártandó termékek meghatározása

A gyorsan változó vevői igények következtében a termékek életciklusa lerövidül, a sokféleség növekszik, miközben a modellenkénti termékmennyiség csökken [I/106], 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/15].

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

A különböző termékek előállításához szükséges folyamatok lehetnek azonosak, ugyanakkor elvégzésükhöz szükséges idők a valóságban eltérhetnek egymástól. A vizsgált modell esetében ezek az idők szabadon meghatározhatók.

Két terméket a továbbiakban akkor fogok különbözőnek tekinteni, amennyiben az előállításukhoz nem ugyanazokra a műveletekre vagy nem ugyanabban a sorrendben van szükség. Két olyan terméket, ami a valóságban különbözik, de az előállításuk pontosan ugyanazon technológiai lépésekből áll, azonosnak tekintek, mivel az átfutási idő vonatkozásában ezek hasonlóan kezelendők.

A szimulációban a gyártási listához meg kell határozni a termékfélésegeket, azok előfordulási valószínűségét. Adott termékstruktúra esetén 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. Ha a modell segítségével nagy számú esetet szeretnénk megvizsgálni, akkor azt kellően rugalmasra kell tervezni. Ha ismertek a termékek előfordulási valószínűségei, sok lista generálásával, több esetet megvizsgálhatunk, ezzel jobban közelítve a valósághoz.

A gyártandó termékek meghatározásakor használt paraméterek, jelölések:

- $\mu$  db különböző gyártási művelet,
- $2^\mu - 1$  féle eltérő termék,
- $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_\mu$ : gyártási műveletek,
- $\alpha_1 : \lambda_1\%$ ,  $\alpha_2 : \lambda_2\%$ , ...,  $\alpha_\mu : \lambda_\mu\%$ : a gyártási műveletekre vonatkozó előfordulási valószínűségek,
- $\rho$  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 (19. ábra).

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

### 5.1.2.3 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 időszávban 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.

#### 5.1.2.4 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. Az optimális AGV szám meghatározásához a szimulációt különféle AGV mennyiséggel kell lefuttatni és a kapott eredményeket összevetni egymással (egy konkrét példa a későbbiekben bemutatásra kerül).

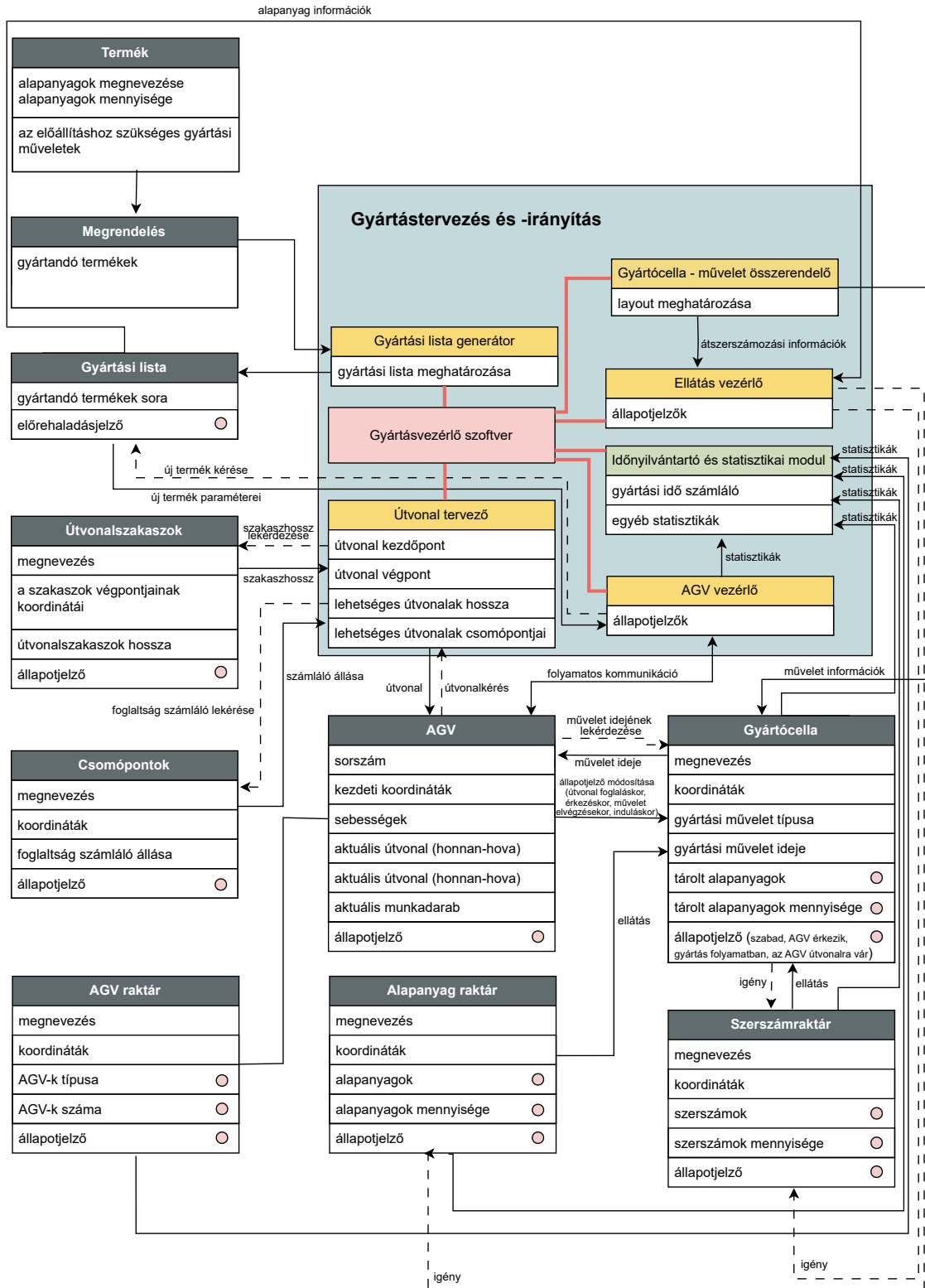
#### 5.1.3 A mátrixgyártás irányítórendszere és a mátrixgyártás elemei közötti relációk

A 20. ábra a mátrixgyártás elemei közötti relációkat és az irányítórendszer egy lehetséges megvalósítását mutatja.

Az ábra a 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 elérhető/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 sebességadataik, tárolásra kerül az aktuális útvonal kezdő és végpontja, illetve az AGV számára ismertek az általa szállított munkadarabbal kapcsolatos gyártási információk (milyen műveletre 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.



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

Az ábrán külön kiemelésre kerültek a legfontosabb komponensek, melyek a következők:

- a gyártási lista generátor,

- az útvonal tervező,
- az AGV vezérlő,
- a gyártócella - művelet összerendelő,
- az időnyilvántartó és statisztikai modul.

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 fent 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 szeretne változtatni, például az egyik gyártócellából egy másikba menne. 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 (pl. egy arra alkalmas szoftverkomponens és monitor segítségével) 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]*

## 6 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.

### 6.1 Gyártócellák elrendezésének optimalizálása

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

*Jelölések:*

- $f_{i,j}$ : anyagáramlási intenzitás az  $i$ -edik és  $j$ -edik cella között,
- $\sigma_1$ : a mátrixgyártás sorainak száma ( $1 \leq \sigma_1$ ),
- $\sigma_2$ : a mátrixgyártás oszlopainak száma ( $1 \leq \sigma_2$ ),
- $p, q$ : két különböző pozíció,
- $d_{p,q}$ : a  $p$ -edik és  $q$ -adik pozíció közötti távolság,
- $L_{i,p} \in \{0,1\}$ : bináris változó, amely megmondja, hogy az  $i$ -edik cellát a  $p$ -edik pozícióba helyezzük-e,
- $L_{j,q} \in \{0,1\}$ : bináris változó, amely megmondja, hogy az  $j$ -edik cellát a  $q$ -adik pozícióba helyezzük-e,
- $M$ : egyedi gyártócellák száma,
- $P$ : potenciális helyek száma.

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  $\sigma_2$  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:

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

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.

## 6.2 AGV útvonalak optimalizálása

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

Jelölések:

- $X$ : az AGV-k száma,
- $K$ : a gyártandó termékek száma,
- $\mathbf{z} = [z_1; z_2; \dots; z_K]^T$ : a gyártandó termékek sora,
- $R_{x,y,z_k} \in \{0,1\}$ : az  $x$ -edik AGV az  $y$ -edik rakománya a  $k$ -edik termék-e,
- $N_x$ : az  $x$ -edik AGV által egymástól függetlenül szállított rakományok száma,
- $\theta$ : gyártócellák, AGV-POOL, ENTRANCE, EXIT pontok,
- $\beta_{x,y}$ : a gyártási műveletek száma az  $x$ -edik AGV  $y$ -edik rakománya esetében,

- $\mathbf{s}_{x,y} = \left[ \theta_{x,y,0}; \theta_{x,y,1}; \theta_{x,y,2}; \theta_{x,y,3}; \dots; \theta_{x,y,\beta_{x,y}+1}; \theta_{\beta_{x,y}+2}; \theta_{\beta_{x,y}+3} \right]^T$ : az  $x$ -edik AGV az  $y$ -edik szállítmány esetében a teljes útvonalának pontjai a bejárás sorrendjében,
- $d_{x,y,i,i+1}$ : az útvonalszakasz hossza az  $x$ -edik AGV  $y$ -edik rakományának  $\theta_{x,y,i}$  és  $\theta_{x,y,i+1}$  pontok közötti szállítása során,
- $\overline{v}_{x,y,i,i+1}$ : az AGV átlagsebessége az  $x$ -edik AGV  $y$ -edik rakományának  $\theta_{x,y,i}$  és  $\theta_{x,y,i+1}$  pontok közötti szállítása során,
- $t_{0,z_k}$ : a gyártás megkezdésétől a  $k$ -edik termék gyártásának kezdetéig eltelt idő.

Minden termék esetében az AGV az AGV-POOL-ból indul ( $\theta_{x,y,0}$ ) és először a bejáráshoz 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:

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

### 6.3 AGV-sorrend optimalizálása

Cél: Az AGV-k útvonal kiszolgálási 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.

Jelölések:

- $t_x$ : az  $x$ -edik AGV által szállított munkadarabok összesített gyártási idői,
- $X$ : az AGV-k száma,
- $\Delta s$ : két AGV közötti minimális követési távolság,
- $\tau$ : az alkalmazott prioritás módozat.

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  $\Delta s$  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).

## 6.4 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 ( $\Phi_0, \Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_C$ ), majd az így kapott pontok közötti útszakaszokat lássuk el sorszámmal ( $w_1, w_2, \dots, w_C$ ). A 19. 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.

