



## RUGALMAS GYÁRTÓRENDSZER TERMELÉSTERVEZÉSI FELADATÁNAK MEGOLDÁSA HEURISZTIKUS KERESŐ ALGORITMUSSAL

TÓTH NORBERT

Bay Zoltán Nonprofit Kft.

[norbert.toth@bayzoltan.hu](mailto:norbert.toth@bayzoltan.hu)

KULCSÁR GYULA

Miskolci Egyetem,

Informatikai Intézet

[iitkg@uni-miskolc.hu](mailto:iitkg@uni-miskolc.hu)

**Absztrakt.** A cikkben bemutatjuk egy rugalmas gyártórendszer termeléstervezési problémáját és annak speciális megoldási módszerét. A javasolt megoldási módszer hatékonyságát szimulációs modellel igazoljuk. A műszakokra vonatkozó munkák kiosztását kétféle algoritmussal is megoldjuk. A két módszert összehasonlítjuk a vizsgált rugalmas gyártórendszer szimulációs modelljének segítségével és bemutatjuk a futási eredményeket.

**Kulcsszavak:** Termeléstervezés, rugalmas gyártórendszer, szimuláció, optimalizálás, heurisztika, kereső algoritmus.

### 1. Bevezetés

A vevői igények minél magasabb szintű kiszolgálása egyre nagyobb kihívások elé állítja a termelő vállalatokat. A termelési erőforrások lehető leghatékonyabb kihasználása érdekében megfelelően kidolgozott termelési tervekre van szükség. Az Ipar 4.0 kulcsszóhoz kapcsolódó digitalizációs és infokommunikációs megoldások nagymértékben hozzájárulnak a rendszerből kinyerhető információk összegyűjtéséhez és feldolgozásához [1]. Az új technológiák által szolgáltatott többletinformáció hatékony feldolgozásához azonban új tervező és irányító modellekre is szükség van. A szimulációs modellekkel végzett vizsgálatok eredménye alapján a termelőrendszerek struktúrájának átalakítása is sokszor szükségessé válik. Előtérbe kerülnek a munkaállomások nemlineáris elrendezései és fontos szerephez jutnak a manuális rugalmas gyártó-szerelőrendszerek [2].

A korszerű gyártó és szerelő rendszerek különböző mértékű rugalmassággal biztosítják a vevői igényeknek megfelelő termékek előállítását [3]. A gyártási és szerelési műveletek egy részét gyakran dolgozók végzik el. A termék-előállítási folyamatokban a terméktípusokon a tulajdonságváltoztató műveletek elvégzése mellett a munkaállomások közötti munkadarab mozgásokat is a dolgozók valósítják meg.

Ezekben a gyártórendszerekben a dolgozók műveletvégző képességei kulcsfontosságú szerepet játszanak a teljes rendszer hatékony működésében [4]. Ezekben a rendszerekben különösen fontossá válik, hogy a termeléstervezési és a termelésütemezési modellek és módszerek figyelembe vegyék a gyártórendszerek erőforrásainak meghatározó jellemzőit.

A klasszikus termelésütemezési problémák (pl. egygépes, párhuzamos gépes, és többoperációs feladatok) jellemzői és megoldási módszerei megtalálhatók például az [5] szakkönyvben. A gyakorlati ütemezési feladatok túlnyomó többsége az NP-hard osztályba sorolható [6]. Ez azt jelenti, hogy az optimális megoldás megtalálása polinomiális futási idejű algoritmussal nem garantálható. Ide tartoznak a sokműveletes rugalmas gyártórendszerek ütemezési problémái is. Ezek leginkább a szigorú erőforrás-korlátos egyutas (flow shop [7], [8], [9]) és a többutas (job shop [10], [11], [12], [13]) típusú feladatokhoz kapcsolódnak. Ezekben az esetekben az erőforrások halmaza kiterjed a termelő berendezéseken túl a munkaállomásokra, a logisztikai eszközökre, a műveletközi tárolókra, az anyagmozgató berendezésekre és indokolt esetben a dolgozókra is. Ilyenkor a termelésstervezési és ütemezési feladatok hatékony megoldása érdekében a klasszikus problémák jellemzőin túlmenően további működési jellemzők, tényezők és korlátozások figyelembevétele is szükségessé válik. Ezek miatt a modellek komplexitása tovább nő.

