

Jósvai János

Proaktív termelésütemezési, logisztikai módszerek és ipari alkalmazásaik

doktori tézisek

Témavezetők:

Dr. Kardos Károly
Széchenyi István Egyetem

Dr. Horváth Zoltán
Széchenyi István Egyetem

Infrastrukturális Rendszerek Modellezése és Fejlesztése Multidiszciplináris
Műszaki Tudományi Doktori Iskola

1. Motiváció és célkitűzések

A jelen kor termelési rendszereit jelentős terhelésingadozások és bizonytalanságok közepette kell eredményorientáltan működtetni. A velük szemben támasztott technológiai kihívásokon túl rendkívül összetett termékvariáns elvárásoknak is meg kell felelniük, továbbá a vevői igények alapján az egyedi termékek tömeggyártására - „*mass customisation*” - kell berendezkedniük.

Az elmúlt évek válsága is nagy valószínűséggel korszakváltás kezdetét jelzi, amikor jó néhány korábban bevált paradigmáról le kell majd mondani, és számos, ma nagyon jelentős szerepet játszó technológia innovációja is sürgetővé válik.

A változó piacok ellen a termékek növekvő egységisével próbálnak a vállalatok ellenhatást gyakorolni. Az innovációkat mind rövidebb időközökben integrálják a termékekbe és dobják piacra. Az életciklus rövidülését az alábbi szempontok is alátámasztják:

- A 25%-kal, márkánként nyolc modellre megnövekedett kínálat spektrum mellett a jármű-gyártásban a modellsiklusok az elmúlt 20 évben megközelítőleg 4 évre rövidültek.
- A 80-as évek végén a Mercedes gyártócsoportjánál 0,9 új termék bevezetés jutott egy évre, ez jelenleg átlagosan évi 2,5 termékbevezetésre emelkedett.
- Az innovációt és technikai fejlesztést piaci versenyelőnyként értékelik. A jármű-generációk ehhez kapcsolódó gyors cseréje az új termék bevezetések gyakoriság növekedéséhez vezet a járműiparban.

Az OEM-ek (Original Equipment Manufacturer) saját gyártásának aránya 2015-ig tovább fog csökkenni a mostani 35%-ról 20%-ra. Ez a járműipar további strukturális átalakulásához vezet.

A rövidebb termék életciklusból, a növekvő variánsok számából fakadó jelentős komplexitás bővülés a termelő rendszerek számára jelentős kihívást eredményez a rugalmasság és a termelékenység területén [2][6][35][23].

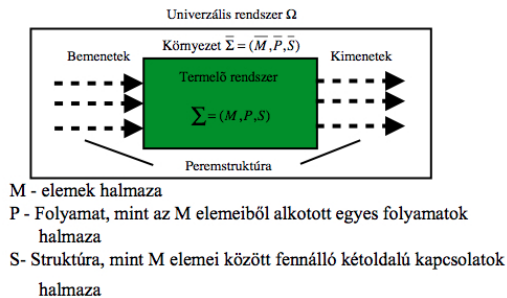
Olyan termék előállítási folyamat koncepció alkalmazása a cél, amely képes a vállalat termelő erőforrásait lehetőségek szerint legrugalmasabban az aktuális igényekre gyorsan reagálva hatékonyan kielégíteni.

A termék életciklus változásából a tervezési idők megrovidülése is következik, így a termelő- és az azokat ellátó rendszerek számára új követelmények keletkeznek. A klasszikus tervezéshez képest az alábbi különbségek állapíthatóak meg:

- A tervezés többé nem projekthez kötöten történik, hanem mindennaposan ismétlődő javító, reaktív folyamat.
- A tervezés felöleli a teljes értékalkotási láncot, és igények szerint dinamikusan változó szervezeti sturktúrákon alapul. Az eljárásoknak meg kell felelniük a vállalatot átfogó többszereplős párhuzamos termelés- és ellátástervezési feladatok kihívásainak.
- A megcélzott hierarchia nélküli rendszerhez részvételen alapuló tervezési eljárásokat célszerű előnyben részesíteni, az adott szakterülethez nem értő partnerek részvételét is figyelembe véve.
- A hálózatok nagy dinamikája többek között rugalmas kapacitásokat igényel. Ez azt jelenti, hogy különböző tervezési- és ellátási koncepcióknak kell rendelkezésre állniuk, amelyek dinamikusan illeszthetőek. A megközelítés olyan tárgyteret igényel, amely lehetővé teszi annak igények szerinti alakítását.

A klasszikus tervezési megközelítések ezzel szemben hierarchikus struktúrákat feltételeznek, és hosszú távon közel állandó termelési rendszerekből indulnak ki. Így a fenti követelményeknek a jelenlegi termelési és ellátó rendszerek tervezésére szolgáló koncepciók csak részben, statikusan tesznek eleget. Az igény ma ezen termékelőállítási folyamatok tervezésének dinamizálása, változó elvárások szerinti analízis lehetőségét figyelembe véve.

Rendszerelméletileg a termelési rendszer általános leírását az 1. ábra szemlélteti. A termelő rendszer környezetéhez bemenetei és kibocsátásai révén kapcsolódik. Ezek alapján határozhatóak meg a rendszer feladatai és céljai.



1. ábra. Termelő rendszer és kapcsolódása a környezetéhez [2]

Egy termelési rendszer teljesítő képességét alapvetően négy egymástól független céldimenzió határozza meg - 2. ábra. Ez a négy dimenzió - a variabilitás, minőség, sebesség és gazdaságosság - általánosságban egy termelési rendszerre érvényes célrendszert alkot. Minden egyes céldimenzióhoz hozzárendelhető néhány tipikus rész-cél, amelyek a közöttük fennálló kölcsönös összefüggések révén a termelés célrendszerét és ezzel a gyár céljait is alkotják. A négy céldimenzióhoz kapcsolt termelési célok a megvalósítás során függetlenek egymástól, és ellentétesek is lehetnek egymással. Kölcsönösen nem fejezhetőek ki egymással, azaz az egyik dimenzióhoz rendelt célok nem vezethetőek vissza, illetve nem helyettesíthetőek másik dimenzió céljaival.