*Jelölések:*

- $\sigma_1$ : a mátrixgyártás sorainak száma ( $1 \leq \sigma_1$ ),
- $\sigma_2$ : a mátrixgyártás oszlopainak száma ( $1 \leq \sigma_2$ ),
- $L_{i,p} \in \{0,1\}$ : bináris változó, amely megmondja, hogy az  $i$ -edik cellát a  $p$ -edik pozícióba helyezzük-e,
- $t_x$ : az  $x$ -edik AGV által szállított munkadarabok összesített gyártási idői,
- $X$ : az AGV-k száma,
- $K$ : a gyártandó termékek száma,
- $\mathbf{z} = [z_1; z_2; \dots; z_K]^T$ : a gyártandó termékek sora,
- $R_{x,y,z_k} \in \{0,1\}$ : az  $x$ -edik AGV az  $y$ -edik rakománya a  $k$ -edik termék-e,
- $N_x$ : az  $x$ -edik AGV által egymástól függetlenül szállított rakományok száma,
- $\Theta$ : gyártócellák, AGV-POOL, ENTRANCE, EXIT pontok,
- $\beta_{z_k}$ : a gyártási műveletek száma a  $z_k$  termék esetében,
- $\mathbf{s}_{x,y} = [\theta_{x,y,0}; \theta_{x,y,1}; \theta_{x,y,2}; \theta_{x,y,3}; \dots; \theta_{x,y,\beta_{z_k}+1}; \theta_{\beta_{z_k}+2}; \theta_{\beta_{z_k}+3}]^T$ : az  $x$ -edik AGV az  $y$ -edik szállítmány esetében a teljes útvonalának pontjai a bejárás sorrendjében,
- $C$ : az útvonalszakaszok száma,
- $w_c$ : a  $c$ -edik útvonalszakasz,
- $s_{w_c}$ : a  $w_c$  útvonalszakasz hossza,

- $Q$ : szakaszhatároló pontok száma,
- $\Phi_q$ :  $q$ -adik szakaszhatároló pont
- $d_{x,y,i,i+1}$ : az útvonalszakasz hossza az  $x$ -edik AGV  $y$ -edik rakományának  $\theta_{x,y,i}$  és  $\theta_{x,y,i+1}$  pontok közötti szállítása során,
- $\overline{v_{x,y,i,i+1}}$ : az AGV átlagsebessége az  $x$ -edik AGV  $y$ -edik rakományának  $\theta_{x,y,i}$  és  $\theta_{x,y,i+1}$  pontok közötti szállítása során,
- $T_{x,y,i,i+1,w_c} \in \{0,1\}$ : 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,
- $W_{x,y,i,i+1,\Phi_q} \in \{0,1\}$ : 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  $\Phi_q$  pontot érinti-e,
- $t_{0,z_k}$ : a gyártás megkezdésétől a  $k$ -edik termék gyártásának kezdetéig eltelt idő.

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  $\sigma_2$  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:

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

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

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

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

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  $\Phi_q$  pont csak egyszer szerepelhet:*

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

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

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

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

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

8. *Torlódások elkerülése (7.3 alfejezet szerint)*

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

$$\theta_{x,y,i} \neq \theta_{x,y,j}, \text{ ha } i \neq j$$

$$i = 2, 3, \dots, \beta_{x,y} + 1 \in \mathbb{Z}^+, j = 2, 3, \dots, \beta_{x,y} + 1 \in \mathbb{Z}^+ \quad (33)$$

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 tézisem.

## 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]*

## 7 A SZIMULÁCIÓS SZOFTVER

A gyártási folyamat digitális iker párjaként egy egyedi fejlesztésű, általam tervezett szoftver szolgál, mely alkalmas a gyártási feladatok ütemezésére, az anyagmozgatási feladatok kiosztására is.

A szoftver FreeBSD operációs rendszeren futtatható, Perl és C++ programozási nyelveken íródott.

A szoftver három fő komponensből áll, ezek:

- a szimulátor – mely vizuálisan mutatja az üzem működését valós időben egy adott elrendezés esetében,
- a tervezés ütemező – ami lebonyolítja az adott sorrend szerinti gyártást a megadott elrendezésre,
- az elrendezés variátor – ami az összes lehetséges elrendezésen végigküldi az ütemezőt. Alkalmas párhuzamos, elosztott erőforráson való futtatásra.

Bemeneti paraméterek:

- idők (másodperc):
  - az az idő, amit az AGV a bejáratnál eltölt (felrakodás),
  - ugyanez a kijáratnál (lerakodás),
  - AGV-POOL-ban eltöltött idő,
- gyártócellák:
  - a gyártási műveletek (a, b...h),
  - művelet munkavégzési idő (s),
  - alkatrésztár mérete,
  - alkatrész betárolási idő (s),
- AGV:
  - max. AGV darabszám,
  - a bejáratnál és a kijáratnál max. mennyi AGV fér el,
  - AGV prioritás (milyen sorrendben dolgozzuk fel az útvonal kéréseket: AGV sorszám szerint, előre vesszük azt, ami már régóta várakozik, előre vesszük azt, ami a legkevesebb idő óta várakozik),

- sebesség egyenes úton, sebesség kanyarodáskor,
- fékezési védőtávolság,
- gyártócellák térképe:
  - csomópontok (és egyéb nevezetes pontok) koordinátái,
  - bemenet, kimenet koordinátái (ezek kétirányúak így 2-2 pont),
  - 12db cella közepe koordinátái és a bementi és a kimenete melyik csomóponthoz kapcsolódik,
  - mely csomópontok között van útvonal (kapcsolati mátrix),
- gyártócellák:
  - bemeneti/kimeneti puffer helyek vannak-e,
  - a cellában a gyártás befejezése előtt mennyi idővel engedünk útvonalat kérni ide (még megy a gyártás, de már elindulhat arrafele a következő munkadarab, cellánként max 1db ilyen előpuffer van),
  - útvonal deallokáció (amikor az AGV a csomópont közepén van, akkor a maga mögött hagyott szakasz foglaltságát felszabadítja (ha más AGV miatt is foglalt azt nem, csak a sajátját) - mennyi idővel ez előtt tesszük meg a deallokációt (max a sebesség és a védőtávolság által adódó idő, minimum meg 0),
- gyártási lista:
  - max elemszám (a mintagyárban 3000 ez az érték),
  - lista elemei (minden sor egy termék pl. abdegh).

A szimulátorban alkalmazott legkisebb időegység a futtatás előtt meghatározható, 1/50 másodpercet alkalmaztam minden esetben.

A tervezés ütemező futtatásának eredménye kétféle lehet annak függvényében, hogy a szimulátort is szeretnénk-e használni:

- csak a gyártási idő,
- minden paraméter, ami a vizuális megjelenítéshez kell.

Ha a szimulátort is szeretnénk használni, akkor 1/50 másodpercenként mindent rögzíteni kell, a tervezés ütemezőt „beszédés” módban kell futtatnunk és el kell készülnön a grafikus megjelenítő fájl is. A „beszédés” mód egy karakteres megjelenítő, a gyártás elemi lépései mellett debug információk olvashatók le a kijelzőről, illetve ezen információk rögzítésre is kerülnek egy kb. 60ezer soros fájlban. Ha csak a gyártási időre vagyunk kíváncsiak, akkor

elegendő a tervező ütemező „néma” módban való futtatása. A két megoldás futtatás időigénye jelentősen eltér, a szimulátor estében pár perc, míg a tervezés ütemező „néma” módban pár másodperc alatt ad eredményt.

```

/home/work/development:local/ibo_matrix/head/kimenet.txt 103938/3680K 2%
%I imAgv @21 at AGV reached :, new order: , t=81721
%I imRoute @17: 1 : >; 960 9 | 39 33 28 23 18 13 12 11 40 {6,-} [cache] t=81922
%I inAgv @21 new job: %41 |>abefgh<:| t=81971
%I imAgv @17 at ENT reached >, new order: abcdgh<;, t=82890
%I imRoute @20: 32 > a; 200 3 | 0 6 A {1,0} [cache] t=83290
%I imRoute @18: 5248 H <; 360 5 | H 20 25 30 41 {1,-} [cache] t=83304
%I imRoute @19: 2944 G h; 200 3 | G 19 H {1,7} [cache] t=83651
%I imRoute @0: 2144 E g; 600 6 | E 17 12 13 18 G {1,6} [cache] t=83652
%I imRoute @2: 2112 E f; 200 3 | E 17 F {1,5} [cache] t=83652
%I imRoute @11: 1697 D e; 1400 11 | D 10 5 4 3 2 1 6 11 16 E {1,4} [cache] t=83652
%I imRoute @8: 3971 J d; 800 8 | J 28 23 24 19 14 9 D {1,3} [cache] t=83653
%I imAgv @18 at EXIT reached <, new order: :, t=83668
%I imRoute @4: 448 A b; 200 3 | A 7 B {1,1} [cache] t=83691
%I imAgv @23 at G reached g, new order: h<;, t=83700
%I imAgv @7 at E reached e, new order: gh<;, t=83701
%I imAgv @5 at D reached d, new order: egh<;, t=83702
%I imAgv @20 at A reached a, new order: degh<;, t=83740
%I imAgv @19 at H reached h, new order: <;, t=83853
%I imAgv @2 at F reached f, new order: gh<;, t=83874
%I imAgv @4 at B reached b, new order: degh<;, t=83951
%I inAgv @16 job finished: %16 t=84068
%I imRoute @16: 5408 < ; 450 5 | 38 35 34 42 43 {1,-} [cache] t=84068
%I imAgv @16 at AGV reached :, new order: , t=84522
%I imRoute @21: 1 : >; 960 9 | 39 33 28 23 18 13 12 11 40 {6,-} [cache] t=84722
%I inAgv @16 new job: %42 |>abdegh<:| t=84771
%I imAgv @13 at C reached c, new order: degh<;, t=84771
%W inAgv AGV=6 STUCK(3750), t=85601
%I imAgv @21 at ENT reached >, new order: abefgh<;, t=85690
%I imRoute @9: 64 > b; 600 6 | 0 6 1 2 7 B {1,1} [cache] t=86091
%I imRoute @19: 5248 H <; 360 5 | H 20 25 30 41 {1,-} [cache] t=86104
%I imRoute @22: 1696 D e; 1200 9 | D 10 15 14 13 12 11 16 E {1,4} [cache] t=86202
%I imAgv @11 at E reached e, new order: gh<;, t=86250
%I imRoute @23: 2944 G h; 200 3 | G 19 H {1,7} [cache] t=86451
%I imRoute @3: 4832 L g; 800 7 | L 30 25 24 23 18 G {1,6} [cache] t=86452
%I imRoute @10: 1281 C d; 600 7 | C 9 14 19 24 29 L {1,11} [cache] t=86452
%I imAgv @19 at EXIT reached <, new order: :, t=86468
%I imAgv @19 at EXIT reached <, new order: :, t=86468
%I Help %2UnWrap %3Quit %4Hex %5Goto %6 %7Search %8Raw %9Format %10Quit

```

21. ábra: A tervezés ütemező kimenetének részlete „beszédés” módban (saját szerkesztés)

A szimulátor segítségével a gyártási folyamat tetszőleges időpillanata vagy időtartama megtekinthető, valójában a „beszédés” módú tervezés ütemező kimenete kerül vizualizálásra. Leolvasható a gyártás kezdete óta eltelt idő, az elkészült munkadarabok száma, az egyes cellákban elvégzett feladatok száma, illetve a cella %-os kihasználtsága. A tervezés ütemező kimenete a megadott sorrend szerinti gyártás során keletkező futási információk regisztrálása a t időtengelyre vetítve, egy "mi történt" fájl készül, később ebből dolgozik a szimulátor. Készül egy AGV napló mely megmutatja, hogy egy-egy AGV mikor mit csinált. Az AGV-k a következő státuszokkal rendelkezhetnek: nem dolgozik, felrakodás, lerakodás, gyártás miatti várakozás, tovább haladásra várakozás, útvonalra várakozás. Cella gyártási napló (gyártás elkezdés, gyártás vége, üresjárat) készül, ennek segítségével lehet a kihasználtságot vizsgálni.

