

MISKOLCI EGYETEM DOKTORI (PHD) TÉZISFÜZETEI



HATVANY JÓZSEF INFORMATIKAI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

**ÜTEMEZÉSI MODELL ÉS HEURISZTIKUS MÓDSZEREK
AZ IGÉNY SZERINTI TÖMEGGYÁRTÁS
FINOMPROGRAMOZÁSÁNAK TÁMOGATÁSÁRA**

KÉSZÍTETTE:

KULCSÁR GYULA

OKLEVELES MÉRNÖK-INFORMATIKUS

AKI DOKTORI (PHD) FOKOZAT ELNYERÉSÉRE PÁLYÁZIK

TÉMAVEZETŐ:

DR. ERDÉLYI FERENC

A MŰSZAKI TUDOMÁNY KANDIDÁTUSA

MISKOLC, 2007

TARTALOMJEGYZÉK

Tartalomjegyzék	2
1. Bevezetés.....	3
2. Tudományos előzmények.....	4
3. A kutatás célkitűzése	7
4. Az alkalmazott módszerek és az elvégzett kutatómunka összefoglalása.....	8
5. Új tudományos eredmények.....	12
6. Az eredmények hasznosíthatósága.....	19
7. További kutatási feladatok	20
8. Az értekezés témakörében készített saját publikációk	21
9. Hivatkozott irodalom.....	22
New scientific results.....	28

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a tömeggyártással foglalkozó vállalatok tekintélyes része is kénytelen a vevők igényeinek közvetlen kiszolgálására (pl. tömegcikkek, világítótestek, háztartási gépek, stb. gyártása). A versenyképesség növelése érdekében folyamatosan és rugalmasan alkalmazkodniuk kell a piaci körülmények gyors változásaihoz. Ez megköveteli a gyártási hatékonyság és a szállítókészség egyidejű javítását. Az előbbit például az erőforrások minél jobb kihasználásával, alacsony gyártási költségekkel, az utóbbit jól ütemezett termeléssel, a rendelésre és a raktárra való gyártás kombinálásával lehet elérni. A vállalatok sikeressége számos esetben a megrendelők határidőigényeinek magas szintű kielégítésén múlik. Mindez egyre fontosabbá teszi a hosszú, közép és rövid távú termelésstervezési és -ütemezési feladatok hibátlan megoldását.

A termelés finomprogramozása (folyamatközeli ütemezés) a MES (Manufacturing Execution System) néven ismert gyártásirányítás, rövid távú – esetenként valós idejű – tervezési feladata. Ismertek a termelési rendszer korlátozásai, a véges technológiai kapacitások, a rendelkezésre állások, a műveletek sorrendi előírásai stb. Az ütemezésnél a gyártásra kiadott, belső rendeléseken alapuló munkák és műveletek elvégzéséhez gyártási erőforrásokat (gépek, eszközök stb.) valamint indítási és befejezési időpontokat kell tervezni úgy, hogy a korlátozások teljesüljenek, és a termelés teljesítményét mérő mutatók optimálisak legyenek, azaz a menedzsment magasabb szintjén megfogalmazott célok megvalósuljanak.

A diszkrét termelési folyamatokban a termékek elkészítése gyártási sorozatokban, kötegekben történik. A sorozatok nagysága nagyon változó lehet, egyetlen darabtól (pl. nagy értékű alkatrészek vagy egyedi gépek, berendezések gyártása) több ezer, sőt több millió darab termékig is terjedhet (pl. tömegcikkek, komponensek, alkatrészek tömeggyártása esetén). A diszkrét gyártó-szerelő rendszerekben a műveletek végrehajtása elkülönült gépeken (esetleg kézi munkahelyeken) történik. A gyártási folyamat rendszerint több térben és időben egymás után (sorba) kapcsolt részfolyamatból, műveletből, technológiai lépésekből áll. A műveleteknek és ezek sorrendjének alternatívái is lehetnek. A sorba kapcsolt műveletek száma néhánytól (2-5) akár 100-ig is terjedhet. Tömeggyártásnál nagyszámú termék ugyanazt a technológiai utat járja be. Az ilyen gyártási folyamatot soros felépítésű, folyamszerű „Flow Shop” gyártásnak nevezik.