2. ábra. A termelés négy céldimenziója [5]

A termelés-tervezés és -irányítás a termékfajta számának bővülésével vált szükségessé, a megrendelések végrehajtási folyamatának uralhatósága érdekében. Feladata, hogy a futó termelési programot rendszeres időközönként több tervezési periódusra termékfajta és mennyiségek szerint előre tervezze, valamint a rendelkezésre álló vagy szükséges kapacitásokat biztosítsa.

A termelés-tervezési feladat megoldása során alkalmazható eljárások és eszközök egy csoportosítását ismerteti az 1. táblázat, jól érzékelhető ezen technikák sokrétűsége. Elvárásorientált egymáshoz rendelésük, illetve együtt használatuk komoly elméleti háttérrel feltételez a termelés tervezési folyamatok kialakításakor [36][6][4][35][34][18][17][30][19][16][22][14][24][31].

A 3. ábra ismerteti, hogy adott feladatok és tervezési célok milyen változatos és esetenként mennyire összetett problémaköröket érintenek, amelyekre kellően rugalmas, lehetőleg proaktív tervezési folyamatnak kell megoldást adnia. Például az üzem belüli anyagmozgatási folyamatok szimulációja kevesebb, míg a szerelősor ütemezése hat problémakört is érint, miközben a vizsgálatok céljai is rendre változnak.

Termeléstervezési szabályok, elvek	Matematikai modellek, metódusok	Informatikai eszközök
<ul style="list-style-type: none"> • MRP • JIT • Kanban • Lean • TQM • Variabilitás kezelés • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Analitikus módszerek • Evolúciós eljárások • Heurisztikák • Irányítástechnika • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Excel • Adatbázis kezelők • CAD/CAM/CIM • FEM • Termelés szimuláció • <i>Enterprise Resource Planning</i>, ERP • <i>Advanced Planning and Scheduling</i>, APS • ...
DIGITÁLIS GYÁR		

1. táblázat. A termeléstervezési feladat megoldásának eljárásai és eszközei

A táblázat mellett feltüntetett ábrák szemléltetik az egyes feladatok megoldásait.

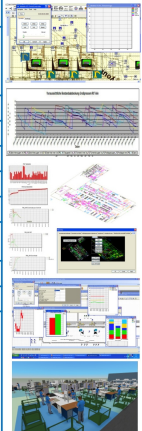
A termeléstervezés kihívásainak megválaszolására számos új megközelítést is elemzett az elmúlt években a szakirodalom. Ezek közül az egyik megoldási elv a holonikus gyártás, amelyet önálló modulok és azok elosztott irányítása alkot. Van Brussel és társai által javasolt holonikus gyártási rendszer referencia architektúráját ismerteti a 4. ábra [10]. A javasolt rendszer három alapértelmezett ügynököt definiál: feladat ügynök, termék ügynök, és erőforrás ügynök. Mindegyik ügynök a termelésirányítás egy bizonyos területéért felelős, legyen szó logisztikáról, technológiai tervezésről, vagy erőforrás kapacitásról. Az alapértelmezett ügynökök objektum orientált megközelítés szerint szerveződnek, amely lehetővé teszi a központosított algoritmusok és az öröklődés beépítését.

A holonikus gyártási rendszer magába foglalja a gyártáshoz kapcsolódó teljes tevékenységi kört, ezzel biztosítva a termelő rendszer rugalmasságát. A kulcsfontosságú elemek önálló és együttműködő tulajdonságokkal is bírnak. A referencia rendszer ügynökei a hozzájuk tartozó adatok és funkciók - például *ütemező()* funkció - révén kommunikálnak egymással, és hozzák meg önállóan és együttműködve a gyártás végrehajtásához szükséges döntéseket.

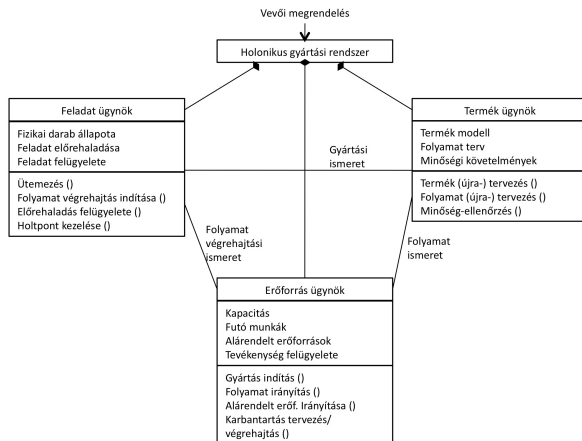
A szakirodalom alapján a holonikus gyártási rendszerek esetében külön figyelmet érdemel az egyes gyártási feladatok bennragadási lehetősége, elképzelhető, hogy valamely megrendelés gyártása nem fejeződik be [10][37][25][1][26][13].

Az értékteremtési folyamat szemlélet eltekint a teljes részletességtől a termékek

Feladatok				
Problémakörök	Új termelés-irányítási elv bevezetése és ellátási folyamatok	Inhomogén gyártástechnológia termelésstervezése	Üzemen belüli anyagmozgatási folyamatok szimulációja	Szerelősor ütemezése
Készletkezelés	x	x		x
Termelési program	x	x		x
Felrakási program				x
Termelés ellátás	x	x		x
Áruátvétel			x	
Üzemen belüli anyagmozgatás	x		x	
Sorkiegyenlítés				x
Műveletkiosztás				x
Modellezés célja	Új termelésirányítási rendszer Készletcsökkentés	Termelési rendszer kapacitáskihhasználásának növelése Biztonságos készletellátás a rendelkezésre álló terület korlátait figyelembe véve	Komplex üzemen belüli anyagmozgatási rendszer elemzési, tervezési lehetőségeinek megteremtése	Felrakási program optimalizálására alkalmas modell Műveletkiosztást, sorkiegyenlítést támogató tervezésköz Termelésközi készlet csökkentése



3. ábra. Példák termelésstervezési feladatok és célok változatosságára



4. ábra. Holonikus gyártási rendszer referencia architektúrája [10]

és folyamataik leírásakor, a termelő környezetek ennek ellenére nagyban különböznek a folyamat struktúrájukat tekintve, amely leírja az anyag áramlását az üzemen belül. Hayes és Wheelwright folyamat struktúrájuk alapján a termelési rendszereket négy kategóriába sorolja, amelyeket a következőképpen lehet összegezni: műhelyszerű gyártás, szakaszolt gyártósor, folyamatos gyártósor, folyamatos áramlású folyamatok.