A variátor akkor használjuk, amikor tömeges futtatásra van szükség.

A variátor a legjobb N db időeredménnyel rendelkező gyártásról a következő aggregált adatokat rögzíti: teljes összes idő (ENTRANCE(0) .. EXIT(n)), EXIT idő átlag, variancia,

maximális AGV szükséglet, AGV kihasználtság %-ra lebontva az egyes státuszok szerint, cellák %-os kihasználtsági adatai, 1db termék elkészülési idő átlag, variancia.

|              |       |         |                   |
|--------------|-------|---------|-------------------|
| aaaabfgegcdh | 0%    | -318min | [4999999999 1]    |
| ababdehfeagf | 0.06% | -318min | [7593119 8774486] |
| abefbfhacgd  | 0.12% | -318min | [7337068 8774486] |
| aabhbhcegcd  | 0.18% | -318min | [7337068 8774486] |
| aaedqfhabce  | 0.24% | -317min | [7337068 8774486] |
| aachfgcdebc  | 0.3%  | -317min | [7337068 8774486] |
| aaebghcbbf   | 0.36% | -317min | [7327711 8774486] |
| aaehfgcdbg   | 0.42% | -317min | [7327711 8774486] |
| aaedbfahgdc  | 0.48% | -317min | [7327711 8782269] |
| aaehcndfcb   | 0.54% | -316min | [7327711 8791584] |
| aaefcbcehgga | 0.6%  | -316min | [7327711 8791584] |
| aaefbfdegece | 0.66% | -316min | [7327711 8791584] |
| aagdcefaedh  | 0.72% | -316min | [7327711 8794724] |
| aagghbcfde   | 0.79% | -316min | [7327711 8794724] |
| aaahcgfhedbc | 0.85% | -316min | [7327711 8794724] |
| aaahcbehfdbf | 0.91% | -315min | [7327711 8794724] |
| aaadchfaaeg  | 0.97% | -315min | [7327711 8794724] |
| aaafefebhcd  | 1.03% | -315min | [7324944 8794724] |
| abbdbdcfdghe | 1.09% | -315min | [7317575 8794724] |
| abbgdhebfhbc | 1.15% | -509min | [7317575 8794724] |
| abcgfhedcdd  | 1.21% | -560min | [7317575 8794724] |
| abcebacdhfcg | 1.27% | -476min | [7317575 8794724] |
| abcfggchcdeb | 1.33% | -567min | [7317575 8794724] |
| abcbedfeegg  | 1.39% | -560min | [7317575 8794724] |
| abcdcaeghbf  | 1.45% | -578min | [7317575 8794724] |
| abeddebegech | 1.52% | -546min | [7317575 8794724] |
| abdgaebechd  | 1.58% | -535min | [7317575 8794724] |
| abdhfhgddech | 1.64% | -642min | [7317575 8794724] |
| abecebhfbgda | 1.7%  | -612min | [7317575 8794724] |
| abeecgdaaahf | 1.76% | -512min | [7317575 8794724] |
| abegchdfdfah | 1.82% | -594min | [7317575 8794724] |
| abfaabeehgac | 1.88% | -582min | [7317575 8794724] |
| abfrcgdebbnc | 1.94% | -633min | [7317575 8794724] |

22. ábra: A variátor kimenete futtatás közben (saját szerkesztés)

Ha ismert, hogy a top N időből a legrosszabb és egy gyártás még elkészülte előtt eléri ezt az időt (az első i termék gyártási ideje összeadva az i-edik termék elkészültekor még gyártásba nem került termékek összesített műveleti idejeivel), akkor az ütemező megáll és "nem érdemes végigszámolni" státuszt ad válaszként.

Mintagyáramban a vizsgálatra használt tervezés ütemezővel egy adott layout esetében a gyártási idő számítása szerver processzorok alkalmazása esetében 1-2 másodpercet, míg pl. egy raspberry pi-nél 10-12 másodpercet vesz igénybe. Processzormagonként egy időben egy számítás végezhető, tehát egy 128 magos processzor 1-2s alatt 128 elrendezés esetében adja meg a gyártási időt. Az elrendezés variátor használatával a futtatások párhuzamosíthatók, tetszőleges számú hardver vonható be a számítások elvégzésére. További jelentős gyorsulás (várhatóan 1-2 nagyságrendnyi) érhető el azzal, ha a szoftver alkalmassá van téve vektorprocesszoron történő futtatásra.

## 8 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.

### 8.1 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  $298 \bmod 6 = 4$  ( $298=49*6+4$ ) 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 nyilak, 19. 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.

*Az útvonal meghatározásakor a következő további korlátozásokat, elhanyagolásokat alkalmazom:*

- Az AGV-k száma nem korlátozott (csak az útvonalkérések miatt indirekt módon), így jelen példában nem érdemes foglalkozni az AGV-k üzemidejével, töltési idejével sem.
- Az AGV-k mind egyformák, nem tudnak tolatni, két állandó sebességgel rendelkeznek (egyenes úton, kanyarban).
- A WAREHOUSE-on, AGV-POOL-on, TOOLSTORE-on belüli mozgásokat nem vizsgáljuk, csak egy átlagos ott töltött idővel számolunk.
- Egy munkadarabhoz egy AGV tartozik és egy AGV egyszerre csak egy munkadarabot szállít (nincs munkamegosztás).
- Az AGV egy cella output helyéről nem indul el addig, amíg nem tudja lefoglalni a célcella input várakozó helyére vezető útvonalat.

- Ha egy AGV módosítani szeretné a pozícióját, útvonal engedélyt kér, ami alapján kijelölésre kerül a helyváltoztatás pontos pályája. Egy útszakaszon (elágazástól elágazásig) több, egy irányba haladó AGV tartózkodhat, a megfelelő követési távolság megtartásával.
- A lefoglalt útvonalon szembe irányú forgalmat nem engedünk meg.

## 8.2 A cellák elrendezésének optimalizálási lehetőségei

### *Az összes lehetséges elrendezés vizsgálata*

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).

Az összes lehetséges elrendezés a fenti eseteket vizsgálva:

- Ebben az esetben az egyik cellából 5 míg a többiből 1-1 darab van, pl. a, a, a, a, a, b, c, d, e, f, g, h cellák. A lehetséges esetek száma a 12 elem ismétléses permutációjával számítható:  $\frac{12!}{5!}$ . Mivel 8 féle cella van és ezek közül bármelyik lehet 5 példányban, így adódik, hogy  $\frac{12!}{5!} \cdot 8 = 31\,933\,440$  elrendezés lehetséges.
- Ebben az esetben az egyik cellából 4, egy másikkól 2, míg a többiből 1-1 darab van, pl. a, a, a, a, b, b, c, d, e, f, g, h cellák. A lehetséges esetek száma a 12 elem ismétléses permutációjával számítható:  $\frac{12!}{4! \cdot 2!}$ . A 4 példányban található cella 8 féleképpen, majd ezután a 2 példányban levő cella 7 féleképpen választható ki, így adódik, hogy  $\frac{12!}{4! \cdot 2!} \cdot 8 \cdot 7 = 558\,835\,200$  elrendezés lehetséges.
- Ebben az esetben az két cellából 3-3, míg a többiből 1-1 darab van, pl. a, a, a, b, b, b, c, d, e, f, g, h cellák. A lehetséges esetek száma a 12 elem ismétléses permutációjával számítható:  $\frac{12!}{3! \cdot 3!}$ . A két 3 példányban található cella

$\binom{8}{2}$  féleképpen választható ki, így adódik, hogy  $\frac{12!}{3! \cdot 3!} \cdot \binom{8}{2} = 372\,556\,800$  elrendezés lehetséges.

d) Ebben az esetben az egyik cellából 3, két másikkól 2-2, míg a többiből 1-1 darab van, pl. a, a, a, b, b, c, c, d, e, f, g, h cellák. A lehetséges esetek száma a 12 elem ismétléses permutációjával számítható:  $\frac{12!}{3! \cdot 2! \cdot 2!}$ . A 3 példányban található cella 8 féleképpen, majd ezután a két 2-2 példányban levő cella  $\binom{7}{2}$  féleképpen választható ki, így adódik, hogy  $\frac{12!}{3! \cdot 2! \cdot 2!} \cdot 8 \cdot \binom{7}{2} = 3\,353\,011\,200$  elrendezés lehetséges.

e) Ebben az esetben az négy cellából 2-2, míg a többiből 1-1 darab van, pl. a, a, b, b, c, c, d, d, e, f, g, h cellák. A lehetséges esetek száma a 12 elem ismétléses permutációjával számítható:  $\frac{12!}{2! \cdot 2! \cdot 2! \cdot 2!}$ . A négy 2 példányban található cella  $\binom{8}{4}$  féleképpen választható ki, így adódik, hogy  $\frac{12!}{2! \cdot 2! \cdot 2! \cdot 2!} \cdot \binom{8}{4} = 2\,095\,632\,000$  elrendezés lehetséges.

Mindösszesen 6 411 968 640.

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

7. 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 7. 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 prioritizáció nélkül, be- és kimeneti várakozóhellyel a gyártócellákban).

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

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

| elrendezés    | gyártási idő (min) |
|---------------|--------------------|
| bbdcfdeagha   | 2424,65            |
| aabdefebdghe  | 2425,09            |
| abbcefaedddgh | 2425,32            |
| cebedaghadfb  | 2425,42            |
| bdbeacdfacgh  | 2425,56            |
| aaacefghdabb  | 2425,87            |
| bgabacehdfcd  | 2425,89            |
| eghbeaacbfdd  | 2425,92            |
| afghbebedcda  | 2425,97            |
| cbeafghadbd   | 2425,98            |
| cfbdeeghdaab  | 2426,09            |
| dbahfcegdaeb  | 2426,09            |
| bbafeghaeddc  | 2426,20            |
| baahefdecdgb  | 2426,24            |
| efghdebbcaad  | 2426,26            |
| bdcebfghaeaa  | 2426,34            |
| daadbefcbegh  | 2426,39            |
| dadbafghebbe  | 2426,45            |
| efedbaghdabc  | 2426,46            |
| abebdeghafcd  | 2426,54            |

| elrendezés   | gyártási idő (min) |
|--------------|--------------------|
| bgchhffaeacd | 3002,39            |
| afedhffbfhgc | 3002,49            |
| eghfffbhfdac | 3002,99            |
| hhdcgefhhba  | 3003,33            |
| behfgfhcdhfa | 3003,44            |
| hffbdcfheagf | 3003,72            |
| dcgbffheccca | 3003,79            |
| ffchhdaebhg  | 3003,87            |
| aghhdgfbegge | 3003,87            |
| eghbghfchda  | 3004,10            |
| bfgcfefhhafd | 3004,42            |
| fhfdebfcfafg | 3005,08            |
| bhhgffhadecf | 3005,12            |
| edgffahfbhfc | 3005,63            |
| dhebahfhgchh | 3006,21            |
| aefdhhcbffg  | 3006,34            |
| hchahefffdbg | 3006,45            |
| ahfdhgfbcgef | 3007,04            |
| bfgchhehafdf | 3007,10            |
| afcgghfedbh  | 3011,69            |

a b c d  
 e f g h  
 x y z w

Az abcdefghxyzw layout értelmezése:

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 prím módszer**

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 sorszámára  $(i)$  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 prímekekkel 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: 1.: tárolókapacitásnak megfelelő redukció (diszk, adatbázis), 2.: (hálózatot keresztül elérhető) számítási kapacitásnak megfelelő redukció (CPU, memória).