A valós termelési rendszerek és folyamatok modellezését és vizsgálatát a számítógépes szimuláció nagymértékben támogatja [14]. A szimulációs modellek támogatják a digitális virtuális térben végzett fejlesztéseket és kísérleteket. Az elképzelések és hipotézisek kipróbálhatók és tesztelhetők a valós folyamatba való beavatkozás előtt. Az új vagy továbbfejlesztett termelésstervezési és ütemezési algoritmusok teszteléséhez nagy segítséget nyújtanak a valós rendszerek digitális modelljei.

## 2. A feladat jellemzői

### 2.1. Előzmények és a vizsgált gyártórendszer jellemzői

A kutatómunkánk egy valós gyártási rendszer termelésstervezési feladatának modellezésére és megoldására koncentrált. Egy korábbi cikkünkben bemutattunk egy olyan gyártórendszert, amelyben a dolgozók gyártási képessége kulcsszerepet játszott a gyártási teljesítmény maximalizálásában [17]. Az akkor elvégzett vizsgálataink végén megállapítottuk, hogy az emberi tényező jelentősége kiemelkedő fontossággal bír a műszakonkénti termelési tervek végrehajtása során. Kutatásunk egy korábbi fázisában elkészítettünk és bemutattunk egy diszkrét esemény-vezérelt szimulációs modellt, melyben leképzésre kerültek a következő elemek:

- a terméktípusok;
- a terméktípusokon végrehajtandó operációk;
- az operációk műveleti normaideje;
- a munkahelyek és a szerelőállomások, ahol az operációk elvégezhetők;
- a dolgozók;
- a dolgozók műszakbeosztása;
- a dolgozók gyártási képességei, amelyek az operációk műveleti normaidejét befolyásolják;
- az útvonalak, amelyek a dolgozók egydarabos anyagmozgatását biztosítják az egyes munkaállomások között, figyelembe véve az összes gyártható terméktípus lehetséges operációinak sorrendjét reprezentáló anyagáramlási relációkat;
- a vizsgált időszak műszakjai;
- a szünetek.

A gyártórendszer digitális modelljét a Plant Simulation szimulációs környezetben készítettük el. Objektumorientált modellezési módszertant követve a fejlesztőeszköz objektumait használtuk fel a rendszer vázának megalkotására. A valós folyamatok minél pontosabb leképzésére törekedtünk, így az alkalmazás SimTalk programozási nyelvét használtuk az objektumok viselkedésének leírására.

A kidolgozott szimulációs modell a következő gyártási folyamat digitális ikerpárjaként működik:

- A rendszer egy adott műszakjában a behívott dolgozók aktívak.
- A dolgozók halmaza minden egyes műszakban adott.
- Minden egyes műszakban adott a legyártandó termékek típusa és darabszáma. Ezt az aktuális termelési terv határozza meg.
- A dolgozó a kijelölt indulási helyről kiválaszt egy olyan munkadarabot, amelynek műveleteit képes elvégezni.
- A kiválasztott terméktípus technológiai tervének megfelelően elvégzi a kijelölt műveleteket.
- A technológiai útvonalon haladva a következő művelet elvégzéséhez alkalmas munkahelyek közül kiválaszt egyet és ott elvégzi a műveletet.
- A művelet sor végén elhelyezi a készterméket a kijelölt tárolóba, és kezdi előlről a következő munkadarab kiválasztásával a gyártási folyamatot.

## **2.2. A vizsgált termelés tervezési feladat jellemzői**

Ebben a cikkben azt foglalkozunk össze, hogy hogyan modelleztük a termelés tervezési feladatot és annak megoldására milyen megoldási módszert dolgoztunk ki.

A vizsgált rugalmas gyártórendszer termelés tervezési feladatának lényege az, hogy meg kell tervezni előidőben (prediktíven) azt, hogy melyik műszakban milyen terméktípusból mennyi darabot gyártsanak le dolgozók. Ez a termelés tervezési optimalizálási feladatának a döntési változója. Az optimalizálási feladat korlátfeltételeit a bemutatott gyártórendszer működési jellemzői és a gyártási igények (rendelések) együttesen adják meg. Az optimalizálás célja kettős:

- Elsődleges optimalizálási cél: a legyártott darabszámok maximalizálása.
- Másodlagos optimalizálási cél: a dolgozók időkapacitásának maximális kihasználása.