Nagysorozat- és tömeggyártás esetén a folyamatos gyártósor a legalkalmasabb termelési forma, melyet másnéven *flow shop* rendszerként is jelöl az irodalom. A kutatómunka során ezzel a termelési környezettel foglalkoztam [35][3][36][20][32][9][11][12].

A *flow shop* termelési környezet feladatai közül a szakirodalomban az ütemezési probléma az egyik legelterjedtebb. A *flow shop* ütemezési probléma esetén n feladatot, munkát $(1, \dots, n)$ kell elvégezni m gépen $(1, \dots, m)$. Az egyes gépeken elvégzendő feladatok műveleti idejeit jelölje $\tau_{k,j}$, ahol $k = (1, \dots, m)$ és $j = (1, \dots, n)$, ezek az időértékek rögzítettek, előre ismertek és nem negatívak. Ennek a problémakörnek az általánosan elfogadott feltételezései a következők [29][27][8]:

1. Minden egyes feladatot egyidejűleg kizárólag csak egy gépen lehet végrehajtani.
2. Minden egyes gép egyidejűleg csak egy feladaton dolgozhat.
3. Végrehajtás megszakítás nem engedélyezett.
4. Minden feladat független egymástól, és rendelkezésre állnak a végrehajtásra a 0 időpillanatban.
5. A feladatok beállítási idejei a gépeken elhanyagolhatóak, így figyelmen kívül hagyhatóak.
6. A gépek folyamatosan rendelkezésre állnak.
7. A folyamat közbeni tárolás engedélyezett. Amennyiben a feladat által következőként igénybe veendő gép még nem áll rendelkezésre, akkor a feladat várakozhat és a géphez tartozó várakozó sorhoz csatlakozik.

A problémakör célja, hogy találjunk egy olyan sorrendet a feladatok számára a gépeken, amely az adott kritériumok szerint optimalizált. Az irodalomban a leggyakoribb kritérium a teljes átfutási idő (C_{max}) minimalizálása.

Bár a *flow shop* ütemezési probléma optimumig megoldható polinom időben $m = 2$ esetén [15]. Általában $(n!)^m$ ütemezési lehetőséget kell figyelembe venni

[27]. Ez az oka annak, hogy a szakirodalomban a probléma korlátozott. A feladatok nem előzhetik meg egymást, azaz a munkák végrehajtási sorrendje azonos az összes gépen. Ezt a feladatkört permutációs *flow shop* problémaként ismerik, és $F/permu/C_{max}$ -ként jelölik, továbbiakban PFSP. Ebben az esetben "csak" $n!$ ütemezési lehetőséget kell vizsgálni. A disszertáció az utóbbi típusú környezetre koncentrálna.

Ezek alapján a kutatási munka célkitűzései a következők:

- A PFSP probléma megoldására optimalizáló algoritmusok elemzése szimulációs eszközzel.
- Tervezési szimulációs rendszerben új, bonyolult matematikai optimalizáció létrehozása.
- A PFSP probléma kiválasztott megoldási algoritmusának továbbfejlesztése és átvitele a szimulációs rendszerbe.
- Ipari gyakorlatban működőképes elosztott irányítású termelésütemezési elv kidolgozása.

2. A kutatás során alkalmazott módszerek összefoglalása

A kutatómunka során az első lépést a témához kapcsolódó szakirodalom áttekintése jelentette. A problémakörhöz kapcsolódó irodalom mélyebb tanulmányozásában számos hazai és nemzetközi szakkönyv, valamint az EISZ - Science Direct elektronikus adatbázis nyújtott hathatós segítséget.

A publikációk feldolgozása során jutottam el a kiválasztott problémakör pontos értelmezéséhez, feltételrendszerének tisztázásához. A permutációs *flow shop* probléma megoldási módszereire tett szakirodalmi javaslatok és kiértékelések alapján kerültek kiválasztásra a kutató munka során továbbfejlesztett algoritmusok.

A szakirodalmi elemzések alapján a Taillard féle elméleti tesztfeladat készletet választottam az elemzések végrehajtási alapjául[33]. Az elméleti tesztfeladatokon történő munka mellett a fejlesztő munka során élő ipari termelési környezet alapján definiált feladaton és alapadatokon is sor került az analízisek végrehajtására. A disszertációban vizsgált feladatkészletek paraméterei a 2. táblázat szerintiék voltak, ezeket a dolgozatban részletesen bemutatom.

Az elméleti feladatkészlet kiértékeléséhez a specifikáció által tartalmazott eddig elért legjobb eredmények szolgálták összehasonlítási alapul. A fejlesztett és elemzett

	Elméleti készlet	Ipari feladat
Gépek száma [M]	5, 10, 20	57
Munkák száma [J]	20, 50, 100, 200, 500	40, 227
Műveleti idők [$\tau_{k,j}$]	10 készlet minden gép-munkaszám kombinációhoz	Valós megmunkálási idők
Viszonyítási alap	Eddig elért minimum (szakirodalom)	Kiinduló program átfutási ideje
Minősítő jellemzők	RPD, gépi futási idő	

2. táblázat. Elméleti és ipari tesztfeladatkészletek paraméterei

eljárások által elért átfutási idő eredmények és a készlet által tartalmazott eddigi legjobb érték alapján kerül meghatározásra a relatív százalékos eltérés minősítő jellemző (RPD), melyet az 1. egyenlet ismertet. Az ipari feladat esetében a kiindulási felrakási program által eredményezett átfutási idő képezi a relatív százalékos eltérés jellemző számítási alapját.

$$RPD = \frac{\text{Futtatási eredmény} - \text{Készlet min}}{\text{Készlet min}} \cdot 100 \quad (1)$$

A vizsgált feladat NP teljes - polinom időben nem megoldható nemdeterminisztikusan polinomiális feladat -, melynek megoldására evolúciós és heurisztikus módszerek alkalmasak [7][37]. Olyan eljárásokat kerestem a szakirodalomban, amelyek a legpontosabbak, rekonstruálhatóak és implementálhatóak, továbbá a gyakorlatban kivitelezhetőek. Az optimalizációs módszereket az irodalomkutatás alapján a *state of the art* eljárások közül választottam ki, és fejlesztettem tovább.