9. táblázat: A szűkített lista legrövidebb gyártási idővel rendelkező elrendezései (saját szerkesztés)

| elrendezés   | gyártási idő (perc) |
|--------------|---------------------|
| acebdaghfdeb | 2432,74             |
| ddebbaghecfá | 2433,28             |
| cbghfēbaddea | 2433,46             |
| eeghcbddafa  | 2433,90             |
| aecbdghadbef | 2433,96             |
| ecabbahddgef | 2434,11             |
| efbbdgcadeah | 2434,17             |
| baedafcedbgh | 2434,23             |
| dabecbfdeagh | 2434,44             |
| ghdafcdeabeb | 2434,51             |

A szűkített elrendezés lista tíz legjobb időeredménnyel rendelkező elrendezését a 9. táblázatban láthatjuk.

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

### Véletlenszámos módszer

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

| módszer  | elrendezés    | gyártási idő (perc) | módszer  | elrendezés    | gyártási idő (perc) |
|----------|---------------|---------------------|----------|---------------|---------------------|
| prím1    | acebdaghfdeb  | 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  | bceadgheadb   | 2432,38             | random4  | bceadgheadb   | 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  | eafdcghabebed | 2430,12             | random8  | eafdcghabebed | 2430,12             |
| random9  | chdfageabcd   | 2433,31             | random9  | chdfageabcd   | 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 | bceadgheadb   | 2432,38             | random13 | bceadgheadb   | 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 | decbfagheadba | 2428,78             | random19 | decbfagheadba | 2428,78             |
| random20 | dagabefcbedh  | 2431,13             | random20 | dagabefcbedh  | 2431,13             |

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\*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 (10. 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.

### 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.

Példa egy egyed felépítésére:

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

23. ábra: Egy egyed génjei (saját szerkesztés)

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 öröklje). 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 |

24. 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 |

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

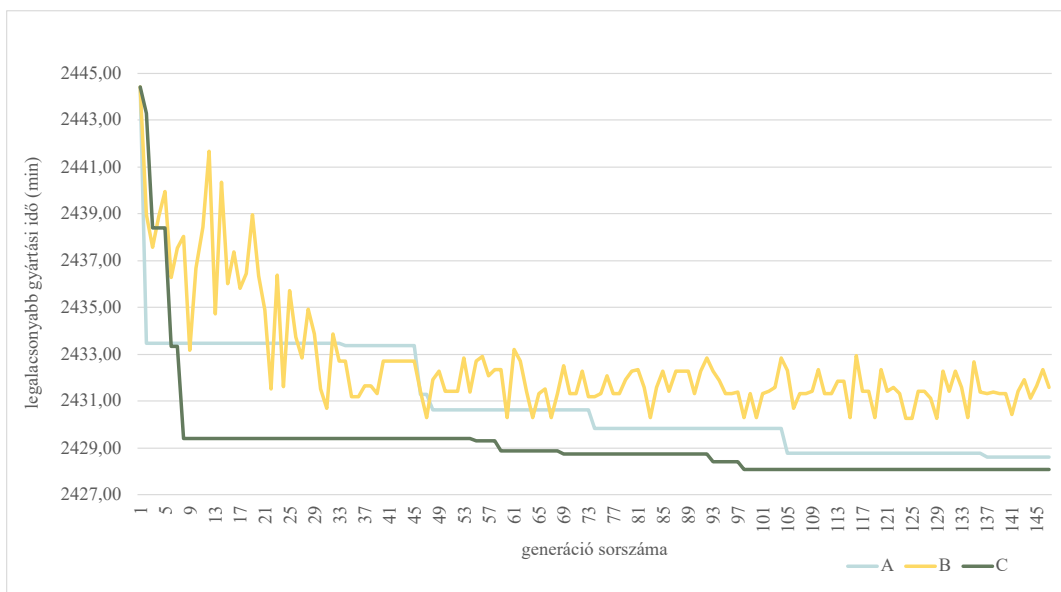
Az első utód nem életképes, mert nincs benne b és h művelet, a második utód életképes, mind a 8 gyártási műveletből tartalmaz legalább egyet.

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



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

Hogy összehasonlítható legyen az eredmény a két prímés és a random kiválasztásos módszerrel, addig futtattam az algoritmust, míg kb. 164 465 egyed 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. Látszik, hogy célravezetőbb olyan algoritmust használni, ahol a szülők is bekerülhetnek a következő populációba.

A különféle módszerekkel kapott legjobb eredmények összefoglalóját mutatja be a következő táblázat. A legrövidebb gyártási idő 2428,06 perc, ami az *abbceghfaded* elrendezés esetében adódott.

11. táblázat: A legalacsonyabb gyártási idővel rendelkező layoutok (saját szerkesztés)

| módszer                | gyártási idő | layout       | hozzávetőleges futtatási idő (óra) |
|------------------------|--------------|--------------|------------------------------------|
| két prímés módszer     | 2431,14      | fdbaeghabced | 8                                  |
| véletlenszámos módszer | 2428,78      | decbfaghedba | 8                                  |
| genetikus algoritmus   | A 2428,78    | ddaecghafbb  | 16                                 |
|                        | B 2430,27    | ddaecghafbb  |                                    |
|                        | C 2428,06    | abbceghfaded |                                    |

### 8.3 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 5.1.2.2 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 8.2 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 készül 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 átszortrendezési 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/36] használata, amelyben az információtartalom arányos a kódolás után kapott adatmennyiséggel. Az elméleti háttér tényleges megvalósításához az iparban ismert DEFLATE [I/38] algoritmust használtam a GNU ‘gzip’ [I/39] kiegészítőjén keresztül. Ez LZ77 [I/40] 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.

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

|                  | ábécé szerinti sorrendbe<br>rendezett gyártási lista mérete<br>(byte) | első átszortrendezési kísérlet<br>utáni gyártási lista mérete<br>(byte) | kezdeti véletlen sorrendű<br>gyártási lista mérete<br>(byte) |
|------------------|---|---|--|
| tömörítés nélkül | 19996   | 19996   | 19996  |
| tömörítve        | 314   | 2743  | 3197   |

A GNU ‘shuf’ [I/41] 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.

13. táblázat: 100 véletlenszerűen sorrendezett lista szerinti gyártási idő és fájl méret (saját szerkesztés)

| sorszám | gyártási idő (min) | tömörített méret (byte) | sorszám | gyártási idő (min) | tömörített méret (byte) | sorszám | gyártási idő (min) | tömörített méret (byte) |
|---------|--------------------|-------------------------|---------|--------------------|-------------------------|---------|--------------------|-------------------------|
| 1       | 2423,99            | 3186                    | 35      | 2433,37            | 3223                    | 68      | 2437,99            | 3183                    |
| 2       | 2424,00            | 3206                    | 36      | 2433,57            | 3187                    | 69      | 2438,23            | 3187                    |
| 3       | 2424,86            | 3181                    | 37      | 2434,42            | 3217                    | 70      | 2438,40            | 3201                    |
| 4       | 2425,19            | 3186                    | 38      | 2434,46            | 3193                    | 71      | 2438,45            | 3165                    |
| 5       | 2425,21            | 3215                    | 39      | 2434,55            | 3220                    | 72      | 2438,48            | 3185                    |
| 6       | 2426,23            | 3200                    | 40      | 2434,64            | 3224                    | 73      | 2438,65            | 3202                    |
| 7       | 2426,89            | 3181                    | 41      | 2434,81            | 3201                    | 74      | 2438,68            | 3182                    |
| 8       | 2427,08            | 3227                    | 42      | 2434,96            | 3187                    | 75      | 2438,73            | 3211                    |
| 9       | 2427,39            | 3185                    | 43      | 2434,99            | 3221                    | 76      | 2439,82            | 3242                    |
| 10      | 2427,54            | 3211                    | 44      | 2435,16            | 3187                    | 77      | 2440,11            | 3255                    |
| 11      | 2428,22            | 3196                    | 45      | 2435,17            | 3185                    | 78      | 2440,55            | 3225                    |
| 12      | 2429,38            | 3241                    | 46      | 2435,55            | 3209                    | 79      | 2440,65            | 3189                    |
| 13      | 2429,41            | 3207                    | 47      | 2435,59            | 3192                    | 80      | 2440,91            | 3224                    |
| 14      | 2429,79            | 3217                    | 48      | 2435,61            | 3213                    | 81      | 2440,95            | 3210                    |
| 15      | 2430,04            | 3210                    | 49      | 2435,69            | 3205                    | 82      | 2441,09            | 3208                    |
| 16      | 2430,05            | 3173                    | 50      | 2435,84            | 3207                    | 83      | 2441,55            | 3222                    |
| 17      | 2430,33            | 3199                    | 51      | 2435,85            | 3225                    | 84      | 2441,65            | 3202                    |
| 18      | 2430,58            | 3197                    | 52      | 2435,89            | 3222                    | 85      | 2442,16            | 3192                    |
| 19      | 2430,62            | 3224                    | 53      | 2435,99            | 3221                    | 86      | 2442,32            | 3193                    |
| 20      | 2430,89            | 3183                    | 54      | 2436,05            | 3240                    | 87      | 2442,39            | 3199                    |
| 21      | 2431,01            | 3194                    | 55      | 2436,19            | 3219                    | 88      | 2442,44            | 3214                    |
| 22      | 2431,17            | 3204                    | 56      | 2436,22            | 3190                    | 89      | 2442,82            | 3232                    |
| 23      | 2431,30            | 3200                    | 57      | 2436,30            | 3209                    | 90      | 2442,92            | 3212                    |
| 24      | 2431,57            | 3215                    | 58      | 2436,72            | 3215                    | 91      | 2442,94            | 3185                    |
| 25      | 2432,03            | 3209                    | 59      | 2436,81            | 3189                    | 92      | 2443,03            | 3259                    |
| 26      | 2432,04            | 3220                    | 60      | 2436,96            | 3215                    | 93      | 2443,04            | 3216                    |
| 27      | 2432,13            | 3219                    | 61      | 2437,02            | 3208                    | 94      | 2443,31            | 3195                    |
| 28      | 2432,14            | 3175                    | 62      | 2437,11            | 3200                    | 95      | 2443,33            | 3208                    |
| 29      | 2432,24            | 3232                    | 63      | 2437,41            | 3211                    | 96      | 2444,95            | 3214                    |
| 30      | 2432,47            | 3200                    | 64      | 2437,45            | 3203                    | 97      | 2445,54            | 3201                    |
| 31      | 2432,49            | 3206                    | 65      | 2437,75            | 3210                    | 98      | 2445,63            | 3223                    |
| 32      | 2432,51            | 3219                    | 66      | 2437,80            | 3200                    | 99      | 2445,81            | 3172                    |
| 33      | 2433,02            | 3208                    | 67      | 2437,92            | 3202                    | 100     | 2446,69            | 3236                    |
| 34      | 2433,35            | 3222                    |         |                    |                         |         |                    |                         |

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.

## 8.4 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 káoszhelyzeteket.

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 leszorítására 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 mozgása (a gyártócellába az útvonal csomóponttól befelé és csomópontig kifelé),
- (w) várakozás a munkadarab mozgására (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 változatlanlansága mellett futtattam méréseket

- várakozóhely nélküli (00),
- csak bemeneti várakozóhellyel (10),
- csak kimeneti várakozóhellyel (01),
- mindkét várakozóhellyel rendelkező (11) konfigurációk esetében.

