

RUGALMAS GYÁRTÓRENDSZER HATÉKONYSÁGÁNAK NÖVELÉSE DOLGOZÓI KÉPESSÉGEK SZIMULÁCIÓJÁRA ALAPOZOTT TERMELÉSTERVEZÉSI MÓDSZERREL

Tóth Norbert

tudományos munkatárs
Bay Zoltán Nonprofit Kft.

3519 Miskolc, Iglói út 2., e-mail: norbert.toth@bayzoltan.hu

Kulcsár Gyula

egyetemi docens, Miskolci Egyetem

Informatikai Intézet, Alkalmazott Informatikai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: iitkgy@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Az Ipar 4.0 és a különböző digitalizációs megoldások egyre szélesebb körben való elterjedése mellett a termelési és logisztikai folyamatok működésében továbbra is meghatározó szerepet játszik az emberi tényező. Ezért olyan digitális modellek, számítási algoritmusok kidolgozása válik szükségessé, amelyek a termelésstervezés, a gyártási szekvenciák meghatározása során integráltan képesek figyelembe venni a dolgozók gyártási képességeit is. A feladat komplexitásából eredően a vizsgálatokra szimulációs modelleket alkalmaznak. Az ilyen modellekkel hatékonyan vizsgálhatók a dolgozói képességekkel kibővített termelésütemezési rendszerek teljesítőképessége. Cikkünkben bemutatásra kerül egy általános szimulációs rendszermodell és egy termelésütemezést támogató új heurisztikus algoritmus. Szimulációs vizsgálattal igazoltuk, hogy a javasolt módszer javítja a vizsgált termelőrendszer hatékonyságát az erőforrások kihasználtsága szempontjából.

Kulcsszavak: digitális modellek, szimuláció, termelésütemezés, dolgozói képességek

Abstract

In addition to the spread of Industry 4.0 and various digitization solutions, the human factor continues to play a key role in the operation of production and logistics processes. Therefore, development of digital models and calculation algorithms that are able to take into account the production capabilities of the employees in an integrated way during the production planning and the determination of the production sequences becomes necessary. Due to the complexity of the task, simulation models are often applied. Performance of production scheduling systems enhanced with employee capabilities can be effectively evaluated with such models. Our paper presents a general simulation system model and a new heuristic algorithm to support production scheduling. The simulation based investigation proved that the proposed method improves the efficiency of the studied production system in terms of resource utilization.

Keywords: digital models, simulation, production planning, production capabilities of the employees

1. Bevezetés

A termelő vállalatok - multinacionális cégek, kis- és középvállalatok – közös jellemzője, hogy a menedzsment a vevői igények minél magasabb színvonalú kiszolgálását tűzi ki célul a megrendelések rövid átfutási idővel való teljesítése és megfelelő minőségi feltételek biztosítása mellett [1]. A vevői megrendelések nagy száma a készterméktípusok számának drasztikus növekedését eredményezi, amely hatással van a gyártórendszerek kialakítására, a termelési és logisztikai folyamatok működtetésére.

A nagysorozatú gyártást felváltják a kis- és közepes sorozatok, valamint egyre fontosabbá válnak az egyedi igények gyártását támogató rendszerek, ahol az egydarabos anyagáramlás lesz a jellemző [2]. Ezen igények kielégítése csak és kizárólag a gyártó- és logisztikai rendszer nagyfokú rugalmassága és összehangolt működése mellett valósítható meg, amelyet az Ipar 4.0 fejlesztési irányzat kínált lehetőségek még inkább képesek támogatni az infokommunikációs, digitalizációs és virtualizációs technológiák széleskörű együttműködésének segítségével [3]. A valós gyártórendszerek termelési és logisztikai folyamatainak digitális leképzése támogatja a szűk keresztmetszetek feltárását [4], amelyek csökkentésére szimulációs vizsgálatok alkalmazhatók. A digitális modellben a valós folyamatok leképzése valósul meg egy olyan absztrakciós szinten, ahol lehetségessé válik a rendszer működését jellemző mutatószámok kiértékelése és az azokat befolyásoló paraméter-értékek vizsgálata [5]. A digitális modelleken a rendszer bemenő paraméter-értékeinek változtatásával kísérletek végezhetők a valós folyamatok zavartalan működésének biztosítása mellett.

A szimulációs vizsgálatok alkalmazásának jelentősége egyre jobban felértékelődik, hiszen egy-egy valós probléma megoldására készült általános modell számos paramétert tartalmaz, amely a kiértékelésen túl különböző működtetési stratégiák vizsgálatára vagy a rendszer folyamatainak újratervezésére is felhasználható. A vizsgált rendszerek jellemzően diszkrét termelési és a hozzá kapcsolódó logisztikai folyamatokból állnak. E rendszerek digitális leképzéséhez speciális modellező szoftverek állnak rendelkezésre, amelyek széles objektumkészlettel támogatják a termelési, gyártási és logisztikai folyamatok modellezését.

Az egyik ilyen szoftver a Siemens cég Tecnomatix termékcsaládjának a digitális gyártást támogató és modellező Plant Simulation tervező szoftvere, amely egy általános diszkrét-eseményvezérelt szimulációs fejlesztőkörnyezet. Gazdag objektumkészletének segítségével a legkülönbözőbb termelési, gyártási és logisztikai rendszerek folyamatainak modellezésére és szimulációs vizsgálatára nyílik lehetőség [6], [7]. A SimTalk programozási nyelvvel saját algoritmusok, vezérlő eljárások, függvények készíthetők, amellyel a folyamatok valósághűbb, részletesebb leképzését támogatja [8].