A soros gyártási struktúrához és homogén technológiai tervekhez kapcsolódó modellben (Flow Shop, FS) a rendelésekben megadott számú munkadarab adott számú különböző gépen, a technológiai sorrendnek megfelelően, egymás után kerül megmunkálásra. Ha megengedett az, hogy az egyes gépeken a munkák sorrendje eltérő legyen, akkor előzéses, ellenkező esetben előzésmentes modelltől van szó. A termelés során tehát munkadarab-sorozatok (kötegek) gyártásáról kell gondoskodni. A

rendelési sorozatok független bemeneti adatok a gyártás számára. A gyártási és logisztikai sorozatnagyságok azonban termelésirányítási döntések tárgyai lehetnek. Az értekezés az igény szerinti tömeggyártás finomprogramozásának támogatására szolgáló számítógépes modellek és ütemezési módszerek továbbfejlesztése terén szándékozik új eredményeket bemutatni.

2. TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK

A „Flow Shop” típusú ütemezési feladatok leírása és a megoldás lehetőségeinek vizsgálata már több mint ötven éves, és napjainkban is számos termelésirányítási és ütemezési tankönyvben vagy monográfiában megtalálható (pl. [25], [72], [34], [23]).

A formális alapmodellben ismert a gépek (erőforrások) halmaza: $M = \{m_j\}$, $j = 1, \dots, m$, $m \in \mathbb{Z}^+$; a munkák halmaza: $J = \{J_i\}$, $i = 1, \dots, n$, $n \in \mathbb{Z}^+$, minden munka sorba kapcsolt műveletekből áll: $O = \{o_{i,j}\}$, minden művelet τ_{ij} időt vesz igénybe, $\tau_{ij} \in \mathbb{R}$. A műveletek homogén sorrendje: $j = 1 \rightarrow 2 \rightarrow \dots \rightarrow m$. A raktárra gyártás (*make to stock*) teljesítményt mérő célfüggvénye legtöbbször a „makespan”: $f = \min[\max(T_{Ci}) - \min(T_{Di})]$, ahol T_{Ci} az i . munka befejezési időpontja, és T_{Di} az i . munka indítási időpontja. Rendelésre gyártás esetén a célfüggvény inkább a késések összes idejének minimalizálása: $f = \min \sum_{i=1}^n \max(0, T_{Ci} - T_{Di})$, ahol T_{Di} az i . munka határideje.

A klasszikus (egyutas, előzésmentes) feladatnak a teljes átfutási idő minimalizálására csak $m \leq 2$ estben, valamint bizonyos megszorításokkal $m = 3$ esetben van polinomiális futási idejű megoldási algoritmus. Ez a nevezetes Johnson algoritmus [45]. Ennek főként elméleti jelentősége van, mert a gyakorlati feladatokban általában $m > 2$. Ezekre az esetekre a feladat NP-nehéz, sőt NP-teljes [37]. Gyors processzorokkal a leszámplálásos triviális tervezési algoritmus előzésmentes esetben kb. $n < 10$ -re ad elfogadható tervezési időt.

Az évek során a különböző méretű és komplexitású FS feladatok megoldására sokféle egzakt módszer, approximáció, heurisztika, metaheurisztika és más alapú megoldás született. Ezekről részletes áttekintést, összefoglalót adnak például a [25], [72], [18], [36], [27] munkák. A weben is számos gyűjtemény található az ütemezési feladatok megoldási algoritmusairól (pl. [29], [60], [26]).