A következő táblázat megmutatja, hogy mennyi többlet gyártási idő keletkezik, ha nem kettő, hanem nulla vagy egy várakozóhellyel rendelkeznek a gyártócellák. 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.

14. táblázat: A puffterületek hiányának a gyártási időre gyakorolt hatása percben megadva  
(saját szerkesztés)

| AGV-k száma | puffer(ek) | elrendezés 1 | elrendezés 2 | elrendezés 3 | elrendezés 4 | elrendezés 5 | elrendezés 6 | elrendezés 7 | elrendezés 8 | elrendezés 9 | elrendezés 10 |
|-------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 18          | 00         | 930,47       | 925,44       | 927,17       | 907,06       | 921,71       | 915,84       | 921,04       | 925,18       | 922,15       | 938,27        |
| 18          | 10         | 31,41        | 21,84        | 31,59        | 28,01        | 24,85        | 33,47        | 21,02        | 30,12        | 29,48        | 20,10         |
| 18          | 01         | 529,73       | 535,59       | 530,54       | 518,70       | 522,34       | 531,71       | 526,99       | 534,67       | 533,55       | 536,20        |
| 18          | 11         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00          |
| 19          | 00         | 976,25       | 944,77       | 968,83       | 977,41       | 969,06       | 985,02       | 958,09       | 980,26       | 987,54       | 981,43        |
| 19          | 10         | 43,87        | 34,00        | 38,44        | 44,00        | 44,37        | 45,47        | 31,91        | 34,46        | 47,16        | 43,40         |
| 19          | 01         | 573,97       | 583,54       | 589,78       | 576,16       | 597,34       | 580,97       | 569,82       | 582,30       | 584,48       | 588,66        |
| 19          | 11         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00          |
| 20          | 00         | 1014,72      | 1000,37      | 1015,23      | 1003,46      | 1010,43      | 1009,81      | 993,21       | 1010,45      | 997,78       | 1009,89       |
| 20          | 10         | 63,47        | 51,23        | 55,93        | 62,78        | 65,05        | 57,29        | 53,33        | 57,74        | 66,89        | 52,90         |
| 20          | 01         | 614,19       | 609,40       | 620,54       | 604,32       | 621,78       | 612,67       | 616,78       | 616,64       | 634,05       | 612,93        |
| 20          | 11         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00          |
| 21          | 00         | 1020,28      | 1016,64      | 1020,42      | 1010,73      | 1035,93      | 1022,18      | 1004,13      | 1024,07      | 1009,30      | 1018,95       |
| 21          | 10         | 76,83        | 74,82        | 75,49        | 69,93        | 70,36        | 72,72        | 69,72        | 68,22        | 71,88        | 78,61         |
| 21          | 01         | 637,68       | 621,42       | 632,15       | 631,58       | 644,40       | 646,34       | 627,71       | 634,52       | 640,47       | 652,28        |
| 21          | 11         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00          |
| 22          | 00         | 1014,10      | 1018,82      | 1009,65      | 1017,94      | 1029,42      | 1021,67      | 1008,44      | 1035,88      | 1018,27      | 1041,54       |
| 22          | 10         | 84,09        | 83,04        | 67,81        | 80,08        | 79,97        | 81,45        | 76,85        | 77,70        | 78,91        | 78,91         |
| 22          | 01         | 635,11       | 642,39       | 652,57       | 639,59       | 631,88       | 640,18       | 634,40       | 631,36       | 637,98       | 643,74        |
| 22          | 11         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00          |
| 23          | 00         | 1015,70      | 1019,27      | 1012,08      | 1020,77      | 1029,08      | 1021,47      | 1012,03      | 1035,58      | 1026,69      | 1040,12       |
| 23          | 10         | 83,51        | 85,02        | 68,93        | 73,30        | 82,55        | 87,53        | 85,78        | 87,82        | 81,03        | 79,22         |
| 23          | 01         | 650,52       | 644,51       | 638,33       | 642,26       | 631,39       | 633,93       | 644,68       | 649,63       | 651,55       | 633,51        |
| 23          | 11         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00          |
| 24          | 00         | 1011,72      | 1017,36      | 1017,42      | 1021,73      | 1027,57      | 1023,00      | 1010,37      | 1032,78      | 1030,51      | 1040,99       |
| 24          | 10         | 79,50        | 67,72        | 81,27        | 88,70        | 78,83        | 86,32        | 80,68        | 72,48        | 86,07        | 72,80         |
| 24          | 01         | 630,17       | 639,22       | 650,32       | 657,90       | 635,85       | 659,10       | 629,41       | 648,82       | 660,24       | 647,16        |
| 24          | 11         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00          |
| 25          | 00         | 1018,82      | 1022,57      | 1017,52      | 1020,18      | 1031,94      | 1018,85      | 1016,62      | 1036,56      | 1026,85      | 1043,67       |
| 25          | 10         | 83,40        | 79,07        | 89,82        | 72,43        | 79,75        | 82,77        | 91,59        | 83,33        | 74,06        | 85,83         |
| 25          | 01         | 660,85       | 647,23       | 638,93       | 644,84       | 649,51       | 638,47       | 632,98       | 642,06       | 664,44       | 640,11        |
| 25          | 11         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00          |
| 26          | 00         | 1022,55      | 1020,92      | 1017,77      | 1014,09      | 1030,38      | 1025,49      | 1010,81      | 1035,33      | 1020,03      | 1041,01       |
| 26          | 10         | 85,80        | 74,64        | 76,60        | 69,86        | 91,16        | 85,68        | 80,63        | 83,63        | 85,39        | 79,79         |
| 26          | 01         | 649,31       | 649,80       | 644,61       | 637,55       | 635,53       | 639,22       | 638,22       | 644,89       | 632,03       | 646,48        |
| 26          | 11         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00          |
| 27          | 00         | 1016,71      | 1019,19      | 1023,55      | 1020,75      | 1032,55      | 1022,45      | 1007,36      | 1035,73      | 1026,64      | 1044,32       |
| 27          | 10         | 89,58        | 77,80        | 88,67        | 78,91        | 87,88        | 94,56        | 79,84        | 87,33        | 82,19        | 78,82         |
| 27          | 01         | 632,95       | 642,17       | 637,15       | 629,11       | 655,77       | 647,62       | 629,78       | 646,20       | 653,88       | 648,42        |
| 27          | 11         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00          |
| 28          | 00         | 1017,97      | 1024,60      | 1017,59      | 1023,80      | 1025,36      | 1022,26      | 1011,25      | 1041,66      | 1024,31      | 1039,69       |
| 28          | 10         | 83,20        | 80,30        | 82,85        | 81,89        | 76,45        | 86,42        | 81,06        | 82,73        | 83,51        | 81,63         |
| 28          | 01         | 646,43       | 647,55       | 642,84       | 635,39       | 643,59       | 640,53       | 641,02       | 657,10       | 645,90       | 644,10        |
| 28          | 11         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00          |

### *AGV prioritizáció*

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 prioritizálásának ötlete attól függően, hogy a munkadarab mekkora sort tart fel. Legnagyobb prioritás a kettős pufferelesű 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 puffereben,
- +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 prioritizálás alkalmazása csak kis (0.1% .. 0.5%) mértékben javítja az összesített teljesítményt, viszont jelentősen lassítja a teljes szimuláció számítási idejét.

Emiatt összességében akkor érdemes ebben az irányban a megoldást keresni, ha a számítási kapacitás rendelkezésre áll és nem lehet hasznosabban (a többi paraméter variációinak végigjárására) elhasználni.

### *AGV szám*

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 bbdcfdeeagha cellaelrendezés és egy véletlenszerű sorrenddel generált gyártási lista esetében mutatja a mérési eredményeket a következő táblázat.

15. 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            |             |                    |

16. táblázat: Gyártási idő karakterisztika az AGV szám függvényében (saját szerkesztés)

| AGV | PROD.TIME (h) | WORKCNT<br>(piece) | WORKSTEP (h) | MOVING (h) | WAITING FOR<br>PATH (h) | WAITING FOR<br>ROAD (h) | MOVING TIME<br>(h) | WORKING TIME<br>(h) | WAITING TIME<br>(h) |
|-----|---------------|--------------------|--------------|------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| 12  | 56,84         | 250,00             | 44,74        | 7,35       | 0,79                    | 3,90                    | 88,20              | 536,90              | 56,27               |
| 13  | 53,15         | 230,80             | 41,30        | 6,81       | 0,98                    | 4,01                    | 88,57              | 536,90              | 64,87               |
| 14  | 50,08         | 214,30             | 38,35        | 6,38       | 1,17                    | 4,14                    | 89,30              | 536,90              | 74,35               |
| 15  | 47,47         | 200,00             | 35,79        | 5,99       | 1,42                    | 4,23                    | 89,86              | 536,90              | 84,76               |
| 16  | 45,46         | 187,50             | 33,56        | 5,64       | 1,85                    | 4,39                    | 90,25              | 536,90              | 99,83               |
| 17  | 43,88         | 176,50             | 31,58        | 5,34       | 2,42                    | 4,53                    | 90,72              | 536,90              | 118,12              |
| 18  | 42,69         | 166,70             | 29,83        | 5,07       | 3,06                    | 4,72                    | 91,30              | 536,90              | 140,10              |
| 19  | 41,79         | 157,90             | 28,26        | 4,83       | 3,74                    | 4,96                    | 91,68              | 536,90              | 165,38              |
| 20  | 41,07         | 150,00             | 26,84        | 4,61       | 4,38                    | 5,25                    | 92,14              | 536,90              | 192,54              |
| 21  | 40,66         | 142,90             | 25,57        | 4,41       | 5,18                    | 5,50                    | 92,71              | 536,90              | 224,41              |
| 22  | 40,55         | 136,40             | 24,40        | 4,24       | 6,05                    | 5,88                    | 93,24              | 536,90              | 262,40              |
| 23  | 40,46         | 130,40             | 23,34        | 4,06       | 6,88                    | 6,19                    | 93,49              | 536,90              | 300,68              |
| 24  | 40,51         | 125,00             | 22,37        | 3,91       | 7,74                    | 6,51                    | 93,78              | 536,90              | 342,05              |
| 25  | 40,49         | 120,00             | 21,48        | 3,78       | 8,45                    | 6,81                    | 94,49              | 536,90              | 381,66              |
| 26  | 40,52         | 115,40             | 20,65        | 3,66       | 9,19                    | 7,06                    | 95,06              | 536,90              | 422,32              |
| 27  | 40,53         | 111,10             | 19,89        | 3,53       | 9,80                    | 7,35                    | 95,23              | 536,90              | 463,12              |
| 28  | 40,52         | 107,10             | 19,17        | 3,43       | 10,43                   | 7,52                    | 96,02              | 536,90              | 502,65              |
| 29  | 40,44         | 103,40             | 18,51        | 3,32       | 10,90                   | 7,75                    | 96,37              | 536,90              | 540,68              |
| 30  | 40,43         | 100,00             | 17,90        | 3,23       | 11,39                   | 7,96                    | 96,97              | 536,90              | 580,35              |
| 31  | 40,30         | 96,80              | 17,32        | 3,16       | 11,77                   | 8,09                    | 97,90              | 536,90              | 615,70              |
| 32  | 40,04         | 93,80              | 16,78        | 3,06       | 12,01                   | 8,23                    | 98,08              | 536,90              | 647,88              |
| 33  | 40,45         | 90,90              | 16,27        | 3,00       | 12,81                   | 8,41                    | 99,04              | 536,90              | 700,38              |
| 34  | 40,12         | 88,20              | 15,79        | 2,93       | 13,01                   | 8,43                    | 99,76              | 536,90              | 729,05              |
| 35  | 39,94         | 85,70              | 15,34        | 2,86       | 13,31                   | 8,48                    | 100,14             | 536,90              | 762,60              |
| 36  | 38,68         | 83,30              | 14,91        | 2,78       | 12,78                   | 8,26                    | 99,93              | 536,90              | 757,44              |
| 37  | 39,64         | 81,10              | 14,51        | 2,73       | 13,89                   | 8,54                    | 101,15             | 536,90              | 830,12              |
| 38  | 38,93         | 78,90              | 14,13        | 2,67       | 13,77                   | 8,40                    | 101,45             | 536,90              | 842,75              |
| 39  | 38,39         | 76,90              | 13,77        | 2,61       | 13,80                   | 8,26                    | 101,67             | 536,90              | 860,18              |
| 40  | 37,16         | 75,00              | 13,42        | 2,53       | 13,28                   | 7,97                    | 101,10             | 536,90              | 850,10              |