A legtöbb diszkrét gyártási folyamatok közös jellemzője, hogy a munkadarabokon előre definiált sorrendben gyártási-szerelési műveleteket (operációkat) kell végrehajtani bizonyos gépeken vagy munkahelyeken. Az egyik tipikus alapvető gyártási séma az úgynevezett „flow shop” (egyutas) modell, melyben a munkadarab-halmazokon (munkákon) azonos műveleteket, azonos sorrendben, azonos erőforrásokon kell végrehajtani. Ennek további alkategóriái lehetnek, például az előzéses és előzésmentes változatok, melyekben a munkák végrehajtási sorrendje erőforrásonként különböző/vagy azonos lehet [9], [10], [11].

Egy másik tipikus séma a „job shop” modell, melyben a különböző munkákon elvégzendő műveletek sorrendje eltérő lehet [12]. Mindkét típusú modell lehet ún. rugalmas (flexible) is, amennyiben egy operáció végrehajtásához nem csupán egy gép, hanem egy gépcsoport tartozik, akkor a gépválasztáshoz döntési feladat is párosul [13], [14], [15]. A feladatok komplexitásából adódik már kis gépszám mellett is, hogy optimális ütemterv készítése – polinomiális futási idő mellett - nem lehetséges, mivel

a modellek túlnyomó többsége NP-nehez problémaosztályba tartozik. Egzakt, számításigényes megoldás helyett előtérbe kerülnek az optimum-közeli megoldást adó gyors heurisztikus- és metaheurisztikus algoritmusok, keresőeljárások alkalmazása [16]. A valós gyártórendszerek termelés-ütemezésének támogatására olyan komplex modellek kidolgozása szükséges, amelyek a termelési folyamatban jelentkező paraméterek mellett a logisztikai folyamatokhoz kapcsolódó paramétereket, befolyásoló tényezőket, sztochasztikus hatásokat is képesek figyelembe venni.

A cikkben összefoglalt kutatómunkánkat egy különösen rugalmas szerelőrendszer valós problémája indukálta. A következő fejezetekben bemutatásra kerül egy szimulációs modell és egy új termelés-ütemezési heurisztikus algoritmus, amellyel a vizsgált rendszer minél magasabb teljesítményét eredményező napi termelési tervek elkészíthetők. A rendszer specialitását az emberi erőforrások (személyek) egyéni szerelési képességeit is magába foglaló termelési modell adja, amely tovább növeli a rendszer paramétereit és komplexitását. A kiterjesztett döntéshozatali algoritmus hatékonyságát szimulációs futási eredményekkel támasztjuk alá.

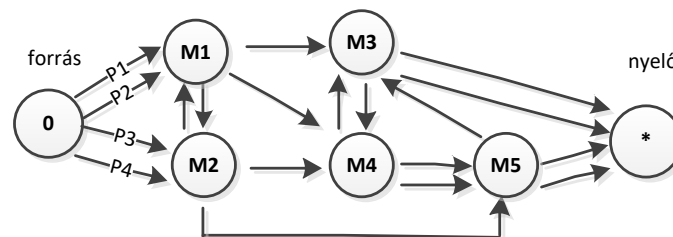
2. Probléma definiálása

2.1. Operációk és munkahelyek

Napjainkban a vállalatok versenyképességének fokozása elsődleges prioritású szerepet játszik a vevői megrendelések határidőre történő teljesítése a produktív termelési folyamatok teljesítményének maximalizálása a non-produktív logisztikai folyamatok minimalizálása, a veszteségek csökkentése mellett.

A gyártási folyamatokban egyik veszteségként jelentkezik a terméktípusok közötti váltáshoz kapcsolódó átállítási idő, amelynek csökkentésére az optimum-közeli gyártási szekvencia szerinti gyártás adhat megoldást. A vevői igények megváltozása következtében olyan gyártási struktúrák kerülnek előtérbe, ahol a termelési folyamatban egyidejűleg különböző típusú termékek gyártása folyik és az operációk sorrendje kötött, nem felcserélhető, de terméktípusonként akár számosságában is eltérő lehet. Az egyes operációk olyan géphez vagy az ekvivalens gépekből álló gépcsoporthoz kötöttek, ahol a szükséges műveletek elvégezhetők. Az Ipar 4.0 technológiák alkalmazásának eredményeképpen az egyes berendezések autonóm módon képesek működni, hálózatba kötve kommunikálnak egymással.

Mivel a gépek és a munkadarabok is azonosítottak, a gépek képesek az aktuális operációjuk befejezését követően jelzést küldeni az aktuális munkadarab soron következő operációját végző gép számára, annak érdekében, hogy a két gép közötti szállítási idő alatt lehetősége legyen a következő gépnek felkészülnie az új munkadarab fogadására, csökkentve ezzel az átállítási időt. A rendszerben egyidőben jelenlevő különböző terméktípusok miatt bonyolult anyagáramlási relációk keletkeznek. Az 1. ábra példaként illusztrálja a „job shop” problémát egy irányított gráf formájában 4 termékre és 5 gépre vonatkozóan.



1. ábra. A vizsgált „job shop” termelési folyamat mintamodellje.

Az 1. táblázat a terméktípusonkénti operációk sorrendjét mutatja.

1. táblázat. Terméktípusonkénti műveletek sorrendje

	M1	M2	M3	M4	M5
P1	O_1/t_1	O_2/t_2		O_3/t_3	O_4/t_4
P2	O_1/t_5	O_3/t_6		O_2/t_7	
P3	O_2/t_7	O_1/t_8	O_3/t_8		
P4		O_1/t_8	O_3/t_9	O_4/t_{10}	$O_2/t_{11}; O_4/t_{12}$

Minden egyes operációhoz (O_i) tartozik egy feldolgozási idő (t_j), amely ahhoz szükséges, hogy az adott terméktípus adott művelete az adott gépen elvégezhető legyen.