A kutatások egy másik fontos iránya a klasszikus feladat bővítése, kiterjesztése olyan irányokban, ami megfelel a diszkrét gyártásirányítás számítógépes támogatása (MES alkalmazások) növekvő igényeinek. Az alapmodell párhuzamos gépekkel történő kibővítéseként ismert a rugalmas, egyutas (Flexible Flow Shop FFS) modell. Az ilyen modellekben összetett munkahelyek vannak definiálva. Minden egyes munkahelyen adott számú, azonos feladat végrehajtására alkalmas, egymással párhuzamosan működő egyenértékű, részben azonos vagy különböző intenzitás- és

más paraméterértékekkel rendelkező gépek találhatóak. A párhuzamosan működő gépek száma munkahelyenként eltérő lehet. Az egymást követő munkahelyek között átmeneti tárolók kaphatnak helyet. A munkadarabokat minden munkahelyen – annak egy kiválasztott gépén – kell megmunkálni. Ezáltal a modellekben megjelenik a gépválasztás (allokáció) feladata is, ugyanakkor továbbra is alapvető szerepet játszik a munkák gépenkénti sorrendjének és indítási időpontjának meghatározása. Az alap FS feladat ilyen irányú kibővítését Arthanari és Ramamurthy (1971) az elsők között tették meg [22]. Gupta (1988) majd Hoogeveen és társai (1996) különböző FFS feladatokat vizsgálva állapították meg, hogy azok NP-nehéz feladatosztályba tartoznak [39], [41].

A kutatók széles körben, különböző jelzőket használva tárgyalják ezeket a modelleket. Leggyakoribbak a rugalmas (Flexible Flow Shop: FFS), a hibrid (Hybrid Flow Shop: HFS), a párhuzamos gépes (Flow Shop with Paralell Machines: FSPM), az összetett munkahelyes (Multi-Stage Flow Shop: MSFS) és a többgépes (Multiprocessor Flow Shop: MFS vagy Flow Shop with Multiple Processors: FSMP) elnevezésű modellek. Ezek közé sorolhatók még a rugalmas gyártósor (Flexible Flow Line: FFL) néven ismert modellek is. Az ismert modellváltozatokról és megoldási módszerekről különböző szempontok szerint rendszerezett, részletes összefoglalót készített Linn és Zhang (1999) [53], Wang (2005) [74], továbbá Kis és Pesch (2005) [49], valamint Quadt és Kuhn (2007) [61].

A témakörhöz tartozó ismert megoldások többsége optimalizálási kritériumként egyetlen célfüggvényt használ. Ez az esetek többségében (a raktárra történő gyártás alapesetét feltételezve) a megrendelt munkacsoport legkésőbbi befejezési idejének minimalizálását jelenti. Kevesebb megoldási módszer született (a határidőre történő gyártásnak megfelelően) a késésekkel kapcsolatos célfüggvények valamelyikének minimalizálására [54], [75]. A speciális feladatváltozatokra kifejlesztett módszerek alkalmazhatósága más célfüggvényekre erősen korlátozott, részletesebb modellekre pedig még komoly módosításokkal sem igazán alkalmazhatók.

Az egycélú ütemezéshez viszonyítva a több célfüggvény értékének kompromisszumos optimumát biztosító (multi-objective, multi-criteria) megoldások előállítása terén kevesebb kutatási eredmény született. Jellemzően olyan módszerek léteznek, amelyek csak egy elsődleges és egy másodlagos, vagy egy elsődleges és több alacsonyabb prioritású cél elérésére koncentrálnak [46]. Ugyanakkor, az ilyen megoldási módszerek – az ütemezési hatékonyság és a számítási sebesség növelése érdekében alkalmazott heurisztikák miatt – megváltozott célok kezelésére nem vagy csak nehezen alkalmazhatók. Léteznek különböző általános elvek és módszerek többcélú kombinatorikus optimálási feladatok megoldására (pl. [63], [55], [38]), azonban dinamikus rendszerekben, gyakran változó fontosságú célok esetén a bonyolult paraméterezés miatt ezek alkalmazása nehézkes.