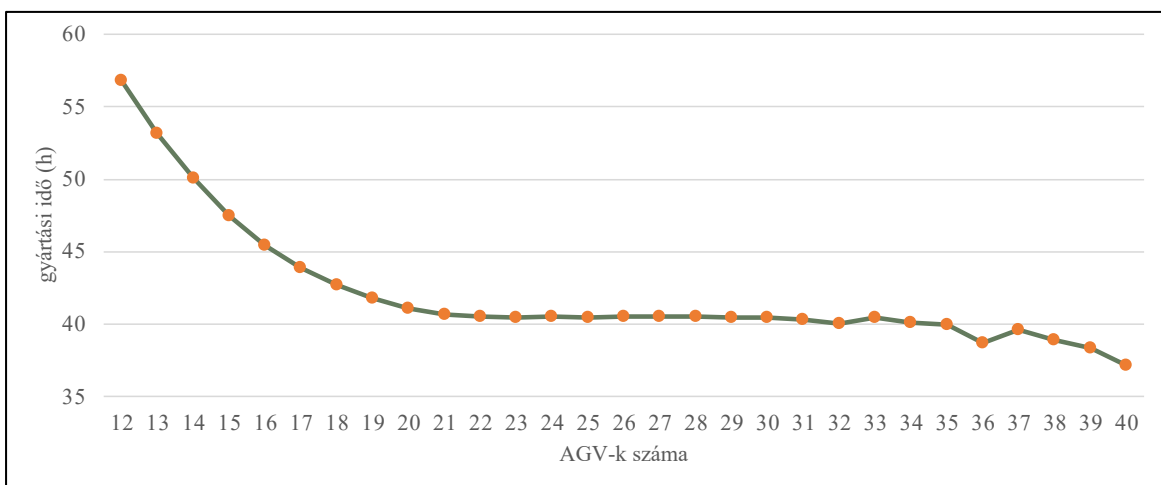
A 16. táblázat oszlopai a következők:

- PROD.TIME: a 3000 termék elkészítésének időszükséglete,
- WORKCNT: egy AGV átlagosan ennyi terméket szállít a folyamat során,
- WORKSTEP: fel-, lerakodási idők, AGV-POOL-beli technikai idő, gyártócellákban munkával töltött idő targoncánként összesítve, átlagosan,
- MOVING: anyagmozgatási idő targoncánként összesítve, átlagosan,
- WAITING FOR PATH: útvonalra való várakozás ideje targoncánként összesítve, átlagosan,
- WAITING FOR ROAD: útra való várakozás ideje targoncánként összesítve, átlagosan,
- MOVING TIME: az AGV-k összes anyagmozgatással töltött ideje,
- WORKING TIME: az AGV-k összes munkával töltött ideje,
- WAITING TIME: az AGV-k összes várakozással töltött ideje.

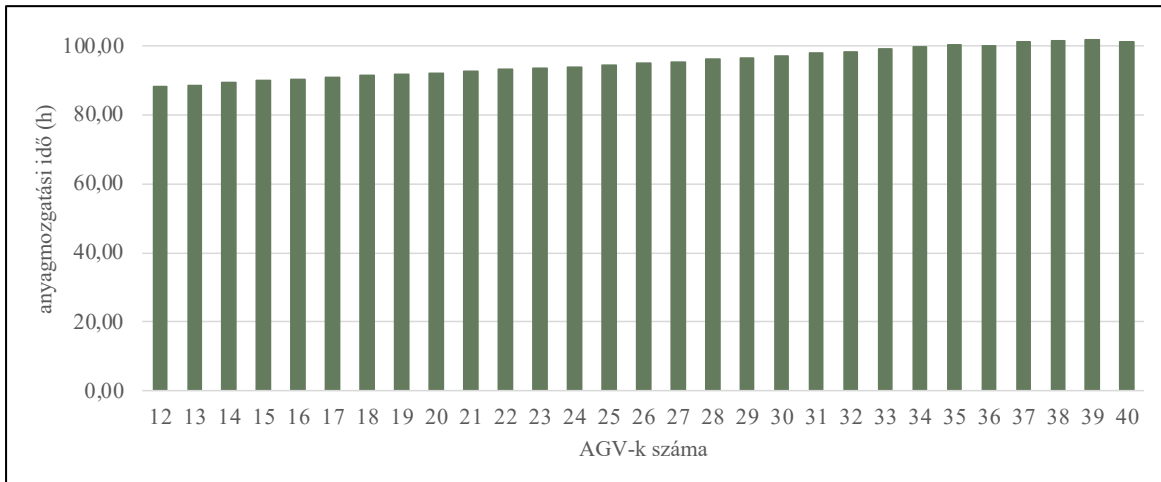
A táblázatból látszik, hogy 23db AGV felett már nincs jelentős javulás az idő tekintetében, ugyanakkor az egyes AGV-k várakozással töltött ideje jelentősen növekednek.

Az anyagmozgatással töltött idő az AGV szám növekedésével növekszik, ennek fő oka az, hogy nagyobb mennyiségű AGV együttes jelenléte több esetben hosszabb mozgatósi útvonalakat eredményez.

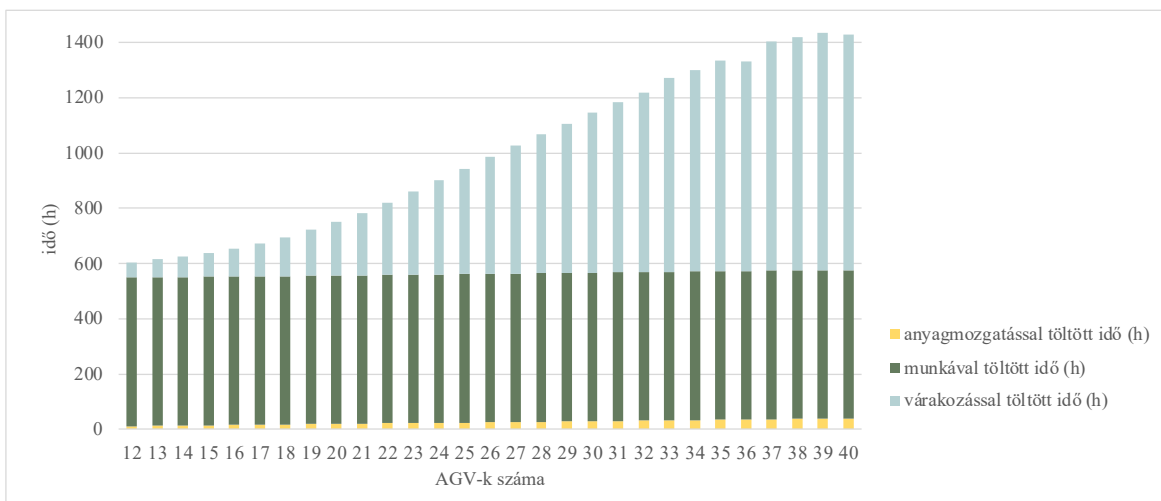
A 28-30. ábrák grafikusán szemlélteti a kapott eredményeket.



27. ábra: A gyártás teljes időszükséglete az AGV-k mennyiségének függvényében (saját szerkesztés)



28. ábra: Az anyagmozgatással töltött összes idő az AGV-k mennyiségének függvényében (saját szerkesztés)



29. ábra: Az anyagmozgatással, munkával, várakozással töltött összes idő az AGV-k mennyiségének függvényében (saját szerkesztés)

Egy-egy layout szerinti elhelyezkedést megvizsgáltunk abból a szempontból, hogy miképp változnak a várakozási, mozgási, gyártási idők az AGV-k számának függvényében.

Az  $y$ -edik munkadarab gyártásának ideje:

$$t_y = \sum_{i=0}^{\beta_y+2} \left( t_{Pr,y}^{\theta_{y,i}} + t_{WP,y}^{\theta_{y,i}} + \sum_{j=0}^{k_i} t_{WR_{j,y}}^{\theta_{y,i},\theta_{y,i+1}} + t_{M,y}^{\theta_{y,i},\theta_{y,i+1}} \right)$$

ahol

- $\theta$ : gyártócellák, AGV-POOL, ENTRANCE, EXIT pontok,
- $\beta_y$ : az  $y$ -edik munkadarab gyártási folyamatlistájának elemszáma (elvégzendő műveletek száma),

- $\mathbf{s}_y = [\Theta_{y,0}; \Theta_{y,1}; \Theta_{y,2}; \Theta_{y,3}; \dots; \Theta_{y,\beta_y+1}; \Theta_{\beta_y+2}; \Theta_{\beta_y+3}]^T$  az  $y$ -edik munkadarab esetében az AGV teljes útvonalának pontjai a bejárás sorrendjében,
- $t_{Pr,y}^{\Theta_{y,i}}$  az  $i$ -edik ponton a munka ideje,
- $t_{WP,y}^{\Theta_{y,i}}$  az  $i$ -edik pontban az útvonalra várakozás ideje,
- $t_{WR,y}^{\Theta_{y,i},\Theta_{y,i+1}}$  az  $i$ -edik pontban és az  $(i+1)$ -edik pontig tartó útvonalon az útra való várakozási idők elemei ( $k_i$  db),
- $t_{M,y}^{\Theta_{y,i},\Theta_{y,i+1}}$  az anyagmozgatási idő az  $i$ -edik és az  $(i+1)$ -edik pont között.
- A 0. pont az AGV-POOL, az 1. az ENTRANCE, a  $(\beta_y + 2)$ -edik az EXIT, a  $(\beta_y + 3)$ -edik az AGV-POOL.
- Mintagyáramban a fel- és lerakodási időket 120s-ban, míg az AGV-POOL-ban mindenképp eltöltendő technikai időt 60s-ban határoztam meg ( $t_{Pr}^1, t_{Pr}^{\beta_y+2}, t_{Pr}^0$ ).

A fentiekben bemutatott módszerek alkalmazásával lehetővé válik a logisztikai erőforrások igénybevételének 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]*

## 8.5 Összehasonlítás a lineáris gyártósorral

A 19. 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 írtom 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. Ugyanezen 3000 termék legyártásához a lineáris gyártósor esetében a következő a számítás menete:

az első termék legyártásának ideje  $10s+66s*8+4s*7+10s$ , azaz 576s.