- *Genetikus algoritmus*: egyike a legismertebb evolúciós eljárásoknak, rekombinációs operátorainak beállítási lehetősége feladatorientált hangolást tesz lehetővé.
- *NEH heurisztika*: az eljárás "réginek" mondható, de bizonyítottan és összehasonlíthatóan nagyon pontos eredményt ad [21].
- *IGA módszer*: a NEH eljáráshoz hasonlóan konstruktív heurisztika, amely a konstruktív és destruktív fázisai mellett lokális keresés műveleti szakaszt is tartalmaz, iteratívan közelítve az optimális megoldáshoz [28].

A kiválasztott optimalizálási módszerek implementálására és a kísérleti futtatások végrehajtására a termelési folyamatok modellezésére és időben dinamikus szimuláció-

jára kifejlesztett Plant Simulation programcsomag szolgált. A szimulációs modellépítés és dinamikus szimuláció és viselkedéselemzés a legkorszerűbb tervezési eljárás a termelésstervezés területén. Ebben az eseményvezérelt és teljesen objektumorientált környezetben építettem fel az elméleti és ipari termelési struktúra modelljét, majd elvégeztem az optimalizálási eljárások programozási implementációját. A szimulációs futtatások során rögzített eredmények kiértékelése minősítette a kutatás során elemzett megoldási eljárásokat.

A következő fejezet ismerteti az új tudományos eredményeket. A tézisek címe vastagon szedett, utal a tézis által érintett tématerületre és az újonnan elért eredményekre. A kimondott tézisek dőlt betűvel szedve olvashatóak, a magyarázó szöveg normál betűvel került szedésre, egy-egy tézishez ábra, illetve táblázat is tartozhat.

3. Új tudományos eredmények

1 Tézis

Új heurisztikus algoritmus fejlesztése és annak szimulációs analízise a PFSP feladat megoldására.

1.1. tézis. *NEH elven alapuló új, javított heurisztikus algoritmust dolgoztam ki a PFSP feladat megoldására, amely a létrehozandó termékfajták gyártási sorrendjének megállapításakor figyelembe veszi a termékfajták páronkénti átfutási idejének sorrendet befolyásoló hatásait.*

Elkészítettem a kidolgozott új algoritmus, továbbiakban PNEH, implementációját a Plant Simulation szimulációs környezetben, valamint végrehajtottam a tesztfeladatokon a saját NEH és PNEH eszközök analízisét.

1.2. tézis. *A szimulációs elemzés alapján megállapítottam, hogy az általam újonnan fejlesztett PNEH heurisztikus algoritmus alacsony munkaszámokkal pontosabb eredményt ad mindegyik vizsgált gépszámosság esetén, mint az irodalom alapján implementált NEH algoritmus.*

Az első tézisben megfogalmazott eredményekhez a következő publikációk kapcsolódnak: [J2],[J12],[J13],[J14],[J16],[J17],[J18]

2 Tézis

Tervezési szimulációs rendszerben új egységes környezet létrehozása, amely lehetővé teszi a PFSP ütemezési feladat eltérő elveken alapuló megoldó módszereinek összehasonlítását és az adott feladatpéldányhoz leginkább illő megoldó kiválasztását.

2.1. tézis. *Indikátorok létrehozásával meghatároztam azt a szempontrendszert, amelynek segítségével a tervezési feladat és cél szerint kiválasztható a PFSP megoldására alkalmazandó kedvező matematikai eljárás, valamint szimulációs optimalizáló eszköz.*

A Plant Simulation szimulációs szoftver tartalmaz egy igen fejlett beépített genetikus algoritmus elven működő optimalizációs eszközt, továbbiakban TGA, amelynek konfigurációjához számos operátorbeállítási kísérletet végeztem. A legmegfelelőbb eredményt nyújtó paraméter készletet alkalmaztam referenciaként. A TGA eszközt úgy tekintettem, mint a jelenleg elérhető technológiai *state of the art*, a további módszerek teljesítményét ennek optimalizált referencia eredményeihez hasonlítottam.

Kutatási munkám alapján rámutattam, hogy a PFSP feladat megoldására a leginkább alkalmas eljárásnak az evolúciós genetikus algoritmus mellett a NEH és az IGA heurisztikák bizonyulnak. Ezen metódusok Plant Simulation-beli pszeudokódját, szimulációs környezetbeli implementációját, a futtatási eredményekkel együtt a disszertáció tartalmazza.

Az indikátorok megállapításakor a pontosság esetében az elméleti feladatokon elért pontossági, korábban definiált RPD, értékeket hasonlítottam a TGA pontosságához. A 3.,4. táblázatban szereplő százalékos értékek az arányszámok átlagát mutatják az eljárások esetében. A pontosság, illetve a számítási időigény alapján meghatározott indikátor esetében a pontosság mellett a TGA algoritmus beálláshoz szükséges ideje a viszonyítás alapja. A táblázatok szempontrendszert nyújtanak arra, hogy adott feladat megoldására melyik algoritmust célszerű választani.

A kis és közepes méretű minták futtatási eredményeit összegzi a 3. táblázat. Az eredmények alapján megállapítható, hogy:

- a pontosság elsőrendűsége esetén, az IGA eljárás alkalmazása a célszerű,
- a számítási időigény tekintetében a NEH eljárás ajánlott,

- mindkét szempont tekintetében az újonnan fejlesztett PNEH eljárás kiegyensúlyozott teljesítményt nyújt.