A kutatások jelentős része az aktuálisan vizsgált modelltulajdonság kiemelésére helyezi a hangsúlyt, az egyszerűbb kezelhetőség érdekében háttérbe kerülnek az egyéb jellemzők. Az FFS modellekben rendszerint folyamatosan elérhető gépek szerepelnek

(pl. [46], [76], [52], [18]). Kivételnek számító esetekben jelennek csak meg a gépek rendelkezésre állására vonatkozó időbeli korlátozások, és ilyenkor is csak egyéb tényezők egyszerűsítésével, elhagyásával kerülnek bemutatásra. Allaoui és Artiba (2006) például a gépek korlátozott rendelkezésre állását úgy vizsgálták HFS környezetben, hogy modelljükben két munkahelyet definiáltak. Az első munkahelyen csak egyetlen gép, míg a másodikon több párhuzamos gép szerepelt. Szétválasztás és korlátozás alapú megoldási módszert használtak a legkésőbbi befejezési időpont minimalizálására.

A munkák sorrendjétől függő vagy attól független gépbeállítási/átállítási időket figyelembe vevő FFS modelleket és módszereket Allahverdi és társai (1999) [19], (2007) [20] rendszereztek. Azok a megoldási módszerek, amelyek a sorozatnagyságra (a rendelések bontására és/vagy egyesítésére) vonatkozó kérdésekkel is foglalkoznak, rendszerint csak a teljes rendeléscsoport átfutási idejét, vagy a befejezési időpont csökkentését célozzák meg. Jó példák ezekre a Lee és társai (1997) [52], valamint Zdansky és Pozivil (2002) [76] által bemutatott módszerek. A sorozatnagyságok kezelését is tartalmazó ütemezési feladatokról és azok megoldási módszereiről részletes elemzést készített Zhu és Wilhelm (2006) [77].

Az egyik fontos kutatási terület, mely az utóbbi időben hangsúlyt kapott, az előidejű (prediktív) ütemezés és a valós idejű folyamatmenedzsment (Process Management) összehangolása. Ennek az integrációnak több aspektusa is van, például a „bizonytalanságkezelés”, a „kockázatmenedzsment”, a „prioritásmenedzsment”, a „viselkedés alapú termelésirányítás” stb. [67], [58]. A problémakör a gyártásirányítás fontos beavatkozási tevékenységeként kezeli a termelési folyamatok részbeni vagy teljes újraütemezését. A témával kapcsolatos eredményekről, a különböző újraütemezési stratégiákról a [70], [59], és [71] publikációk is beszámolnak.

A kutatók egyetértenek abban, hogy az újraütemezést az eredeti ütemezési feladat jelentős módosításaként kell tekinteni, ahol új korlátozások és új célok jelennek meg. A probléma megoldásterét általában ezek a feltételek szűkítik, de járulékos nehézséget okoznak a speciális gyártásirányítási követelmények (pl. anyagellátási, minőségbiztosítási, logisztikai stabilitási igények) kielégítésének lehetőségei. Fontos új követelményként fogalmazható meg, hogy az alkalmazott modellnek lehetővé kell tenni a gyártásirányító személy (üzemvezető, művezető, üzemmérnök) olyan interaktív ütemezési javaslatainak és döntéseinek beillesztését, amely az eredeti és a járulékos korlátozások és célok kielégítését egyaránt biztosítja. Az újraütemezés speciális igényeivel kapcsolatos összefoglalások találhatók pl. a [62], [24] irodalomban.

Magyarországon a diszkrét gyártási folyamatok modellezése és a gyártási folyamatok ütemezése több évtizede kutatás és fejlesztés tárgya. A műszaki egyetemek (BME, ME) gépgyártástechnológiai és alkalmazott informatikai tanszékei mellett eredményes kutatás-fejlesztés folyik az MTA SZTAKI-ban, és korábban a GTI-ben is. Az ütemezéselmélet témakörében eredményeket publikáltak további egyetemek kutatócsoportjainak, alkalmazott matematika, operációkutatás, informatika

tanszékeinek kutatói is. Példaként említhető meg néhány jellemző eredmény az elmúlt évekből. MTA SZTAKI: [31], [30], [48], [47], [51], [57], [69]; BME: [66], [64], [65]; ME: [35], [42], [67]; ELTE: [73], [68]; SZTE: [17], [43], [44], [43]; PTE: [32], [33]; VE: [40], [56].