*ezután minden 66s eltelte után elkészül egy-egy újabb termék*

*a gyártáshoz szükséges összes idő:  $576s+66s*2999=198510s$ , 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]*

## 9 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.

## 10 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.

## 11 AZ ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

### 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 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]*

## 12 THESES

### 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]*

## 13 IRODALOMJEGYZÉK

### 13.1 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 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., AKYLBEK, 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 Jármái, 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]

### 13.2 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] *Ipar 4.0 Mintagyár Projekt* (GINOP 1.1.3-16)  
<https://ipar4.hu/medias/47/ipar4.0mintagyarakkiemeltprojekt.pdf> (letöltve 2018.11.04.)
- [I/8] 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](http://www.i40platform.hu/sites/default/files/2018-05/Flyer_v9.0.pdf) (letöltve 2018.11.14.)
- [I/9] 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/10] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (2013): *Die Europäische Bildungs- und Forschungspolitik*, <https://www.bundesregierung.de/bregde/themen/europa/die-europaeische-bildungs-und-forschungspolitik-442720> (letöltve 2018.11.14.)
- [I/11] 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/12] SCHWAB, K. (2016): *Fourth industrial revolution: what it means, how to respond*, World Economic Forum, p. 1-8.
- [I/13] PATHROTKAR, P. (2020): *Smart Manufacturing Market – Industry 5.0 | Announcing the Era of Intelligent Automation*, <https://pr.themanufacturer.com/smart-manufacturing-market-industry-5-0-announcing-the-era-of-intelligent-automation> (letöltve 2018.11.14.)
- [I/14] NAGY, J. (2017): *Az ipar 4.0 fogalma, összetevői és hatása az értéklánra*, Nagy Judit, 167. sz. Műhelytanulmány HU ISSN 1786-3031 p.11.
- [I/15] 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.)
- [I/16] PwC (2018): *Global Digital Operations Study 2018* (letöltve 2018.11.14.)
- [I/17] VDMA/IMPULS IW. *“Industrie 4.0 Readiness”*, Aachen (2015): [https://industrie40.vdma.org/documents/4214230/26342484/Industrie\\_40\\_Readin](https://industrie40.vdma.org/documents/4214230/26342484/Industrie_40_Readin)

ess\_Study\_1529498007918.pdf/0b5fd521-9ee2-2de0-f377-93bdd01ed1c8.

(letöltve 2018.11.10.)

- [I/18] KPMG (2016): *The factory of the future, KPMG guide Part 1*, kpmg.de, Germany
- [I/19] 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/20] 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/21] FÓNAI, M. HUSZTI, É.: *Általános kutatási ismeretek*, Debreceni Egyetem, 2020
- [I/22] LENGYELNÉ, M. T. (2013): *Kutatástervezés*, Eszterházy Károly Főiskola, Eger
- [I/23] CRONIN, P. RYAN, F. COUGHLAN, M. (2008): *Undertaking a literature review: A step-by-step approach*, Brit. J. Nurs, 17, 38–43.
- [I/24] ELY C, SCOTT I (2007): *Essential Study Skills for Nursing*, Elsevier, Edinburgh
- [I/25] ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/>
- [I/26] Scopus: <https://www.scopus.com>
- [I/27] Web of Science: <https://mjl.clarivate.com/home>
- [I/28] *Round-robin*: <https://hu.wikipedia.org/wiki/Round-robin> (letöltve 2025.05.22.)
- [I/29] 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/30] GUBÁN, M., GUBÁN, Á. (2023): *Fenntartható raktárkezelés autonóm drónokkal*, Akadémiai Kiadó, ISBN: 978 963 454 934 5
- [I/31] HEGEDŰS, I.: *Mesterséges Intelligencia*, Előadás Segédanyag, SZTE, <https://www.inf.u-szeged.hu/~ihegedus/teach/09-evol.pdf> (letöltve 2025.07.22.)
- [I/32] KOVÁCS, D. L.: *Genetikus algoritmusok*, BME, [https://www.mit.bme.hu/system/files/oktatas/targyak/7357/BIR\\_GA\\_Utmutato.pdf](https://www.mit.bme.hu/system/files/oktatas/targyak/7357/BIR_GA_Utmutato.pdf) (letöltve 2025.07.22.)
- [I/33] MITCHELL, M. (1996): *An Introduction to Genetic Algorithms*, MIT Press, (1996), ISBN 9780585030944
- [I/34] MICHALEWICZ, Z. (1994): *Algorithms + data structures = evolution programs*, Springer

- [I/35] ARADI, A. Gräff, J, Lipovszki, Gy. (2014): Számítógépes szimuláció, BME MOGI, [https://www.mogi.bme.hu/TAMOP/szamitogepes\\_szimulacio/book.html](https://www.mogi.bme.hu/TAMOP/szamitogepes_szimulacio/book.html), (letöltve 2025.07.22.)
- [I/36] HUFFMAN D. A. (1954): *A Method for the Construction of Minimum-Redundancy Codes*
- [I/37] Huffman Coding | Greedy Algo-3 <https://www.geeksforgeeks.org/dsa/huffman-coding-greedy-algo-3/> (letöltve 2025.05.22.)
- [I/38] THE GO AUTHORS (2023): *The Go Programming Language*, Package flate implements the Deflate compressed data format, described in RFC issue 1951.
- [I/39] Free Software Foundation: *GNU Gzip*, <https://www.gnu.org/software/gzip/> (letöltve 2025.05.22.)
- [I/40] Data Compression Reference Center: RASIP working group (2013): *The LZ77 algorithm*, Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb
- [I/41] Free Software Foundation: GNU Shuf [https://www.gnu.org/software/coreutils/manual/html\\_node/shuf-invocation.html](https://www.gnu.org/software/coreutils/manual/html_node/shuf-invocation.html) (letöltve 2025.05.22.)
- [I/42] MKIK INFORMATIKAI KOLLÉGIUM (2017): *Ipar 4.0 Második szakértői tanulmány*, <https://www.gymskik.hu/hu/letoltes/80867/ee73d>, Magyarország
- [I/43] SCHUH, G., POTENTE, T., VARANDANI, R., SCHMITZ, T. (2014): *Global Footprint Design based on genetic algorithms - An "industry 4.0" perspective*, CIRP Annals - Manufacturing Technology 63(1), pp. 433-436
- [I/44] TAMÁS, P. (2018) *Innovative Business Model for Realization of Sustainable Supply Chain at the Outsourcing Examination of Logistics Services*, Sustainability 10(1),1-12.
- [I/45] BÁNYAI, T., TELEK, P., LANDSCHÜTZER, C. (2018) *Milkrun based in-plant supply – An automotive approach*, Lecture Notes in Mechanical Engineering 2018, 170-185.
- [I/46] KOTA, L. (2018) *Mesterséges intelligencia a logisztikában: Alkalmazások és algoritmusok*, Gépgyártás 57(1-2), 33-39
- [I/47] BECKER, T., STERN, H. (2016): *Future Trends in Human Work area Design for Cyber-Physical Production Syst.*, Procedia CIRP 57, pp. 404-409
- [I/48] CLOPPENBURG, F., MÜNDEL, A., GLOY, Y., GRIES, T. (2017): *Industry 4.0 - How will the nonwoven production of tomorrow look like?*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 254(13),132001

- [I/49] URBINA CORONADO, P.D., LYNN, R., LOUHICHI, W., (...), WESCOAT, E., KURFESS, T. (2018): *Part data integration in the Shop Floor Digital Twin: Mobile and cloud technologies to enable a manufacturing execution system*, Journal of Manufacturing Systems 48, pp. 25-33
- [I/50] UHLEMANN, T.H.-J., SCHOCK, C., LEHMANN, C., FREIBERGER, S., STEINHILPER, R. (2017): *The Digital Twin: Demonstrating the Potential of Real Time Data Acquisition in Production Systems*, Procedia Manufacturing 9, pp. 113-120
- [I/51] UHLEMANN, T.H.-J., LEHMANN, C., STEINHILPER, R. (2017): *The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0.*, Procedia CIRP 61, pp. 335-340
- [I/52] LEWIN, M., WEBER, H., FAY, A. (2017): *Optimization of production-oriented logistics processes through camera-based identification and localization for cyber-physical systems*, IFIP Advances in Information and Communication Technology 513, pp. 168-176
- [I/53] FERRER, B.R., MOHAMMED, W.M., MARTINEZ LASTRA, J.L., (...), CASTANO, F., HABER, R.E. (2018): *Towards the Adoption of Cyber-Physical Systems of Systems Paradigm in Smart Manufacturing Environments*, Proceedings - IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics, INDIN 2018 8472061, pp. 792-799
- [I/54] VERBA, N., CHAO, K.-M., JAMES, A., (...), FEI, X., TSAI, C.-F. (2017): *Graph Analysis of Fog Computing Systems for Industry 4.0. Proceedings - 14th IEEE International Conference on E-Business Engineering, ICEBE 2017 - Including 13th Workshop on Service-Oriented Applications, Integration and Collaboration, SOAIC 207 8119129*, pp. 46-53
- [I/55] SAGGIOMO, M., KEMPER, M., GLOY, Y.-S., GRIES, T. (2016): *Weaving machine as cyber-physical production system: Multi-objective self-optimization of the weaving process*, Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology 2016-May, 7475090, pp. 2084-2089
- [I/56] CHOI, S., KANG, G., JUN, C., LEE, J.Y., HAN, S. (2017): *Cyber-physical systems: A case study of development for manufacturing industry*, International Journal of Computer Applications in Technology 55(4), pp. 289-297

- [I/57] WAN, J., YIN, B., LI, D., (...), TAO, F., HUA, Q. (2018): *An Ontology-Based Resource Reconfiguration Method for Manufacturing Cyber-Physical Systems*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 23(6),8310925, pp. 2537-2546
- [I/58] TAO, F., ZHANG, M. (2017): *Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing*, IEEE Access 5,8049520, pp. 20418-20427
- [I/59] FRANCALANZA, E., BORG, J., CONSTANTINESCU, C. (2018): *Approaches for handling wicked manufacturing system design problems*, Procedia CIRP 67, pp. 134-139
- [I/60] TANG, D., ZHENG, K., ZHANG, H., (...), ESPINOSA-OVIEDO, J.-A., VARGAS-SOLAR, G. (2018): *Using autonomous intelligence to build a smart shop floor*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 94(5-8), pp. 1597-1606
- [I/61] KOVÁCSHÁZY, T. (2018): *Distributed architecture for real-time cyber-physical system, time-sensitive networks*, Proceedings of the 2018 19th International Carpathian Control Conference, ICC 2018 pp. 1
- [I/62] ELEFThERiADiS, R.J., MYKLEBUST, O. (2016): *A guideline of quality steps towards zero defect manufacturing in industry*, Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management pp. 332-340
- [I/63] DEMARTINI, M., TONELLI, F. (2018): *Quality management in the industry 4.0 era*, Proceedings of the Summer School Francesco Turco 2018-September, pp. 8-14
- [I/64] WEYER, S., MEYER, T., OHMER, M., GORECKY, D., ZÜHLKE, D. (2016): *Future Modeling and Simulation of CPS-based Factories: an Example from the Automotive Industry*, IFAC-PapersOnLine 49(31), pp. 97-102
- [I/65] BOTTANI, E., CAMMARDELLA, A., MURINO, T., VESPOLI, S. (2017): *From the cyber-physical system to the digital twin: The process development for behaviour modelling of a cyber guided vehicle in M2M logic*, Proceedings of the Summer School Francesco Turco 2017-September, pp. 96-102
- [I/66] PREUVENEERS, D., JOOSEN, W., ILIE-ZUDOR, E. (2018): *Robust Digital Twin Compositions for Industry 4.0 Smart Manufacturing Systems*, Proceedings - IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Workshop, EDOCW 2018-October,8536107, pp. 69-78