A futási idő alapján történő választás az ipari gyakorlatban előforduló rövid - sok esetben tíz perces - időtartam alatti döntéshozatal esetében kap kizárólagos szerepet. A hosszabb időigényű eljárások pontosabb eredményt nyújtanak, létjogosultságuk a heti termelési programok összeállításában van. A számítógépes hardver eszközök fokozatos teljesítménynövekedése lehetővé teszi a jelenleg hosszabb időigényű megoldási eljárások napi szintű alkalmazássalá válását.

Pontosság (<i>Ind</i>)		Futási időigény	
IGA	27,3 %	NEH	6,7 %
Új PNEH	68,7 %	Új PNEH	20,5 %
NEH	69,4 %	TGA	100 %
TGA	100 %	IGA	1197 %

3. táblázat. A szimulációs optimalizáló eszközöket jellemző indikátorok

A 3 táblázatban alkalmazott színjelölések az alábbi jelentéssel bírnak:

- Technológiai *state of the art* része
- Saját implementált eszköz az irodalom alapján
- Saját fejlesztésű és implementációjú eszköz

2.2. tézis. *Részletes kísérletek alapján megállapítottam, hogy az általam létrehozott új heurisztika jó kompromisszumot ad a megoldás minősége és a számításigény tekintetében.*

Kis méretű feladatok esetében a tesztkészlet alapján megállapított eredményeket a 4. táblázat ismerteti. A feladatok méretére jellemző, hogy öt, tíz, húsz gépből álló rendszerek mintegy húsz különböző terméket gyártanak a vizsgált időintervallumban. A táblázat eredményei a pontossági mérőszámok és a számítási időigény mérőszámösszegeinek átlagértékét mutatja, az elemzés alapján megállapítható, hogy a specifikus feladatok esetében a két szempont együttes figyelembe vételével az újonnan fejlesztett PNEH eljárás biztosítja a legjobb eredményt.

Kutatási munkám során kidolgozásra került egy a modellező szoftveren kívüli optimalizáló megoldás, amely jól definiált feladat esetében a termelés indítása előtti, illetve zavar esetén azonnali reakciót tesz lehetővé a tervezés számára. A kísérletek

Optimalizációs eszköz	Pontosság és futási időigény
Új PNEH	68 %
NEH	71 %
TGA	100 %
IGA	167 %

4. táblázat. Optimalizáló eljárások rangsora a kis méretű tesztkészlet eredményei alapján

alapján igazoltam, hogy az optimalizáció ideje ezred részére is csökkenthető az eljárás segítségével. Ez a fejlesztés az implementált eljárások ipari környezetbe történő beillesztését gyorsíthatja meg, javítva az optimalizációt és az elért értékeket. A termelő rendszer struktúrájában, valamint a termékösszetételben bekövetkező változások esetében az eljárás további fejlesztési munkát igényel.

A második tézisben megfogalmazott eredményekhez a következő publikációk kapcsolódnak: [J17],[J18],[J19],[J20],[J21],[J22]

3 Tézis

Termelésütemezési probléma megoldása holonikus megközelítéssel

Létrehoztam egy kisszerűs sajtoló-gyártósor elosztott irányítású termelésütemezési elvét, amely az ipari gyakorlatban működve többek között a teljesség, ellentmondás mentesség, deadlock mentesség rendszerszintű tulajdonságok teljesülését garantálja.

A termelési feladat egy kisszerűs sajtoló-gyártósort érintett, amelynek rendkívül változatos technológiai üzemeltetési lehetőségei álltak a tervezők rendelkezésére. Az előállított mintegy harminc különböző végtermék összetettsége és geometriai mérete is széles skálán változott. A komplexebb összetételű darabok esetében több sajtológép típus is szerepet kapott a résztételek kialakításában, majd az egyes lemezalkatrészek összeállítása több technológiai lépésben következett. A technológiai sokféleséget jellemzi a tizennégy különböző technológia együttműködése a gyártási folyamatban.

A gyártási struktúra finomprogramozásának egyik fő sajátossága, hogy a gyártandó termékskálából az egy heti termelési tervet a vevői igények alapján kell oly módon kialakítani, hogy az egyes erőforrásokon gyártandó konkrét termékek a technológiai kötöttségek figyelembe vételével lokális döntés alapján kerülnek meghatározásra.

A technológiai különbségek között szerepelnek többutas termékek, amelyek egy erőforrást többször vesznek igénybe a technológiai műveletek száma miatt, továbbá a sajtolási műveletsorba eltérő technológiai lépés ütemezése szükséges, melynek elvégzését követően az adott termék sajtolási műveletsora folytatható.

A holonikus gyártási rendszer termék, feladat és erőforrás ügynökei a 4. ábrán ismertetett és a disszertációban részletezett adatok és funkciók alkalmazásával hozzák létre az egy hétre vonatkozó gyártási finomprogramot fél műszak részletességgel.

A feladat ügynök ütemezés funkciója az általa képviselt termék kész állapotú készletét és a vevői igények alakulását veszi alapul a készlet lefedettség meghatározásához. Az ütemezési elv a késztermékek mennyiségét igyekszik a termékenként meghatározott alsó és felső határ között tartani, miközben a kapacitások révén a gyártási erőforrások kihasználtságát is igyekszik biztosítani. A nagyobb vevői kereslettel rendelkező feladatok előbb kerülnek gyártásra, a visszasorolandó feladat készletlefedettsége a köztes művelet időszükséglete miatt tovább csökken, ezáltal jó prioritással rendelkezik az erőforrás előtti feladatsorban. Az erőforrásokhoz érkező feladatok prioritási sorrendje minden tervezési intervallumban újra meghatározásra kerül. Az ütemezés összetettségét növeli, hogy a kisebb gyártási kapacitással rendelkező termékek prioritás értéke is jó pozíciót képes biztosítani az adott feladat számára, ezért szükséges az összes gyártási feladat végrehajtásának globális garantálása.