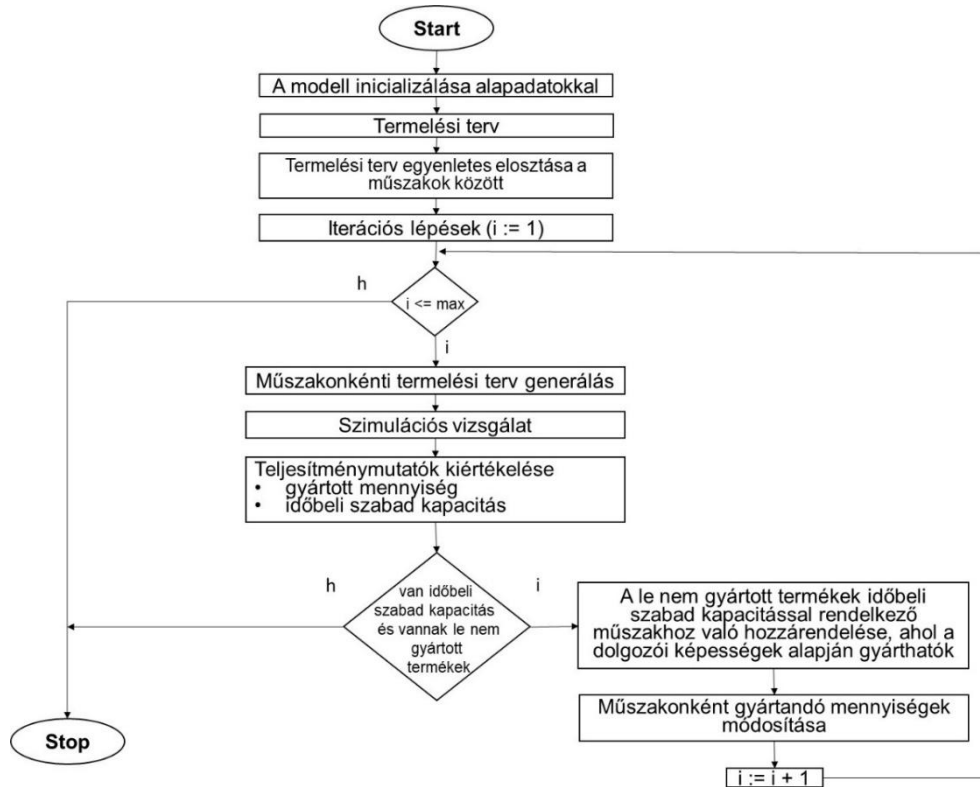
## **3. Szimulációs modellre alapozott termelés tervezési módszer**

A termelés tervezési feladat megoldására kidolgoztunk egy szimulációs modellel kombinált speciális kereső algoritmust. A módszerünk legfontosabb lépéseit az 1. ábra mutatja be. A saját fejlesztésű termelés tervező módszerünket a továbbiakban APPM rövidítéssel jelöljük (Advanced Production Planning Method).

A javasolt APPM módszer a vizsgált termelés tervezési feladatot úgy oldja meg, hogy a műszakonkénti tervezett gyártandó mennyiségek meghatározása során figyelembe veszi a valós rendszer dolgozóinak tényleges gyártási képességeit.

Az algoritmus a kiindulási termelési tervet műszakokra bontva szimulációval kiértékeli. Majd a le nem gyártott mennyiségeket célirányosan áthelyezi más műszakokba, ezáltal módosítja a műszakonkénti termelési tervet. Mindezt iteratív

módon hajtja végre. A keresési algoritmus a szimulációt használja fel a terv megvalósíthatóságának értékelésére.