Összefoglalva megállapítható, hogy a tématerület jelentős elméleti háttere és a publikációk nagy száma ellenére a jelenleg ismert többgépes termelésütemezési modellek, és azok megoldási módszerei még nem veszik egyszerre figyelembe az igény szerinti tömeggyártás jellegzetességeit: több művelet együttes végrehajtására képes gépeket, technológiaiút-vonal-alternatívákat, gépek változó rendelkezésre állási időintervallumait, gépenként eltérő termelési intenzitásokat és selejtarányokat, sorrendfüggő átállási időket valamint az esetenként gyorsan változó termelési célokat, prioritásokat. Szükség van tehát ezeknek a modelleknek a kiterjesztésére, továbbfejlesztésére és hatékony megoldási módszerek kifejlesztésére, amelyek aztán új, hatékony funkcionális komponensei lehetnek a számítógépes MES alkalmazásoknak.

3. A KUTATÁS CÉLKITŰZÉSE

Napjainkban – a globalizációs kihívásokra válaszolva – számos nagyvállalat egyedi megrendelésekhez, a kereskedelmi és logisztikai központok egyedi igényeihez igazodó tömegtermelést kénytelen folytatni (Customized Mass Production). Az ilyen termelési folyamatok közös jellemzője a terméktulajdonságok, specifikációk, technológiai, valamint erőforrás-alternatívák sokfélesége, a megrendelések változatossága, az igények nehéz előrejelezhetősége, és a vevők kívánságaihoz való (pl. egyedi kiszerezés, szállítási időpontok) magasfokú alkalmazkodás igénye a nagysorozat- és tömeggyártás technológiai körülményei között.

A kutatás alapvető célja az igény szerinti tömeggyártás rövid-távú, műhelyszintű termelésprogramozási feladatának modellezése a gyártási feladatok és sorozatnagyságok meghatározásának, a gépek allokálásának és a munkák időbeli ütemezésének szempontjából. További célja olyan megoldási módszerek és algoritmusok kifejlesztése, amelyek a termelés változó feltételeihez és igényeihez igazodva egy vagy több értelemben optimumközeli, végrehajtható termelési finomprogramot állítanak elő a gyakorlatban elfogadhatónak számító tervezési (futási) időkorlátok betartásával.

A rövid időhorizontú tervezési modell és ütemező egy gyártásirányító (MES) alkalmazás szerves része kell legyen, amelynek támogatnia kell a MES dinamikus gyártásirányító funkcióit is, beleértve a termelési folyamatok minősítésének, a korrekciós újraütemezéseknek, a termelési célok, prioritások és paraméterek megváltoztatásának, valamint a bizonytalanságok menedzselésének igényeit is.

Egy sikeres ütemezési koncepció kidolgozásához szükséges a témához kapcsolódó ismert fontosabb ütemezési modellek és azok megoldási módszereinek elemzése,

alkalmazhatóságuk vizsgálata, a lehetőségek és a követelmények összevetése. Ezek ismeretében kell hatékony ütemezési, döntéstámogatási modelleket és algoritmusokat kifejleszteni, implementálni, tesztelni és értékelni.

Az értekezésben összefoglalt kutatás az MTA SZTAKI vezetésével folyó „*Valós idejű, kooperatív vállalatok*” (VITAL) c. projekthez kapcsolódik. A funkcionális követelmények megfogalmazásánál a VITAL kutatási beszámolóiban megfogalmazott specifikációkat is figyelembe vettem.

4. AZ ALKALMAZOTT MÓDSZEREK ÉS AZ ELVÉGZETT KUTATÓMUNKA ÖSSZEFOGLALÁSA

A kitűzött feladat komplexitása és interdiszciplináris jellege megkövetelte a különböző, egymással szoros kapcsolatban álló tématerületek eredményeinek figyelembe vételét. A megoldás során alapvetően a termelésinformatika, a diszkrét matematika, az operációkutatás, az ütemezéselmélet, a mesterséges intelligencia és az információtechnológia korszerű elveire, modelljeire és módszereire támaszkodtam.