Az ütemezési elv a holonok végrehajtó eszközei, funkciói, érzékelői, kommunikációs eszközei segítségével biztosítja az ellentmondás mentesség, *deadlock* mentesség, robusztusság rendszertulajdonságokat.

A tervező eszköz 60 nap előrelátást biztosít a gyártástervezés számára a termékek készletalakulására vonatkozóan, egyúttal a lehetőségek alapján üresjáratot is tervez karbantartási, illetve egyéb célokra. A készletbiztonság grafikus megjelenítése a készletkorlátok betartását, az esetlegesen fellépő szűk keresztmetszeteket előre jelzi, melyek így a megfelelő beavatkozással időben elkerülhetőek. Az ütemezés globális biztonságát az ütemezési szabályrendszer, valamint a kézi beavatkozási módok együtt garantálják.

A harmadik tézisben megfogalmazott eredményekhez a következő publikációk kapcsolódnak: [J1],[J3],[J4],[J5],[J6],[J7],[J8],[J10]

4 Tézis

Integrált ipari transzport folyamat modelljének létrehozása

Létrehoztam egy sztochasztikus tényezők által befolyásolt, adaptív viselkedésű, dinamikus hálózatként működő integrált ipari transzport folyamat modelljét és annak konfigurációs paraméterkészletek és lokális döntési szabályrendszerek alapján működő megoldó eszközét.

A vizsgált rendszer meglehetősen összetett, a termeléshez szükséges napi több ezer rakat mennyiségű áruforgalom közúti és vasúti szállítóeszközökön érkezik a gyár területére. A két beérkezési pontról történik meg az egyes termelőterületek anyagellátása, amelyet belső szerelvények közlekedtetésével valósítanak meg.

Számos sztochasztikus tényező gyakorol hatást a transzport folyamatra. A közúti és vasúti járművek érkezési időközei, a beszállított rakományok mennyisége, összetétele, az átvételei folyamat egyes műveleteinek időszükséglete, szériaraktári eszközök rendelkezésre állása, göngyöleg keletkezés mind a rendszer terhelésingadozását befolyásolják.

A platós kocsiból összeállított szerelvényeket vontató járművek juttatják el a célállomásaikra, amelyet minden esetben a rakomány határoz meg. A közúti, illetve a vasúti áruátvételi területről hat gyárterület irányában történik anyagáramlás, továbbá mindegyik területen az ott keletkezett göngyöleg elszállítását is végre kell hajtani.

A belső anyagmozgatás gyűrű struktúrájú, amelyen kitérő szakaszok és offline - a szállító kocsi mozgását hosszabb, ingadozó időtartamra megszakító - állomások helyezkednek el. A rendszer adaptív viselkedésű, a mindenkor termelési feladat anyagszükségletét kell ellátnia úgy, hogy az üzemet több önálló gyár alkotja. A belső anyagmozgatási útvonalak egy vizsgált tervezési időszakon belül is eltérőek lehetnek, dinamikusan változó hálózatot alkotnak.

Míndeközben a vontató eszközök száma korlátozott és egyértelműen áruátvételi területhez rendeltek, míg az általuk továbbított platós kocsik szerelvények függetlenek a területektől.

A tervezőeszköznek többek között az alábbi jellemzőket kellett meghatározni tudni: körjáratok rakományfüggő variáció elemzése; vontatók ciklusideje; platós szerelvények kihasználtsága; platós kocsik elégséges száma; várakozási idők különböző állapotokban;

Alapjellelmzők		Paraméterek		Változók	
w	áruátvételi területek $w \in W$	η_z	gépi erőforrások rendelkezésre állása	X_{wi}	szériaraktári területekre szállítandó árumennyiség
i	szériaraktári területek $i \in I$	m	közúti/vasúti beszállítás aránya	U_{iw}	szériaraktári területeken keletkező elszállítandó göngyöleg mennyisége
j	árúkészlet $j \in J$	v_w	áruátvételi területekhez rendelt vontatók száma	k	rendelkezésre álló/szükséges vontatott kocsik száma
t	tervezési periódus $t \in T$	h_j	beérkező szállítmányok homogenitása szériaraktárak alapján		
z	folyamatban érintett erőforrások $z \in Z$	q_{zw}	áruátvételi csoportok száma		
b	logisztikai tevékenység $b \in B$	c_{wi}	fajlagos szállítási költség relációnként		
		φ_w	áruátvételi fajlagos költség		
		c_i	szériaraktári átvételi területek kapacitása		
		c_w	áruátvételi területek kapacitása		
		ρ_i	szériaraktári folyamatok fajlagos költségei		
		c_z	erőforrások kapacitása		
		$c_{vü}$	vontatók üresjáratú költsége		

5. táblázat. A modell által figyelembe vett tényezők

rendszer viselkedése változó terhelések mellett pl.: termelési volumen, műszakrendváltások, szállítóeszközök forgalmi megoszlása.

A probléma megoldására a rendszer viselkedését hűen leképező modellt dolgoztam ki. A modell segítségével a tervezési időszakra érvényes, az üzemen belüli gyárat kiszolgáló belső anyagmozgatási feladatok hatékony ellátásához szükséges eszközök mennyisége, azok irányítási stratégiája, valamint számos rendszerjellemező meghatározható a paraméter tartományok elemzésével. A paraméter tartományok és korlátozó feltételek alapján modellkonfigurációs készletek kidolgozása, továbbá a rendszerben biztosított lokális döntési szabályok, mint például a dinamikus útvonal-meghatározás, megadása szükséges. A modell segítségével a különböző beállítási

módok, konfigurációs készletek hatása vizsgálható, a terhelés függvényében a legmegfelelőbb paraméter és szabálykombináció meghatározható.