1. ábra: A termelésstervezési módszer működésének folyamatábrája

A termelésstervezési feladat döntési változóit úgy reprezentáltuk, hogy minden egyes gyártandó termékhez hozzárendeltünk egy változót, amelynek értéke decimális egész számként előírja, hogy melyik műszakban kell legyártani. Ezt a koncepciót felhasználva a termelési terv úgy alakítható ki, hogy műszakonként csoportosítjuk azokat a termékeket, amelyeket abban a műszakban kell legyártani. A speciális keresőalgoritmus lényeges eleme a termelési terv módosítása. Ezt úgy valósítottuk meg, hogy az aktuálisan vizsgált termelési terv szimulációs eredményén végighaladunk a műszakok időbeli sorrendje alapján, és ebben a sorrendben kiválasztjuk a betervezett, de el nem végzett munkákat. Ezt a sorrendet követve megvizsgáljuk, hogy hová lehetne eredményesen áthelyezni az adott munkát. Ezt a részfeladatot egy speciális belső kereső algoritmussal oldjuk meg. Az aktuális műszakot követő műszaktól indul a keresés. Ha van a jelölt műszaknak szabad kapacitása és az adott termék gyártásához van alkalmas dolgozó beosztva, akkor áthelyezésre kerül oda a munka. Ha ez nem teljesül, akkor tovább lépünk a következő műszakra. Addig lépegetünk, amíg találunk alkalmas műszakot. Ha elérjük az utolsó műszakot és nem találtunk alkalmas műszakot, akkor a keresés tovább folytatódik az első műszaktól kezdve egészen addig, amíg vissza nem érünk az eredeti műszakhoz. Ebben a belső keresési iterációban az első megtalált alkalmas műszakba helyezzük át a munkát. Ha nincs alkalmas műszak, akkor a munka az eredeti műszakban marad. Ezt a folyamatot ismételjük a következő betervezett, de le nem gyártott munkával egészen addig, amíg az összes ilyen munkán végig nem haladt a belső áthelyező ciklus.

Miután befejeződött a munkák áthelyező algoritmus, akkor kialakul egy új termelési terv. Ezzel az új megoldás-jelölttel fut újra a szimuláció. Az iterációk

végén a leállási feltétel teljesülésétől függően a keresés folytatódik vagy befejeződik.

Ez a vázolt heurisztikus iteratív kereső algoritmus alkalmas az adott időhorizontra vonatkozó termelési tervből kiindulva műszakonkénti termelési résztervek generálására a dolgozói képességek figyelembevételével úgy, hogy a termelési rendszer hatékonysága javul a kitűzött célfüggvények szempontjából.

#### **4. A javasolt módszer hatékonyságának vizsgálata**

A bemutatott APPM módszer teszteléséhez kidolgoztunk és implementáltunk egy másik módszert, amely a vizsgált időszakra egy jól ismert metaheurisztikával a genetikus algoritmus (GA) működik. A genetikus algoritmus működési elvéből eredően a megoldást módosító műveletek eltérnek az általunk javasolt célirányos módosító művelettől. Mindkét megoldási módszer ugyanazt a szimulációs kiértékelést használja ugyanazzal a paraméterezéssel. A két módszer között tehát csak a keresési algoritmusban van különbség.

Az APPM módszer a fentebb bemutatott célirányosan megtervezett módosításokat hajtja végre. Ezzel szemben a genetikus algoritmus a megszokott módon a rekombinációs és mutációs operátorainak megfelelően véletlenszerűen hajtja végre a megoldás-változatok módosítását.

A Plant Simulation rendelkezik egy olyan beépített optimalizáló objektummal, amellyel lehetőség nyílik számos optimalizálási feladat megoldására. Ez az objektum egy általános genetikus algoritmust (GA) alkalmaz az optimalizálási feladatok megoldása során [15], [16]. A cikkünk további részében erre a módszerre a PSGA rövidítéssel hivatkozunk.

Az APPM módszerünk hatékonyságát a PSGA módszer hatékonyságával hasonlítottuk össze. Ebben a cikkben illusztratív példaként bemutatunk egy tesztkörnyezetet, amelynek legfontosabb jellemzői a következők:

- Műszakok száma: 5
- Műszakonkénti dolgozók száma: 5
- Műszakok és dolgozók összerendelése: műszakonként változó
- Terméktípusok száma: 8
- Terméktípusonként gyártandó mennyiségek (munkák száma): 58; 91; 275; 75; 223; 48; 63; 121.
- Munkahelycsoportok száma: 3
- Munkahelycsoportonkénti munkahelyek száma: 2
- Operációk műveleti ideje: a dolgozók átlagos képességeitől függ
- Termelési tervek szétosztása a műszakok között inicializáláskor: egyenletes elosztás.