2.2. Humán erőforrások

Az előző ábrán (1. ábra) számos anyagáramlási reláció létezik az egyes gépek vonatkozásában. Az anyagmozgatás automatizált módon történő megvalósításának költséges kialakítása helyett ezt a feladatot dolgozók látják el. A dolgozók a rendszer bemenő tárolójából (forrás) választják ki a soron következő munkadarabot, majd az adott terméktípusnak megfelelő műveleti sorrend szerint mozgatják a munkadarabot az egyes szerelő állomások (gépek) között. Az állomásokon elvégzik a szükséges operációkat. Egy munkahelyen egy időben egy dolgozó hajthat végre műveletet. Amennyiben egy munkahelyen foglalt a dolgozó várakozik, amíg az fel nem szabadul. Az utolsó művelet elvégzése után az összeszerelt termék a késztermék tárolóba kerül (nyelő). Ezt követően a ciklus kezdődik előlről. Így a vizsgált rendszerben a dolgozók valósítják meg az egydarabos anyagáramlást. A munkahelyeken a szerelési folyamat nem szakítható meg. A dolgozók csak és kizárólag a termék készterméktárolóban való elhelyezése után (a megkezdett ciklus végén) dönthetnek a szünetek kivételéről.

A humán erőforrás alkalmazásának számos előnye mellett a negatív hatások is megjelennek a termelési folyamat produktivitására nézve, mivel a műszakos/napi/heti termelési tervek teljesülése a rendszerben lévő sztochasztikus hatásoktól függ, amelyek az emberek egyediségéből fakadnak leginkább. Az emberek közötti különbségek legjobban az egyes operációkhoz tartozó normaidők betartása alapján mérhetők, hiszen minden operációhoz tartozik egy előre definiált normaidő, amely a termelési tervek készítésének alapjául szolgál.

Ezekből tervek közül származnak a műszakos termelési tervek – jellemzően egy adott időszakra nézve egyenletesen elosztva a műszakok között. Bár a dolgozóktól elvárás a normaidő betartása, mégis bizonyos különbségek fedezhetők fel, amely a dolgozó gyártási-szerelési képességeiből fakad. Míg egy új betanuló dolgozó nem képes a normaidők maximális betartására, addig a gyakorlottabb normaidő alatt is képesek elvégezni a műveleteket. Az éjszakai és nappali műszakokban dolgozók között szintén különbségek lehetnek. A dolgozói képességet tehát egy adott művelet elvégzésének normaidőjéhez (átlagidejéhez) viszonyítva százalékos formában értelmezhetjük.

A vizsgált termelési folyamat komplexitása tovább nőtt a dolgozói képességek figyelembe vételével, amely a termelésstervezési, ütemezési modellekre és algoritmusokra is kihat. A rendszer bonyolultsága teszi indokolttá a szimulációs modellek és módszerek alkalmazását, amellyel a rendszer termelékenységére, hatékonyságára vonatkozó mutatószámok kiértékelhetők a különböző termelési tervek és dolgozói képességek függvényében.

3. A vizsgált rendszer digitális modellje

3.1. A szimulációs modell legfontosabb elemei

A bemutatott termelő rendszer vizsgálatát egy digitális modell kidolgozása előzte meg. A modellben valós termelési és logisztikai folyamatok kerültek leképzésre az alábbi módon:

- Termelő berendezések (munkaállomások, gépek) modellezése: A termelési folyamatban 50 db termelő berendezés található (A1-A50), elhelyezkedésük rögzített. A termelő berendezés és a dolgozó együttműködése eredményezi a munkadarabon a gyártási folyamat elemi operációját, melynek során a munkadarab valamely lényeges tulajdonsága megváltozik. A tulajdonságváltozások irányított sorozata alkotja a gyártási folyamatot, amely a munkadarabot a kiindulási állapotból a kész állapotba transzformálja. A művelet (operáció) legfontosabb paramétere a dolgozói képességektől függő feldolgozási idő, amely az adott termék adott operációjának az adott munkaállomáson (gépen) történő végrehajtásának normaidejéből származtatható (1).

$$t = t_{p_{ik}}^{A_j} + t_{p_{ik}}^{A_j} (1 - B_{p_{ik}}^{Operator_l} / 100) \quad (1)$$

ahol:

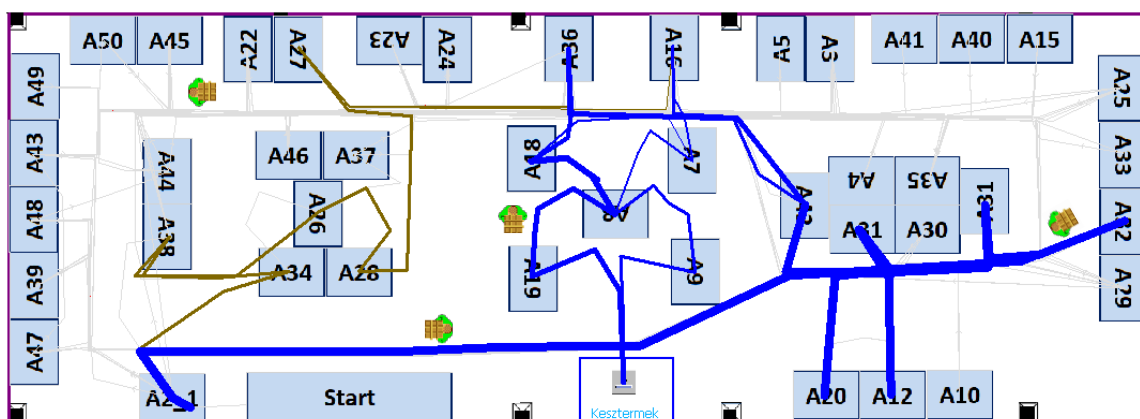
- A_j : a j . gép.
- p_{ik} : i . terméktípus k . operációja.
- $t_{p_{ik}}^{A_j}$: i . terméktípus k . operációjának normaideje az A_j gépen.
- $Operator_l$: l . operátor.
- B : az operátor gyártási képessége.
- $B_{p_{ik}}^{Operator_l}$: százalékos formában adja meg, hogy az i . terméktípus k . operációjának normaidejét mekkora mértékben képes betartani az l . operátor.
 - Ha az operátor 100 %-osan képes az adott művelethez tartozó normaidőt tartani, akkor az operáció műveleti ideje megegyezik a normaidővel.
 - Ha az operátor 100 %-osnál kisebb mértékben képes az adott művelet normaidejének betartására, akkor a normaidő növekszik, hiszen lassabban dolgozik az operátor, így az operáció műveleti ideje nagyobb lesz a normaidőnél.
 - Ha az operátor 100 %-osnál nagyobb mértékben képes az adott művelet normaidejének betartására, akkor a normaidő csökken, hiszen gyorsabban dolgozik, így az operáció műveleti ideje kisebb lesz a normaidőtől.
- Dolgozók modellezése: A dolgozók a munkaállomások (gépek) között előre definiált útvonalon, megadott átlagsebességgel közlekednek. A munkadarabot a „Start” elnevezésű bemeneti tároló objektumról választja ki a dolgozó, majd a terméktípushoz kapcsolódó műveleti sorrend szerint egyesével keresi fel a munkaállomásokat. Az utolsó műveletet követően az „End” elnevezésű késztermék tároló objektumon elhelyezi a készterméket. A dolgozók előre megadott hosszúságú szünetekkel rendelkeznek. Ezeket a szüneteket saját döntésük alapján használhatják fel. A szüneteket csak a késztermék leadása után lehet elkezdni, megkezdett gyártási műveletsor közben nem. Egy időben több operátor is dolgozik, így a közösen használt (osztott hozzáférésű) munkaállomások előtt várakozó sorok alakulhatnak ki, mivel egy

munkaállomáson egyidejűleg csak egyetlen operátor dolgozhat. Az operátor mindaddig az állomásnál marad, míg az aktuális operációt el nem végezte a képességeinek függvényében. Az operációk nem megszakítható folyamatok. Léteznek azonos tulajdonságokkal rendelkező gépek, amelyek ekvivalens gépekből álló gépcsoportot alkotnak (így bizonyos műveletek elvégzésére párhuzamos gépek állnak rendelkezésre). A modellben 23 operátor került implementálásra (Operator1, ..., Operator23), különböző (nagyon, közepesen, kevésbé hatékony) képességekkel.

- Termékek modellezése: A modellben 15 termékcsalád és 100 terméktípus létezik. A műveleti sorrendet a termékcsaládokra értelmezzük. A terméktípusok a termékcsaládok egyes specializálódásai, így az ezeken végrehajtott operációk száma és sorrendje megegyezik a termékcsaláddal, azonban az operációk normaideje típusonként eltérő lehet.
- „Start” objektum (forrás): Bemeneti tárolóként funkcionál. A gyártásra váró munkadarabok tárolja, amelyek közül választ egyet az oda érkező operátor.
- „End” objektum (nyelő): A késztermékek tárolását megvalósító objektum. A készre gyártott terméket az operátorok itt helyezik el.

A termelő rendszer Plant Simulation modelljét a 2. ábra mutatja be, a termelő berendezésekkel, a dolgozókkal és az aktuálisan gyártott terméktípusokkal együtt. A dolgozók dedikált útvonalon közlekednek. Útvonal ott jelenik meg, ahol két munkaállomás anyagáramlási relációban áll egymással.

Illusztratív példaként két terméktípus Sankey diagramja is látható, melyek vastagsága szemlélteti a terméktípusokból legyártott volumen nagyságát, továbbá megjelenítik a terméktípus technológiai folyamatához tartozó munkahelyeket. A modell működéséhez, a rendszerben zajló időbeli folyamatok vizsgálatához nagymennyiségű alapadat szükséges, amely strukturált formában külső adatbázisban helyezkedik el. Az alapadatokat a modell alapobjektumainak tulajdonságai (termékek, gépek, dolgozók) mellett a köztük lévő anyagáramlási relációkat, logikai kapcsolatokat is tartalmazzák. A modell implementálása során a korábban kidolgozott modellépítés koncepcióját követve [4] lehetséges a modell struktúrájának gyors adaptálása az alapadatok módosításával. Az módosított alapadatoknak megfelelően a modell struktúrája automatikusan megváltozik. Munkahelyek, dolgozók, termékek jönnek létre vagy szűnnek meg, a modell objektumainak tulajdonságai, adatai dinamikusan frissülnek.



2. ábra. Szimulációs modell.

A vázolt dinamikus viselkedésű digitális modell működéséhez az alábbi konzisztens adatokat, adatstruktúrákat alkalmaztuk:

- Dolgozók listája, a dolgozók egyedi műszakrendje, műszaktípushoz rendelése.
- Műszakrend, műszakbeosztás: 8 vagy 12 órás műszakok ciklikus változása napi bontásban. A műszakokban a különböző képességű dolgozók vegyesen állnak rendelkezésre.
- Termékcsaládok, terméktípusok listája.
- Termékcsaládok gyártási műveleteinek sorrendje, a műveletek munkaállomásokhoz való hozzárendelése, ahol az adott operáció elvégezhető.
- Terméktípusok operációinak normaideje, amely az elvárt műveleti időt reprezentálja.
- Terméktípusok operációnkénti normaidejének és az operátorok képességeinek mátrixa, ahol a mátrix egy eleme megmutatja, hogy az adott operátor az adott operáció műveleti idejét (normaidejét) mekkora százalékban képes betartani.
- Operátorok átlagos képességmátrixa az egyes termékcsaládok tekintetében: a mátrix egy eleme megadja, hogy az adott operátor az adott termékcsaládhoz tartozó bármely operáció normaidejét mekkora százalékban képes betartani.
- Termelési tervek listája:
 - A vizsgált időszakban legyártandó darabszám terméktípusonként.
 - A vizsgált időszakban műszakonként legyártandó darabszám terméktípusonként.