A negyedik tézisben megfogalmazott eredményekhez a következő publikációk kapcsolódnak: [J7],[J9],[J11],[J15]

4. A kutatásból levonható következtetések

Ipari rendszerek dinamikus vizsgálatában a termelés szimuláció kiemelt fontosságú. Az optimalizáló eszközök ipari környezetben történő alkalmazása az elméleti teszt-készlet és az ipari feladatok eredményeit, a futtatási időket figyelembe véve szimulációs eszközön belül és kívül végrehajtott optimalizációval is megvalósítható. A kutatás a szimulációval támogatott PFSP termelés optimalizáció megoldására szolgáló eljárások fejlesztésén túl feladat és célorientált eszközválasztást támogató eredményt is létrehozott.

A kutatás eredményei alapján végrehajtott optimalizálással elérhető kizozatal növekedés az ipari gyakorlat visszajelzése szerint 2-10 % között mozog.

A kutatómunka számára további fejlesztési területet az összetett célfüggvényű termelési rendszerek szimulációval támogatott optimalizációja, valamint az elvégzett vizsgálatok alapján a termékfajtánkénti mennyiségek eljárások teljesítőképességét befolyásoló hatásainak vizsgálata jelentheti.

A szimuláción kívül végrehajtott optimalizáció az elérhető eredményjavulás és jóval gyorsabb lefutáson túl lehetőséget nyit a többprocesszoros informatikai eszközök kihasználására.

Hivatkozások

- [1] J. Váncza L. Monostori A. Márkus, T.Kis. A market approach to holonic manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 45:433–436, 1996.
- [2] Jörg Ackermann. Modellierung, planung und gestaltung der logistikstrukturen kompetenzellenbasierter netze. *Wissenschaftliche Schriftenreihe Heft 59*, Institut für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, September 2007.
- [3] Knut Alick. *Planung und Betrieb von Logistiknetzwerken*. Springer Verlag, 2005.
- [4] L. Monostori Y. Suginishi A. Pfeiffer Y. Nonaka B. Kádár, A. Lengyel. Enhanced control of complex production structures by tight coupling of the digital and the physical worlds. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59:437–440, 2010.
- [5] Klaus Erlach. *Wertstromdesign Der Weg zur schlanken Fabrik*. Springer Verlag, 2007.
- [6] Erdélyi Ferenc. A globális válság néhány technológiai vonatkozása. *Gépgyártás*, 3:13–21, 2009.
- [7] J. Johnson D. S. Sethi R. Garey, M. The complexity of flowshop and jobshop scheduling. *Mathematics of Operations Research*, 1(2):117–129, 1976.

- [8] G. Ioannou G.I. Zobolas, C.D. Tarantilis. Minimizing makespan in permutation flow shop scheduling problems using a hybrid metaheuristic algorithm. *Computers Operations Research*, (36.):1249–1267, 2009.
- [9] J.N. Gupta. A functional heuristic algorithm for the flowshop scheduling problem. *Operational Research Quarterly*, 22:39–47, 1971.
- [10] Paul Valckenaers Luc Bongaerts Patrick Peeters Hendrik Van Brussel, Jo Wyns. Reference architecture for holonic manufacturing systems: Prosa. *Computers in Industry*, 37:255–274, 1998.
- [11] C. Potts I. Osman. Simulated annealing for permutation flow-shop scheduling. *OMEGA, The International Journal of Management Science*, 17:551–557, 1989.
- [12] Xavier Tort-Martorell Imma Ribas, Ramon Companys. Comparing three-step heuristics for the permutation flow shop problem. *Computers Operations Research*, 37:2062–2070, 2010.
- [13] A. Márkus J. Váncza. An agent model for incentive-based production scheduling. *Computers in Industry*, 43:173–187, 2000.
- [14] Jósvai János. Untersuchung von schwingungseffekten in produktionssystemen mit hilfe kontrolltheoretischer methoden. Master’s thesis, Technische Universität Karlsruhe, 2004.
- [15] S. Johnson. Optimal two- and three-stage production schedule with setup times included. *Naval Research Logistics Quarterly* 1, page 61, 1954.
- [16] L. Keviczky. Combined identification and control: Another way. *Control Eng. Practice*, 4(5):685–698, 1996.
- [17] Hetthéssy Jenő-Barta András Bányász Csilla Keviczky László, Bars Ruth. *Szabályozástechnika*. Universitas Győr Kht., 2006.
- [18] Wolfgang Kühn. *Digitale Fabrik, Fabriksimulation für Produktionsplaner*. Carl Hanser Verlag München Wien, 2006.
- [19] B. Kádár-T. Kis A. Kovács A. Pfeiffer J. Váncza L. Monostori, G. Erdős. Digital enterprise solution for integrated production planning and control. *Computers in Industry*, 61:112–126, 2010.
- [20] S. Gundry M. Bonney. Solutions to the constrained flowshop sequencing problem. *Operational Research Quarterly*, 27:869–883, 1976.
- [21] E.E. I. Ham M. Nawaz, Jr. Enscore. A heuristic algorithm for the m-machine, n-job, flowshop sequencing problem. *OMEGA, The International Journal of Management Science*, 11(1):91–95, 1983.
- [22] Egon Müller Michael Schenk, Sigfried Wirth. *Factory Planning Manual, Situation-Driven Production Facility Planning*. Springer Verlag, 2010.
- [23] Peggy Näser. Methode zur entwicklung und kontinuierlichen verbesserung des anlaufmanagements komplexer montagesysteme. Wissenschaftliche Schriftenreihe Heft 56, Institut für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, Juni 2007.
- [24] Armin Scholl Nils Boysen, Malte Fliedner. Assembly line balancing: Which model to use when? *International Journal of Production Economics*, 111:509–528, 2008.
- [25] J. Váncza P. Egri. *Cooperative Planning in the Supply Network - A Multiagent Organization Model*. Springer, 2005.
- [26] Jo Wyns Luc Bongaerts Patric Peeters Paul Valckenaers, Hendrik Van Brussel. Designing holonic manufacturing systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 14:455–464, 1998.
- [27] Concepción Maroto Rubén Ruiz. A comprehensive review and evaluation of permutation flowshop heuristics. *European Journal of Operational Research*, (165):479–494, 2005.
- [28] Thomas Stütze Rubén Ruiz. A simple and effective iterated greedy algorithm for the permutation flowshop problem. *European Journal of Operational Research*, (177):2033–2049, 2007.
- [29] S. Saghaian S. Reza Hejazi. Flowshop-scheduling problems with makespan criterion: a review. *International Journal of Production Research*, 43(14):2895–2929, 15 July 2005.