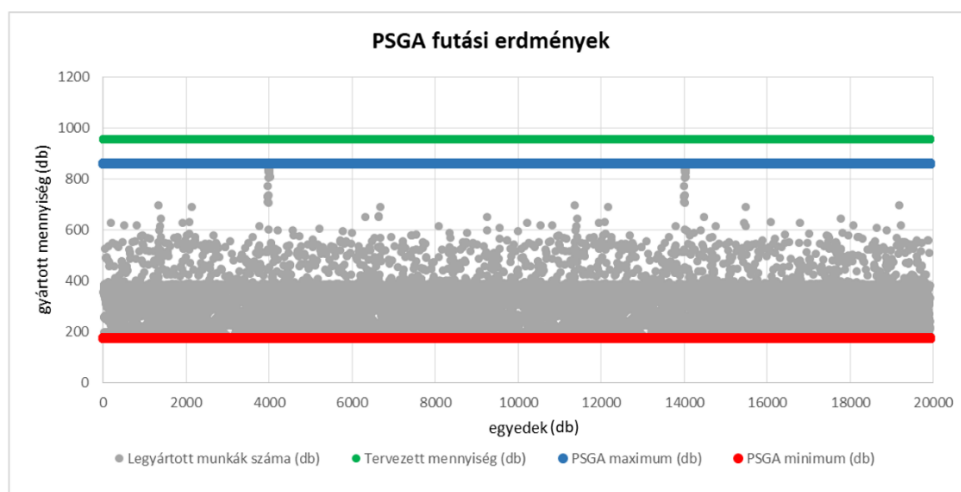
A fenti beállításokkal szimulációs vizsgálat készült az APPM módszer működéséről, amelynek eredményét az 1. táblázat tartalmazza. Az 1. iterációban a termelési terv kezdeti egyenletes elosztása miatt voltak le nem gyártott munkadarabok és volt a rendszernek szabad időkapacitása is. A következő vizsgálat előtt az APPM új megoldást (műszakonkénti termelési tervet) generált a le nem gyártott munkadarabok alkalmas műszakba való áthelyezésével. Az új termelési tervvel ismét lefutott a szimulációs vizsgálat (2. iteráció). Ez az iteratív folyamat a leállási feltételek teljesüléséig folytatódott. Az egyes iterációs lépések szimulációs vizsgálatának eredményét az 1. táblázat sorai foglalják össze.

Az eredmények mutatják, hogy a javasolt APPM módszer már kis számú iterációs lépés mellett is képes jelentős javulást elérni a vizsgált termelési rendszer termelőképessége szempontjából azáltal, hogy kvázi-optimális műszakonkénti termelési tervet készít figyelembe véve a rendszer adottságait és aktuális állapotát. Az APPM módszer végeredménye mutatja, hogy a munkák alkalmas műszakba való átrendezésével minden munkadarab legyártásra került.

**1. táblázat:** Az APPM módszer futási eredményei

Iteráció	Gyártott mennyiség [db]	Le nem gyártott mennyiség [db]	A rendszer szabad időkapacitása					
			Összesen [min]	Műszak				
				T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>
1	921	33	131.71	0.00	26.52	39.27	0.00	65.93
2	939	15	70.02	4.71	0.00	0.00	0.00	65.31
3	951	3	22.06	4.71	0.00	0.00	0.00	17.35
4	954	0	28.20	4.71	4.22	7.74	5.89	5.63

A vizsgált termelésstervezési feladaton futtattuk a PSGA módszert is. A döntési változó reprezentálására egy rögzített hosszúságú vektort használtunk. A vektor hossza megegyezett a munkadarabok számának és a műszakok számának szorzatával. A vektorban a munkák sorszámát helyeztük el és helykitöltő fiktív 0 elemeket. A vektor pozíciója rögzítve mutatta, hogy a cellában lévő elemet melyik műszakban kell elvégezni. Ezzel a transzformációs módszerrel a termelésstervezési feladatot leképeztük adott számú elem permutációjára. Ez adta a genetikusan algoritmus számára a megoldás-jelöltet reprezentáló kromoszómát (egyedet). A PSGA módszert használtuk fel a permutációk genetikusan elvek szerinti módosítására. A megoldás-jelöltek kiértékelését itt is a szimulációs módszer biztosította.