A termelési folyamat hatékonyságát, a termelési terv teljesülését nagyban befolyásolja a vizsgált időszakban a különböző műszaktípusok sorrendje és darabszáma, illetve az egyes műszaktípusokhoz rendelt dolgozók és gyártási képességeik.

3.2. Szimulációs vizsgálat

A szimulációs vizsgálatunk célja a rendszer hatékonyságának és teljesítőképességének elemzése változó körülmények között. A vizsgálat első lépéseként be kell állítani a modell bemenő paramétereinek aktuális értékét. Jelenleg két fő bemenő paraméter-halmaz adható meg:

- A vizsgált időszak, amely definiálja a műszakok sorrendjét, számosságát, az egyes műszaktípusokban dolgozó operátorokat és képességeiket.
- A vizsgált időszakra vonatkozó termelési tervet kétféle módon:
 - A legyártandó mennyiség a teljes vizsgált időszakra vonatkozik, amelyből automatikus módon a műszakszámok függvényében egyenletesen elosztva készülnek a műszakonkénti termelési tervek.
 - A legyártandó mennyiség direkt módon műszakonként is megadható.

A szimulációs vizsgálat eredményei tekintetében különböző kimutatások készíthetők a rendszer teljesítményére, a dolgozók kihasználtságára, a gyártott darabszámra vonatkoztatva. Az egyik legfontosabb szempont a termelési terv teljesülésének mértéke, ezért az egyik fő mutatószám a gyártott darabszám. A másik mutatószám pedig a rendszer időbeli szabad kapacitása. E két mutatószám egymáshoz való viszonyából az alábbi következtetések vonhatók le:

1. Amennyiben a termelési terv nem teljesül, azaz léteznek le nem gyártott darabok és a rendszer időbeli szabad kapacitása jelentős, akkor az arra utal, hogy bizonyos műszakokban nem minden tétel került legyártásra a dolgozók gyártási képességei vagy nem megfelelő irányítási döntések miatt.
2. Amennyiben a termelési terv nem teljesül, azaz léteznek le nem gyártott darabok és a rendszernek nincs jelentős időbeli szabad kapacitása, akkor az túltervezett termelési tervre utal, azaz a tervezett mennyiség nem gyártható le az adott időszakban.

3. Amennyiben a termelési terv teljesül és a rendszernek jelentős időbeli szabad kapacitása van, akkor az alultervezett termelési tervre utal, a dolgozók szabad gyártókapacitással rendelkeznek, a rendszerben további termékek gyárthatók.
4. Amennyiben a termelési terv teljesül és a rendszernek nincs jelentős időbeli szabad kapacitása, akkor az a termelési terv valószínűleg maximálisan kihasználja a rendszer erőforrásait és elosztása is megfelelő az egyes műszakok között.

A rendszer teljesítményét, a gyártott darabszámokat nem csupán a termelési terv műszakonkénti elosztása befolyásolja, hanem a dolgozók működését meghatározó irányítási, döntési stratégia is. A modellben két olyan esemény került implementálásra, amely a dolgozók tevékenységét és a gyártórendszer teljesítményét befolyásolja:

1. A gyártandó terméktípusok és az operátorok összerendelése a „Start” objektumnál, ahol az adott műszakban gyártandó terméktípusok egy várakozó sort alkotnak. A várakozó munkadarabok sorából választ egyet az operátor. Az operátor alapértelmezett kiválasztási stratégiája, hogy a várakozó sorból azt a legkisebb pozíciójú elemet választja ki, amelyiket le tud gyártani. Másiképpen fogalmazva, az operátor az általa gyártható elemek közül a legelsőket választja. A dolgozó képességei miatt léteznek olyan termékcsaládok, amelyek gyártására egyáltalán nem képes. Ez egy egyszerű összerendelés, de számos hatása lehet a termelési folyamatra nézve. Igen érzékeny a várakozó sorban álló elemek sorrendjére. Ha az egymás mögött álló munkák azonos termékcsaládba tartoznak és ezek gyártására a dolgozók képesek, akkor a dolgozók ugyanazt a technológiai utat járják be, ugyanazon munkahelyeket keresik fel sorban egymás után. A munkahelyek előtt pedig várakozó sorok alakulhatnak ki, amelyek a termékek gyártásának átfutási idejét megnövelik, rontva ezzel a rendszer teljesítőképességét.
2. Választás ekvivalens gépek között. Bizonyos operációk (pl. befejező műveletek) esetében egy-nél több gép áll rendelkezésre azonos típusú operációk elvégzésére. Ebben az esetben a dolgozó döntési stratégiája a lehetséges gépekre számított büntetőfüggvény kiértékelésén alapul, amely figyelembe veszi a gép (munkahely) foglaltságát és a gyártott darabszámot. Azt a gépet választja, amelyiknél a függvény értéke minimális.

A szimulációs vizsgálataink megerősítették azt a kezdeti feltételezésünket, hogy a vizsgált gyártórendszer produktivitása és az erőforrások megfelelő mértékű kihasználtsága a sok befolyásoló paraméter és döntési stratégia mellett a munkák várakozási sorban adott szekvenciájától is függ, a dolgozók és a gyártandó munkadarabok összerendelése miatt.