A kutatómunkám során végzett tevékenységsorozat egy ismétlődő körfolyamattal jellemezhető. Ennek során a felmerült részfeladatokhoz kapcsolódó ismereteket, eredményeket összegyűjtöttem és szintetizáltam. A kapcsolódó konvenciók (jelölés, fogalmak) felhasználásával megfogalmaztam a problémát. Ezt követően modelleztem a feladatot úgy, hogy mind számítási mind informatikai szempontból számítógépi programmal hatékonyan kezelhető legyen. Kidolgoztam a feladatmegoldás koncepcióját, ezt követően definiáltam a szükséges modelleket, algoritmusokat és heurisztikákat. Kidolgoztam a feladatmegoldás számítógépes implementációját. Tesztelés és értékelés után a folyamat részleges ismétlésére került sor részletesebb és szigorúbb követelményrendszer felállításával és pontosított célok kitűzésével.

Kiindulásként az igény szerinti tömeggyártást folytató vállalatok diszkrét gyártó-szerelő folyamatainak a termelésprogramozás szempontjából fontos, általánosítható jellemzőit gyűjtöttem össze. Ebben nagy segítségemre voltak egyrészt a szakirodalomból nyerhető, főként elméleti szempontból fontos anyagok, másrészt azok a konkrét kutatáshoz kapcsolódó technikai specifikációk, jelentések valamint valósághoz közeli termelési mintaadatok, amelyek a gyakorlatból származó igényeket, elvárásokat tükrözték. Ez utóbbi anyagok megismerésére jó lehetőséget biztosított a „*VITAL*” *Valós idejű, kooperatív vállalatok* (NKTH 2/010/2004) projekt, amely a termelési folyamatok számítógépes támogatásának fejlesztésére irányul (2004-2007). Ebben a projektben a General Electric (GE) magyarországi leányvállalatai, több hazai beszállító vállalat, továbbá a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME), valamint a Miskolci Egyetem (ME) kutatócsoportjai a Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutató Intézetének (MTA SZTAKI) vezetésével vesznek részt. A Miskolci Egyetem Alkalmazott Informatikai Tanszékén

(tanszékvezető: Tóth Tibor) folyó kutatómunka célja hozzájárulni az MTA SZTAKI vezette nagy méretű, komplex kutatás-fejlesztési munka támogatásához. A kutatásokat Monostori László projektvezető, Kis Tamás, Kádár Botond és Váncza József klasztervezetők (MTA SZTAKI), továbbá Farkas Zoltán informatikai fejlesztésvezető (GE Hungary) irányította.

A projektben végzett munka során megszerzett ismereteket összevetve a nemzetközi irodalomban elérhető ismeretekkel a kutatási tématerületre nézve a következő fontosabb általánosítható jellemzőket és követelményeket foglaltam össze:

- Egy igény szerinti tömeggyártást folytató vállalat több (esetenként számos) különböző terméket állít elő. A gyártásirányítás szintjén jellemzően adott egy belső rendelésállomány, amelyet a külső rendelések és az előrejelzések figyelembevételével a vállalat termelésstervezési szintjén definiálnak. Minden egyes rendelés meghatározott típusú, adott darabszámú egyforma termék, adott határidőre történő legyártását írja elő.
- A tömeggyártás műhelyszintű irányításban előredefiniált logisztikai egységek szerepelnek. A logisztikai egység (pl. paletta, konténer) megadott darabszámú, adott típusú termék előállítására irányuló munkadarabok együttesét jelenti. A logisztikai egység munkadarabjai együtt kerülnek mozgatásra a gyártó-szerelő rendszerben, és azonos műveleteket kell rajtuk végrehajtani. Egy rendelés ilyen logisztikai egységek halmazának tekinthető, ahol a logisztikai egységek számát a rendelt mennyiség és a logisztikai egység termékfüggő mérete együttesen határozzák meg.
- A belső rendelésekben szereplő termékek előállításához – a termék típusától függően – adott számú műveletet kell kötött sorrendben végrehajtani. A műveletek rendszerint további részoperációk sorozatából tevődhetnek össze, azonban a műveletek jellemzően nem szakíthatók meg, ezért ezek tekinthetők az ütemezés során a legkisebb allokációs egységeknek. Egy művelet adott időben történő elvégzéséhez megfelelő gép (munkahely), továbbá meghatározott típusú és mennyiségű (esetleg többféle) anyag és/vagy komponens együttes rendelkezésre állása szükséges. Ugyanakkor a termelés rugalmas jellegéből következik, hogy egy adott típusú termék alternatív anyagok, komponensek, gépek és útvonalak használatával is előállítható.
- A gyártó-szerelő rendszerben rendszerint automatizált gépek, gépsorok, (esetleg kézi munkaszalagok) működnek, amelyek a terméktől függő gyártási sebességekkel, a munkák sorrendjétől függő átállási időekkel, rendelkezésre állási időintervallumokkal és egy adott termékcsoporthoz érvényes, egymást követő műveletek sorozatával jellemezhetők. A gyártás során egy adott gép egyszerre csak egy feladaton dolgozhat, és egy adott feladaton egyszerre csak egy gép dolgozhat. A gépek között átmeneti tárolóhelyek vannak kialakítva, melyek mérete – ütemezési szempontból – rendszerint nem korlátozott.