**2. ábra:** A PSGA módszer futási eredményei (a legyártott munkadarabok száma)

A PSGA vizsgálatok tesztkörnyezete megegyezett az APPM beállításával, és a PSGA kezdeti termelési terve (az induló állapota) szintén a műszakonkénti egyenletes elosztásból származott. A PSGA módszer paramétereit sokféleképpen kipróbáltuk. Egy illusztratív példa látható a 2. ábrán a PSGA 20000 iterációból álló

futása során generált legjobb megoldások célfüggvény-értékének alakulására.

**2. táblázat:** Az APPM és a PSGA módszer futási eredményének összehasonlítása

Módszer	Gyártott mennyiség [db]	Le nem gyártott mennyiség [db]	Keresési iterációk száma
APPM	954	0	4
PSGA	858	96	20000

A PSGA módszer futása során a kiválasztott esetben a leggyártott munkadarabok száma 174 és 858 között ingadozott. A több ezer szimulációs vizsgálati iteráció és hosszú futási idő ellenére sem talált olyan jó megoldást, mint az APPM módszerünk (2. táblázat). Az APPM módszer nagyon gyorsan (4 iteráció alatt) generált olyan megoldást, amelyhez 954 leggyártott munkadarab tartozott.

A PSGA hátránya az újabb megoldások generálására vezethető vissza, mivel csak és kizárólag a genetikus operátorok beállításait veszi figyelembe és a munkák műszakokhoz való hozzárendelésének egyéb szempontjait nem használja fel. Ezzel szemben az általunk bemutatott célirányosan megtervezett heurisztikus kereső algoritmus kihasználja a problémában rejlő belső összefüggéseket.

## 5. Összefoglalás és következtetések

A cikk bemutatott egy rugalmas gyártórendszert, amelyben a dolgozók (humán erőforrások) kulcsszerepet játszanak. A gyártási folyamat hatékonyságának vizsgálatára létrehoztunk egy digitális szimulációs modellt, amely Plant Simulation környezetben működik. A gyártórendszerben végbemenő gyártási folyamatok teljesítőképességének javítására kidolgoztunk egy heurisztikus algoritmust, amely a műszakonkénti termelési tervek iteratív javításával kvázi-optimalis megoldásokat generál rövid idő alatt.

A javasolt saját módszerünk eredményét összehasonlítottuk a Plant Simulation szoftver genetikus algoritmusának eredményével. Az elvégzett vizsgálatok igazolták, hogy a célirányosan megtervezett kereső algoritmus sokkal hatékonyabban oldja meg a termelésstervezési feladatokat, mint a Plant Simulation szoftverben elérhető genetikus algoritmus. A javasolt módszerünk elsődleges előnye az új megoldás-jelöltek generálásából adódik. A genetikus algoritmus csak és kizárólag a genetikus operátorok beállításait veszi figyelembe, ezáltal kvázi-véletlenszerűen állít elő új egyedeket. Az általunk javasolt módszer ezzel szemben célirányosan megtervezett módon figyelembe veszi a munkák műszakokhoz való hozzárendelésének szempontjait és kihasználja a problémában rejlő belső összefüggéseket.

A genetikus algoritmusra vonatkozó vizsgálatok megkövetelték a termelésstervezési feladat alkalmas reprezentációjának kidolgozását. Ennek érdekében egy transzformációs módszert dolgoztunk ki, amely a vizsgált termelésstervezési feladatot átalakította adott számú elem permutációjának optimalizálására. A javasolt modell-transzformációs sémánk segítségével többféle optimalizálási feladat visszavezethető permutációs optimalizálási feladatra. A javasolt transzformációs elv lehetővé teszi az általános célú meta-heurisztikus optimalizáló és kereső algoritmusok felhasználását.