3.3. Szimulációs eredmények

A szimulációs modell alkalmas a termelési terv teljesülésének vizsgálatára. A vizsgálat 7 napra, 14 darab 12 órás műszakra terjed ki. A dolgozók műszakokhoz rendelése és képességeik előre definiálva voltak. A modell legfontosabb bemenő paraméterei az alábbiak:

- A dolgozói képességek:
 - elméleti operátorképességek: az operátorok gyártási képességeinek figyelmen kívül hagyásakor minden operátor mindegyik terméktípust 100%-osan, a normaidőnek megfelelően képes gyártani.
 - átlagos operátor képességek: a műveleti idő az elvárt normaidő és a dolgozó átlagos képességéből származtatható.
- A termelési terv a vizsgált időszakra (2. táblázat):

2. táblázat. Termelési terv

Terméktípus [ID]	Mennyiség [db]
_060127	136
_060159	238
_160700	963
_06016A	123
_060125	749
_060162	82
_06015A	73
_06016B0	352

- A vizsgálat időintervalluma, műszakok sorrendje. A termelési terv a műszakok számának megfelelően egyenletesen megoszlik a műszakok között (kerekítéssel).

A rendszer két kitűzött teljesítménymutatója:

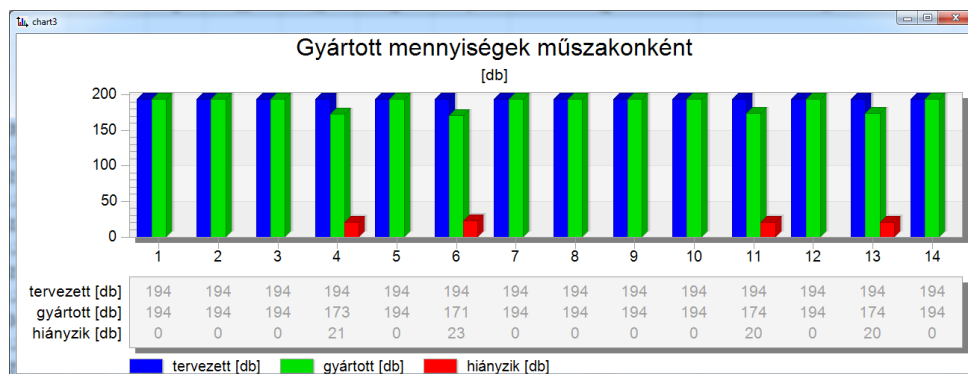
- a gyártott darabszám,
- a rendszer időbeli szabad kapacitása.

A futási eredményeket az alábbi 3. táblázat foglalja össze a dolgozói képességek két vizsgált esetének szempontjából.

3. táblázat. Futási eredmények összehasonlítása

	Elméleti operátorképességekkel	Átlagos operátorképességekkel
Tervezett mennyiség [db]	2716	2716
Gyártott mennyiség [db]	2663	2632
Szabad kapacitás [perc]	960	492

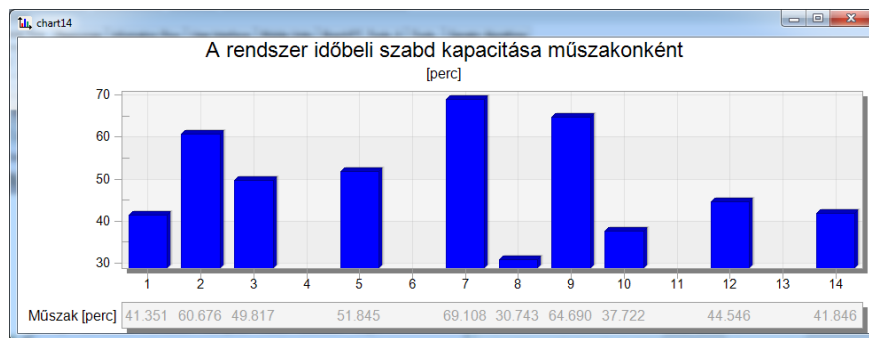
A fenti táblázatból látható, hogy a gyártott darabszám még akkor is elmarad a tervezettől, amikor a dolgozók a maximális elméleti gyártási teljesítménnyel végzik a feladatokat. Az átlagos képességekkel futtatott szimulációban a gyártott mennyiség csökken, mivel a dolgozók nem képesek a normaidő alatt elvégezni az operációkat. Emiatt a termékek átfutási ideje megnő. A műszakonkénti gyártott mennyiségeket a 3. ábra mutatja be.



3. ábra. Gyártott mennyiségek megoszlása műszakonként.

Mindkét esetben a rendszernek időbeli tartalékai vannak. Bizonyos esetekben a műszakonként tervezett termelési terv a műszak vége előtt teljesült. Az operátorok pedig várakoznak a műszak végéig.

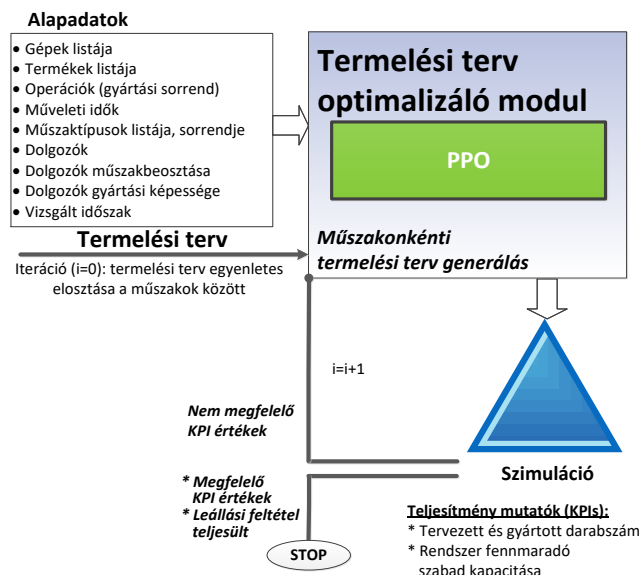
Egy műszak időtartaléka alatt azt a fennmaradó időmennyiséget (időbeli szabad kapacitást) értjük, amely a műszak hasznos időalapjából és a műszakonkénti termelési terv teljesítéséhez szükséges idő különbségéből adódik. A rendszer időbeli szabad kapacitások elemzéséből (4. ábra) látszik, hogy bizonyos műszakok (4, 6, 11, 13) túlterheltek, a dolgozók nem képesek a műszakszintű termelési terv teljesítésére.