- [I/67] MOROZOV, D., LEZOCHE, M., PANETTO, H. (2018): *Multi-paradigm modelling of Cyber-Physical Systems*, IFAC-PapersOnLine 51(11), pp. 1385-1390
- [I/68] GARCIA, M.V., IRISARRI, E., PEREZ, F., MARCOS, M., ESTEVEZ, E. (2018): *From ISA 88/95 meta-models to an OPC UA-based development tool for CPPS under IEC 61499*, IEEE International Workshop on Factory Communication Systems - Proceedings, WFCS 2018-June, pp. 1-9
- [I/69] UPASANI, K., BAKSHI, M., PANDHARE, V., LAD, B.K. (2017): *Distributed maintenance planning in manufacturing industries*, Computers and Industrial Engineering 108, pp. 1-14
- [I/70] JUNLANG GUO, JIEWU LENG, J. LEON ZHAO, XUELIANG ZHOU, YU YUAN, YUQIAN LU, DIMITRIS MOURTZIS, QINGLIN QI, SIHAN HUANG, XUEGUAN SONG, QIANG LIU, LIHUI WANG (2024): *Industrial metaverse towards Industry 5.0: Connotation, architecture, enablers, and challenges*, Journal of Manufacturing Systems, Volume 76, Pages 25-42, ISSN 0278-6125
- [I/71] NAHAVANDI, S. (2019): *Industry 5.0—A Human-Centric Solution*, Sustainability, 11(16), 4371.
- [I/72] PATHAK, P. PAL, P.R. SHRIVASTAVA, M. ORA, M.S. (2019): *Fifth revolution: Applied AI and human intelligence with cyber physical systems*, Int. J. Eng. Adv. Technol, 8, pp 23–27
- [I/73] P. GRESCHKE, M. SCHÖNEMANN, S. THIEDE, C. HERRMANN (2014): *Matrix Structures for High Volumes and Flexibility in Production Systems*, Procedia CIRP, Volume 17, Pages 160-165, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.040>.
- [I/74] IHLENFELDT, S., WUNDERLICH, T., SÜBE, M., HELLMICH, A., SCHENKE, C.-C., WENZEL, K., MATER, S. (2021): *Increasing resilience of production systems by integrated design*, Applied Sciences (Switzerland), 11 (18), art. no. 8457
- [I/75] TRIERWEILER, M. BAUERNHANSL T. (2022): *Reconfiguration Process for Matrix Manufacturing Systems*, Procedia CIRP, Volume 107, Pages 699-704, ISSN 2212-8271
- [I/76] GUIDO HÜTTEMANN, ARMIN F. BUCKHORST, ROBERT H. SCHMITT (2019): *Modelling and Assessing Line-less Mobile Assembly Systems*, Procedia CIRP, Volume 81, Pages 724-729, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.184>.

- [I/77] ARMIN F. BUCKHORST, ROBERT H. SCHMITT (2020): *Multi-Staged, Multi-Objective Optimization for Operation Management in Line-less Mobile Assembly Systems (LMAS)*, Procedia CIRP, Volume 93, Pages 1121-1126, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.046>.
- [I/78] BÁNYAI, Á. (2021): *Energy consumption-based maintenance policy optimization*, Energies, 14 (18), art. no. 5674
- [I/79] MAY, M.C., KIEFER, L., KUHNLE, A., STRICKER, N., LANZA, G. (2020): *Decentralized Multi-Agent Production Control through Economic Model Bidding for Matrix Production Systems*, Procedia CIRP, 96, pp. 3-8.
- [I/80] SEIDEL, R., AMADA, H., FUCHS, J., THIELEN, N., SCHMIDT, K., VOIGT, C., FRANKE, J. (2020): *Data Mining System Architecture for Industrial Internet of Things in Electronics Production*, IEEE 26th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging, SIITME 2020 - Conference Proceedings, art. no. 9292282, pp. 75-80.
- [I/81] MAY, M.C., SCHMIDT, S., KUHNLE, A., STRICKER, N., LANZA, G. (2020): *Product Generation Module: Automated Production Planning for optimized workload and increased efficiency in Matrix Production Systems*, Procedia CIRP, 96, pp. 45-50.
- [I/82] HUI XIAO, KUNXIANG YI, HAITAO LIU, GANG KOU (2021): *Reliability modeling and optimization of a two-dimensional sliding window system*, Reliability Engineering & System Safety, Volume 215, 107870, ISSN 0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107870>.
- [I/83] ASSADI, A.A., FRIES, C., FECHTER, M., MASCHLER, B., EWERT, D., SCHNAUFFER, H.-G., ZÜRN, M., REICHENBACH, M. (2020): *User-friendly, requirement based assistance for production workforce using an asset administration shell design*, Procedia CIRP, 91, pp. 402-406.
- [I/84] MARVIN CARL MAY, LEONARD OVERBECK, MARCO WURSTER, ANDREAS KUHNLE, GISELA LANZA (2021): *Foresighted digital twin for situational agent selection in production control*, Procedia CIRP, Volume 99, Pages 27-32, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.005>.
- [I/85] ELMARAGHY, H., (1), MONOSTORI, L., (1), SCHUH, G., (1), ELMARAGHY, W. (2021): *Evolution and future of manufacturing systems*, CIRP Annals, 70 (2), pp. 635-658.

- [I/86] REGGELIN, T., GALKA, S., IVANOV, D., LANG, S. (2021): *Introduction to the minitrack “modeling and decision making in manufacturing and logistics in the age of industry 4.0”*, Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2020-January, pp. 1643-1644.
- [I/87] INDRI, M., LACHELLO, L., LAZZERO, I., SIBONA, F., TRAPANI, S. (2019): *Smart sensors applications for a new paradigm of a production line*, Sensors (Switzerland), 19 (3), art. no. 650
- [I/88] OSIECZKO-POTOCZNA K. (2024): *Reasons, benefits and challenges on the road to automated internal transportation*, Acta Logistica, 11 (4), pp. 605 – 613, <http://dx.doi.org/10.22306/al.v11i4.557>
- [I/89] WANG, X.K., WU, W.M., XING, Z.C., CHEN, X.Y., ZHANG, T.Q., NIU, H.Y. (2022): *A neural network based multi-state scheduling algorithm for multi-AGV system in FMS*, J. Manuf. Syst., 64, pp. 344–355, <http://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.06.017>
- [I/90] HU, X.Y., YAO, X.F., HUANG, P., ZENG, Z.Y. (2022): *Improved iterative local search algorithm for solving multi-AGV flexible job shop scheduling problem*, Sensors 2023, 23(8), 28, pp. 2198–2212, <http://doi.org/10.13196/j.cims.2022.07.025>
- [I/91] SAHU, B., DAS, P.K., KABAT, M.R. (2022): *Multi-robot cooperation and path planning for stick transporting using improved Q-learning and democratic robotics PSO*, Journal of computational science, 60, 101637, <http://doi.org/10.1016/j.jocs.2022.101637>
- [I/92] SAEED, R.A., RECUPERO, D.R., REMAGNINO, P. (2021): *The boundary node method for multi-robot multi-goal path planning problems*, Expert Systems, 38, e12691, <http://doi.org/10.1111/exsy.12691>
- [I/93] ZHONG, M.S., YANG, Y.S., DESSOUKY, Y.M., POSTOLACHE, O.A. (2020): *Multi-AGV scheduling for conflict-free path planning in automated container terminals*, Computers & Industrial Engineering, 142, 106371, <http://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106371>
- [I/94] HU, Y., YANG, H.B., HUANG, Y. (2022): *Conflict-free scheduling of large-scale multi-load AGVs in material transportation network*, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 158, 102623, <http://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102623>

- [I/95] ZOU, W.Q., PAN, Q.K., WANG, L., MIAO, Z.H., PENG, C. (2022): *Efficient multiobjective optimization for an AGV energy-efficient scheduling problem with release time*, Knowledge-Based-System, 242, 108334, <http://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.108334>
- [I/96] LI Z., SANG H., PAN Q., GAO K., HAN Y., LI J. (2023): *Dynamic AGV Scheduling Model With Special Cases in Matrix Production Workshop*, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 19 (6), pp. 7762 – 7770, <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3211507>
- [I/97] BOHÁCS, G. RINKÁCS, A. (2016): *Application of Industry 4.0 in the material handling*, In: Bodzás, Sándor Mankovits, Tamás (szerk.) Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2016), Debrecen, Magyarország: University of Debrecen Faculty of Engineering 654 p. pp. 53-56., 4 p.
- [I/98] RANKE, D. BAUERNHANSL, T. (2023). Modeling of a Matrix Production System for Simulation to Predict Material Demand. In: Alfnes, E., Romsdal, A., Strandhagen, J.O., von Cieminski, G., Romero, D. (eds) Advances in Production Management Systems. Production Management Systems for Responsible Manufacturing, Service, and Logistics Futures. APMS 2023. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 691. Springer, Cham
- [I/99] HELLMICH A. ZUMPE, F. ZUMPE, M. MÜNNICH, M. WIESE, T. BÜTTNER, T. IHLENFELDT, S. FOITH-FÖRSTER, P. TRIERWEILER, M. RANKE, D. BERKHAN, P. RZESNITZEK, S. BAUERNHANSL, T. (2022): Umsetzung von cyber-physischen Matrixproduktionssystemen, Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.)
- [I/100] ERP, T. GONCALVES, R. RYTTER, N. G. M. (2023): Design of matrix production systems: A skill-based systems engineering approach, Procedia CIRP, Volume 120, Pages 1173-1178, ISSN 2212-8271
- [I/101] FRIES, C. FECHTER, M. RANKE, D. TRIERWEILER, M. ASSADI A. A. FOITH-FOERSTER, P. WIENDAHL, H. BAUERNHANSL, T. (2021): Fluid Manufacturing Systems (FLMS): A Novel Approach for Versatility in Production, In: Weißgraeber, P., Heieck, F., Ackermann, C. (eds) Advances in Automotive Production Technology – Theory and Application. ARENA2036. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg

- [I/102] BOZKURT, A. FRIES, C. TASCI, T. LEBERLE, U. KESSLER, D. JOOS, M. HAGG, M. NEUSCHWANDER, B., HINDERER, M. (2023): *Cyber-Physical-Systems for Fluid Manufacturing Systems*, CPSL 2023 At: Santiago de Querétaro, Mexico, Volume: 3
- [I/103] KUKA AG (2016): *Industrie 4.0: Matrix Produktion*, <https://www.kuka.com/>
- [I/104] KUKA AG (2016): *Matrix production: an example for Industrie 4.0*, <https://www.kuka.com/en-ch/industries/solutions-database/2016/10/industry-4-0--matrix-production>
- [I/105] MSZ EN ISO 3691-4 (2020): *Ipari targoncák. Biztonsági követelmények és igazolásuk. 4.rész: Vezető nélküli ipari targoncák és rendszereik*
- [I/106] KOREN Y. (2010): *The Global Manufacturing Revolution: Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems*, Hoboken: John Wiley & Sons