A szimulációs vizsgálataink eredményei alátámasztják azt, hogy a kvázi-optimális műszakszintű termelési tervek elkészítése nagymértékben növeli a termelési rendszer hatékonyságát. Az elért eredmények alátámasztják azt is, hogy a termelésstervezési és ütemezési modellekben integráltan meg kell jelennie a dolgozói képességeknek (emberi faktornak) annak érdekében, hogy a rendszer hatékonyságnövelésére irányuló változtatások a kívánt hatást érik el.

## Irodalom

- [1] Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., Wahlster, W.: Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Forschungsunion, Frankfurt/Main, 2013.
- [2] ElMaraghy, H., ElMaraghy, W.: Smart Adaptable Assembly Systems, *Procedia CIRP* 44, 2016, pp. 4-13., <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.107>
- [3] Faccio, M.: The impact of production mix variations and models varieties on the parts-feeding policy selection in a JIT assembly system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*; 72(1-4), pp.:543-560., <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5675-0>
- [4] Ferjani, A., Ammar, A., Pierreval, H., Elkosantini, S.: A simulation-optimization based heuristic for the online assignment of multi-skilled workers subjected to fatigue in manufacturing systems, *Computers & Industrial Engineering*, pp. 663–674., 2017, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.02.008>
- [5] Brucker, P.: *Scheduling Algorithms*, Springer, 2007, ISBN 978-3-540-69515-8.
- [6] Garey, M., R., Johnson, D., S., Sethi, R.: The Complexity of Flowshop and Jobshop Scheduling, *Mathematics of Operations Research*, Vol. 1, No. 2, pp. 117-129., 1976, <https://doi.org/10.1287/moor.1.2.117>
- [7] Kulcsár, Gy., Erdélyi, F.: A New Approach to Solve Multi-Objective Scheduling and Rescheduling Tasks, *International Journal of Computational Intelligence Research*, 3 (4), 2007, pp. 343-351., <https://doi.org/10.5019/j.ijcir.2007.115>
- [8] Kulcsár, Gy.: Ütemezési modell és heurisztikus módszerek az igény szerinti tömeggyártás finomprogramozásának támogatására, Doktori (PhD) értekezés, Miskolci Egyetem, Miskolc-Egyetemváros, 2007.
- [9] Kulcsárné, F. M.: Kiterjesztett modellek és módszerek erőforrás-korlátos termelésütemezési feladatok megoldására, Doktori (PhD) értekezés, Miskolci Egyetem, Miskolc-Egyetemváros, 2017.
- [10] Kulcsár, Gy., Kulcsárné, F. M.: Kiterjesztett termelésprogramozási modell erőforrás-korlátos ütemezési feladatok megoldására, *Multidiszciplináris tudományok*, 4. 1. sz., 2014, pp. 19-30.
- [11] Botta-Genoulaz, V.: Hybrid flow shop scheduling with precedence constraints and time lags to minimize maximum lateness. *International Journal of Production Economics*, Vol. 64, 2000., pp. 101–111., [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(99\)00048-1](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(99)00048-1)
- [12] Low, C.: Simulated annealing heuristic for flow shop scheduling problems with unrelated parallel machines, *Computers and Operations Research*, Vol. 32, 2005., pp. 2013–2025., <https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.01.003>
- [13] Demir, Y., İşleyen, S. K.: Evaluation of mathematical models for flexible job-shop scheduling problems, *Applied Mathematical Modelling*, Volume 37, Issue 3, 2013, pp. 977-988., ISSN 0307-904X, <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.03.020>
- [14] VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen-Grundlagen, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1993.
- [15] Thengade, A., Donald, R.: Genetic Algorithm – Survey Paper, *International Journal of Computer Applications*, MPGINMC-2012, 2012, pp. 25-29., ISSN: 0975 – 8887.
- [16] McCall, J.: Genetic algorithms for modelling and optimisation, *Journal of Computational and Applied Mathematics* 184, 2005, pp. 205-222,



<https://doi.org/10.1016/j.cam.2004.07.034>

- [17] Tóth, N., Kulcsár, Gy.: Rugalmas gyártórendszer hatékonyságának növelése dolgozói képességek szimulációjára alapozott termelésvezési módszerrel, Multidiszciplináris tudományok, 10. kötet. (2020) 3 sz. pp. 130-142., <https://doi.org/10.35925/j.multi.2020.3.17>