4. ábra. Időbeli szabad kapacitás megoszlása műszakonként.

4. A saját fejlesztésű termelési terv optimalizáló (PPO) modul heurisztikus módszere

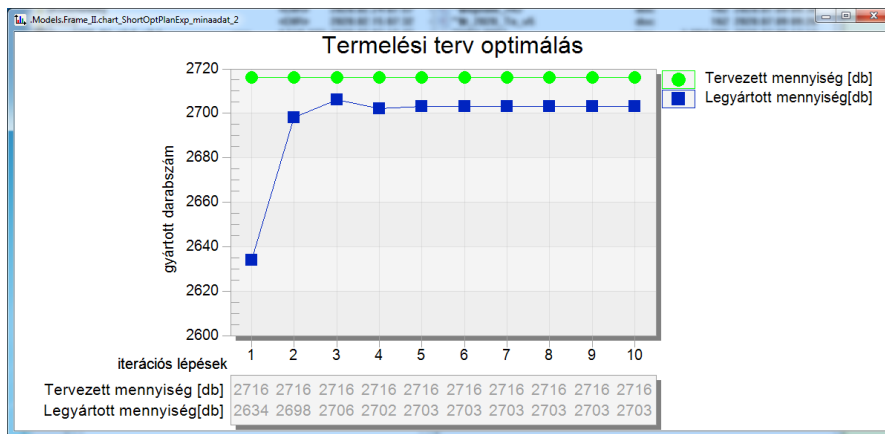
A 3. ábra és 4. ábra alapján a gyártott darabszám növeléséhez implementálásra került a Plant Simulation környezetben egy – saját fejlesztésű – termelési terv optimalizáló modul (PPO), amely a termelési terv műszakonkénti egyenletes elosztásából kiindulva a legyártásra nem került termékeket olyan műszakokhoz rendeli, amelyek rendelkeznek időbeli szabad kapacitással és a dolgozók képesek a többlet feladatok teljesítésére.



5. ábra. PPO modul iteratív kereső algoritmusának sematikus ábrája.

A PPO (5. ábra) célja, hogy az egyenletes elosztású műszakonkénti termelési tervek módosításával javulást érjen el a rendszer teljesítménymutatóiban a dolgozói képességek figyelembevételével. Az előkészítő (0. iterációs) lépésben a modul a megadott termelési tervet egyenletesen elosztja a műszakok között, majd lefuttatja a szimulációt és kiértékeli a mutatószámokat. Amennyiben vannak le nem gyártott termékek, azokat az első olyan műszakhoz rendeli hozzá, ahol időbeli szabad kapacitás van és a dolgozók által is gyárthatók.

A módosított műszakonkénti termelési tervekkel ismét lefuttatja a szimulációs vizsgálat és kiértékelődnek a teljesítménymutatók. Ez az iteratív folyamat mindaddig ismétlődik, amíg vannak le nem gyártott termékek és van szabad időbeli kapacitás a rendszerben vagy az iterációk száma el nem érte az előre beállított maximális értéket. Az iterációs javító algoritmus már kis iterációs szám mellett is képes javulást elérni a rendszer teljesítménymutatóiban (6. ábra). A gyártott darabszám nőtt 2632-ről 2703-ra, amely a rendszer hasznos időalapjának jobb kihasználására utal. Ezt mutatja a rendszer időbeli szabad kapacitásának 492 percről 272 percre való csökkenése.



6. ábra. PPO modul iterációs lépései.

Az iteratív javító algoritmus eredménye egy műszakonkénti termelési terv, amelyet az alábbi 4. táblázat mutat be.

4. táblázat. Műszakonként gyártott darabszámok

Műszaktípusok	1.A	2.B	3.D	4.C	5.D	6.C	7.B	8.A	9.B	10.A	11.C	12.D	13.C	14.D
Terméktípus														
_060127	10	10	10	9	11	9	11	10	10	10	9	11	9	11
_060159	17	17	17	15	18	15	19	18	17	17	15	19	15	19
_160700	68	68	68	61	73	60	74	72	68	68	61	75	61	75
_06016A	9	9	9	8	10	8	10	9	9	9	8	10	8	10
_060125	53	53	53	46	57	46	58	58	53	53	48	58	48	58
_060162	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
_06015A	6	6	6	5	7	5	7	6	6	6	5	7	5	7
_06016B0	25	25	25	22	28	22	28	25	25	25	22	28	22	28
Egyenletes elosztással	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194
PPO modullal	194	194	194	172	210	171	213	204	194	194	174	214	174	214

Az implementált heurisztikus algoritmus bizonyos műszakoknál csökkentette a gyártandó mennyiséget, míg más műszakoknál növelte azt. A „C típusú” műszakban dolgozók szűk keresztmetszetként jelentek meg a rendszerben. Alacsony gyártási képességeik a műszak termelékenységét rontották.