- A finomprogram elkészítésekor figyelembe kell venni, hogy az ütemezési időhorizonton a műhely bizonyos gépei már korábbi, még be nem fejezett, nem módosítható feladatokkal terheltek, így az utolsó végrehajtásra kiadott és érvényben lévő finomprogram következményei hatással vannak az új finomprogramra.

Ezekből az általános jellemzőkből kiindulva – a gyártási sorozatnagyságok, a gépek allokálására és a munkák időbeli ütemezésére koncentrálnak – az anyagok, komponensek és humánerőforrások rendelkezésre állásának egyszerűsítésével – definiáltam a vizsgált ütemezési feladat osztályát, melyet *kiterjesztett rugalmas flow shop* (Extended Flexible Flow Shop, EFFS) ütemezési feladatnak neveztem el és a szakirodalomban használt szimbolikus jelölésrendszer felhasználásával írtam le.

Az irodalomban számos példa mutatta, hogy a kitűzött ütemezési feladatnál kisebb méretű és kevésbé összetett feladatok esetében is fennáll, hogy a feladat kombinatorikus jellege következtében nem lehet polinomiális idő alatt futó algoritmust készíteni az optimális megoldás előállítására. Ennek megfelelően a heurisztikus megoldási módszerek kerültek a kutatás középpontjába. Nagyméretű kombinatorikus optimálási feladatok megoldására korábban már hatékonyan alkalmazott megoldási módszereket, metaheurisztikákat vettem alapul.

A feladatosztály jellegzetességeire alapozva kidolgoztam egy új, végrehajtás-szemléletű ütemezési modellt. Ebben fontos szerepet játszottak a következő felismerések: (1) Minden logisztikai egység egy önálló absztrakt „munkának” tekinthető, ezáltal a gyártási sorozatok nagysága az egyes gépeken időben dinamikusan változhat, megengedve a rendelések bontását és/vagy egyesítését. (2) Az ütemezés alapegységének tekinthető a műveletek (technológiai lépések) gépváltás nélkül elvégezhető sorozata (végrehajtási lépés), elősegítve a többfunkciós gépek kezelését, végrehajtási útvonalak és gépcsoportok definiálását, továbbá a rendelések feladatokra bontását. (3) Egy termelési finomprogram funkcionális szempontból három részre bontható és így hatékonyabban kezelhető. Ezek a következők: (a) feladatok (munkák és gépek összerendelése), (b) gépenkénti feladat végrehajtási sorrendek, (c) feladatok végrehajtásának tervezett időadatai.