- [30] Gavriel Salvendy, editor. *Handbook of Industrial Engineering*. John Wiley and Sons, Inc., third edition edition, 2010.
- [31] Günther Schuh. *Produktionsplanung und -steuerung, Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. Springer Verlag, 3. edition, 2006.
- [32] S. Sahni T. Gonzalez. Flowshop and jobshop schedules: Complexity and approximation. *Operation Research*, 20:36–52, 1978.
- [33] E. Taillard. Benchmarks for basic scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, 64:278–285, 1993.
- [34] Koltai Tamás. *A termelésmenedzsment alapjai*. Műegyetemi Kiadó, 2003.
- [35] Mark L. Spearman Wallace J. Hopp. *Factory Physics*. McGraw Hill, third edition edition, 2008.
- [36] Günther Schuh Walter Eversheim, editor. *Produktion und Management, Betriebshütte*. Springer Verlag, 7. edition, 2010.
- [37] Hyun Joong Yoon Douglas H. Norrie Weiming Shen, Qi Hao. Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: An updated review. *Advanced Engineering Informatics*, 20:415–431, 2006.

5. Saját publikációk jegyzéke

- [J1] Dr. Kardos K., Jósvai J., Békési Z.: A gyártási folyamat-szimuláció alkalmazása a kisszériás termelésben gyakorlati példa alapján, A jövő járműve, Vol. 3-4., (2006), 46-47.
- [J2] Jósvai J.: Gyártási folyamatok szimulációja, Tech4Auto Konferencia, Győr, 2006.11.07.
- [J3] Jósvai J., Dr. Kardos K.: Simulation Processes of a Press Line for Short Series Production, microCAD2007, Miskolc, (2007), 93-98.
- [J4] Jósvai J.: Simulation and Production Planning, a Special Case in Short Series Production, Eurosim2007 Conference, Ljubljana, (2007)
- [J5] Jósvai J.: Gyártási folyamatok szimulációja és optimalizálása, XXVII. Konferencia, Magyar Operációkutatási Társaság, Balatonöszöd, (2007)
- [J6] Dr. Kardos K., Jósvai J.: A gyártási folyamat szimuláció és ütemezési algoritmusok alkalmazása a kisszériás termelésben gyakorlati példa alapján, Műszaki Szemle, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, OGÉT-2008, Brassó, (2008), 187-191.
- [J7] Dr. Kardos K., Jósvai J.: Komplexe Untersuchung der Produktions- und Logistikprozessen, Fraunhofer Workshop, Győr, (2008.09.15-16.)
- [J8] Dr. Kardos K., Jósvai J.: Gyártási és logisztikai folyamat-szimuláció vállalati alkalmazásai, Tech4Auto Konferencia, Győr, (2008.09.24-26.)
- [J9] Dr. Kardos K., Jósvai J.: Termelési rendszerek számítógépes kezelése - gyártási és logisztikai folyamatok tervezése szimulációs eljárással, Gyártástrend, Vol. 4., (2008.09), 36-37.
- [J10] Dr. Kardos K., Horváth G., Jósvai J., Perger J.: Simulation for development and progress at the Audi Hungaria Ltd., Manufacturing 2008 Conference, MTA SZTAKI - Budapest, (2008)
- [J11] Dr. Kardos K., Jósvai J., Perger J.: Planungsmethoden, Anwendungen und Konzeption im Bereich Digitale Fabrik, TBI' 08, IBF TU Chemnitz, (2008)
- [J12] Jósvai J., Dr. Horváth Z., Dr. Kardos K.: Optimisation and Simulation Techniques in the Field of Manufacturing Processes, The Veszprém Optimisation Conference: Advanced Algorithms (VOCAL 2008), University of Pannonia, (2008.12.15-17.), Veszprém
- [J13] Jósvai J.: Production Process Modeling and Planning with Simulation Method, Mounting Process Optimisation, The International Conference on Modeling and Applied Simulation, (2009.09.23-25.), Spain.
- [J14] Jósvai J.: Entwicklung standardisierter Vorgehensweisen der Fabrikplanung mit Anwendung eines Integrationskonzeptes, Pro Motion 2009, (2009.11.02.), Audi Ingolstadt.

- [J15] Dr. Kardos K., Jósvai J.: Termelésirányítás számítógépes kezelése, gyártási és logisztikai folyamatok tervezése szimulációs eljárással, Gyártástrend, (2009.11.), 23-24.
- [J16] Jósvai J.: Methods and Applications in Production Planning using Digital Factory approach, Factory Automation 2010 Konferencia, (2010.04.15-16.), Kecskemét.
- [J17] Jósvai J., Perger J.: Digital Factory, Methods and Applications in Audi Hungaria Motor Ltd., Fisita2010 Conference, (2010.05.30-06.04.), Budapest
- [J18] Jósvai J., Perger J.: Digitális gyár, módszerek és alkalmazások termelési környezetben, A jövő járműve - Fisita 2010 World Congress, 112-119.
- [J19] Jósvai J., Dr. Kardos K.: Integrált termelési rendszerek optimalizálása, a digitális gyár alkalmazási lehetőségei, OGÉT 2010 Konferencia, (2010.04.22-25.), Nagybánya
- [J20] Perger J., Tóth A., Jósvai J.: Digitale Fabrik bei Audi Ungarn, VW Digitale Fabrik KAK Konferenz, (2010.06.10.), Braunschweig
- [J21] Jósvai J., Kardos K.: Lösungsmethoden und Techniken der Reihenfolgeplanung in der Serienfertigung unter Anwendung von Simulation, TBI 2011 Konferenz, (2011.11.23-24.), Chemnitz
- [J22] Jósvai J.: Proaktív termelésütemezési módszerek és ipari alkalmazásaik, Mobilitás és Környezet Konferencia, Magyar Tudományos Akadémia, (2012.01.23.), Budapest