5. Összefoglalás és továbbfejlesztési irányok

Cikkünkben bemutatásra került egy speciális gyártórendszer, ahol a humán erőforrás, a dolgozók gyártási hatékonysága, képessége kulcsfontosságú szerepet játszik a termelőrendszerrel elvárható maximális produktivitásban, mivel az emberek egyénisége a gyártási folyamatra is kihat. Általánosságban is elmondható, hogy a termelési, gyártási feladatok szervezésében, a termelésstervezési és ütemezési modellekben integráltan meg kell jelennie az emberi faktornak annak érdekében, hogy a rendszer hatékonyságnövelésére tett változtatások a kívánt hatást ériék el. Ennek vizsgálatára kidolgozásra került egy digitális szimulációs modell, amely alkalmas az emberi tényező termelési folyamatra gyakorolt hatását figyelembevételére egy új heurisztikus algoritmus műszakonkénti termelési terv optimalizálása révén növelni a rendszer teljesítőképességét.

A munkák és a dolgozók összerendelésének más stratégiájával, a gyártási szekvencia optimalizálásával további javulás prognosztizálható, amennyiben a dolgozó mindig törekszik a gyártási képességének legmegfelelőbb munka kiválasztására oly módon, hogy figyelembe veszi a már gyártásban lévő terméktípusokat a munkaállomások előtti várakozási idő csökkentésének érdekében. Ez, a rendszerben aktuálisan gyártott munkák terméktípusainak maximális heterogenitásával biztosítható. Emellett tekintettel van a többi dolgozó gyártási képességére, azaz amíg nem muszáj, nem választ olyan munkát, amelyet csak kevesen tudnak – akár kisebb hatékonysággal is – gyártani, biztosítva ezzel a dolgozók folyamatos munkáját és a gyártott darabszámok növekedését.

Egy kvázi-optimális műszakszintű gyártási szekvencia meghatározásához további számos szempont kell figyelembe venni, amelyhez egy többcélú prioritás alapú termelésstervező eljárás kidolgozása válik szükségessé, amelyet a jelenleg alkalmazott szimulációs modell továbbfejlesztésével kívánunk elérni a továbbiakban.

Irodalom

- [1] Szakál, F., Józsa, L.: *A 21. század fogyasztója, avagy mi a fontos a fogyasztónak a modern világban*, "Kulturális gazdaság" Kautz Gyula Emlékkonferencia elektronikus formában megjelenő kötete, Széchenyi István Egyetem, Győr, 2019, ISBN 978-615-5837-34-0.
- [2] Tóth, N., Ladányi, R., Garamvölgyi, E.: *Elaborating Industry 4.0 compatible DSS for enhancing production system effectiveness*, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018, 448:012040, Kecskemét, Hungary, 2018, <https://10.1088/1757-899X/448/1/012040>
- [3] Russmann, M., Lorenz, P., Gerbert, P., Waldner, M., Jastuss, J., Hengel, P., Harnisch, M.: *Industry 4.0: the future of productivity and growth in manufacturing industries*, The Boston Consulting Group report, 2015.
- [4] Tóth, N. *Termelési folyamatok intenzifikálását célzó új módszer bemutatása az Ipar 4.0 lehetőségei alapján*, Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban, Konferencia Kiadvány, Debrecen, 2019, pp. 396-399, ISBN978-963-7064-38-8.
- [5] VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen-Grundlagen*, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1993.

- [6] Siderska, J.: *Application of Tecnomatix Plant Simulation for modeling production and logistics processes*. Business, Management and Education 2016, 14(1):64-73, <https://doi.org/10.3846/bme.2016.316>
- [7] Tamás, P., Illés, B., Tollár, S.: *Simulation Of A Flexible Manufacturing System*, Advanced Logistic Systems 2012, 6(1):25-32.
- [8] SIEMENS AG: *Tecnomatix Plant Simulation Help*, 2017.
- [9] Kulcsár, Gy., Erdélyi, F.: *A New Approach to Solve Multi-Objective Scheduling and Rescheduling Tasks*, International Journal of Computational Intelligence Research 2007, 3(4):343-351, <https://doi.org/10.5019/j.jcjr.2007.115>
- [10] Kulcsár, Gy.: *Ütemezési modell és heurisztikus módszerek az igény szerinti tömeg-gyártás finomprogramozásának támogatására*, Doktori (PhD) értekezés, Miskolci Egyetem, Miskolc-Egyetemváros, 2007.
- [11] Kulcsárné, F. M.: *Kiterjesztett modellek és módszerek erőforrás-korlátos termelésütemezési feladatok megoldására*, Doktori (PhD) értekezés, Miskolci Egyetem, Miskolc-Egyetemváros, 2017.
- [12] Kulcsár, Gy., Kulcsárné, F. M.: *Kiterjesztett termelésprogramozási modell erőforrás-korlátos ütemezési feladatok megoldására*, Multidiszciplináris tudományok 2014, 4(1):19-30.
- [13] Botta-Genoulaz, V.: *Hybrid flow shop scheduling with precedence constraints and time lags to minimize maximum lateness*. International Journal of Production Economics 2000, 64:101-111, [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(99\)00048-1](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(99)00048-1)
- [14] Low, C.: *Simulated annealing heuristic for flow shop scheduling problems with unrelated parallel machines*, Computers and Operations Research 2005, 32:2013–2025, <https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.01.003>
- [15] Demir, Y., İşleyen, S. K.: *Evaluation of mathematical models for flexible job-shop scheduling problems*, Applied Mathematical Modelling 2013, 37(3):977-988, <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.03.020>
- [16] Fogarasi, G., Tüü-Szabó, B., Földesi, P., Kóczy T., L.: *Az Utazó Ügynök Problémára alkalmazható diszkrét memetikus evolúciós metaheurisztikák összehasonlítása*, Logisztika-Informatika-Menedzsment 2019, 4(1):15-30, <https://doi.org/10.29177/LIM.2019.1.15>