A kidolgozott ütemezési modell építőelemeinek számítógépi realizálására kifejlesztettem egy adatmodellt, amelyben indexelt tömböket használtam az adatelérés egyszerűsítése és gyorsítása érdekében. A tömbökben a gyártási környezetre jellemző entitások (pl. megrendelések, munkák, gépek, termékek stb.) indexekkel vannak helyettesítve, ezek kapcsolatát a tömbökben tárolt alapadatokra történő hivatkozások rendszere írja le. Ennek egyik fontos előnye az, hogy egy tetszőleges elemből kiindulva – az indexelési szabályok betartásával – minden egyes vele kapcsolatban álló elem közvetlenül elérhető.

Az adatmodellre alapozva kifejlesztettem egy szabályalapú számítási eljárást, amely a gyártási folyamat gyors szimulációjára alkalmas. Ennek egyik célja az volt, hogy az ütemezési feladat speciális tulajdonságait kezelő részek jól elkülönüljenek a

megoldási módszer általánosan használható részeitől, ezáltal növelje a megoldás rugalmasságát, továbbfejlesztési lehetőségeit. A szimuláció alkalmazásának másik célja az volt, hogy a finomprogramban szereplő feladatok időadatai minél rövidebb idő alatt kiértékelhetők legyenek. Ennek a kettős célnak megfelelően a szimuláció veszi figyelembe a gépek ismert korábbi terheléseit, előírt rendelkezésre állási időintervallumait, a gépeken a munkasorrend által meghatározott átállítási időket, a munka-gép összerendelések és az eltérő termelési sebességek alapján számítható megmunkálási időket. Ezáltal a finomprogramban szereplő feladatok, munkák és megrendelések kezdési és befejezési időpontjai ismertté válnak, ezeket felhasználva termelési mutatók és célfüggvények számításával minősítetté válik a megoldás.

Az így felállított végrehajtás-szemléletű szimulációra alapozott megoldási koncepció következtében a termelési finomprogram elkészítése az egyes munkák feladatokra bontására és a feladatok gépenkénti sorrendjének meghatározására redukálódott. Eközben a lehetséges megvalósítható finomprogramok halmaza könnyebben kezelhetővé vált.

A kutatás során ennek a redukált problémának a megoldására több heurisztikus módszert fejlesztettem ki. Már a kutatás kezdeti szakaszában is olyan megoldási módszerekkel foglalkoztam, amelyek a felhasználó által választható, de választás után rögzített célfüggvény optimalizálására koncentráltak, ezáltal alkalmazásuk nem korlátozódott pusztán egyetlen célfüggvényre. Ezt a szemléletet követve, a gyakran változó célokhoz való rugalmas alkalmazkodás biztosítása érdekében kidolgoztam egy többcélú eredményértékelő módszert. A módszer előredefiniált célfüggvények felhasználó által megadott mértékű figyelembevételével az egyes megengedett megoldások egymáshoz viszonyított minősítésén alapult. Ezt a módszert alkalmaztam a megoldóalgoritmusokban a termelési finomprogramok minőségének összehasonlítására és javítására.

A kidolgozott megoldási módszerek menetét figyelembe véve alapvetően két csoportba sorolhatók: (1) Az első csoportba tartoznak a felépítő jellegű heurisztikák. Ezek a módszerek az előző finomprogram még be nem fejezett részéből kiindulva, a kiválasztott, soron következő ütemezendő munkához tartozó útvonalra, gépre és sorrendre vonatkozó döntéseket heurisztikus szabályok és szimulációs kiértékelés alapján hozzák meg. (2) A második csoportba tartoznak az iteratív javításon alapuló heurisztikák. Ezeknél a módszereknél egy kezdeti megvalósítható ütemtervből kiindulva megengedett módosítások és szimulációs kiértékelések iterálásával alakul ki az aktuális céloknak jobban megfelelő termelési finomprogram.

A megoldási módszerek és az azok által előállított eredmények részletes vizsgálata, fejlesztése érdekében kidolgoztam egy interaktív grafikus felhasználói felületet. Ezt követően olyan felhasználói beavatkozást támogató szolgáltatásokat terveztem meg és építettem be, amelyek interaktív tervezői felületen keresztül érhetőek el, ezáltal lehetővé teszik a természetes (felhasználói) intelligencia és a megoldási módszerekben realizált mesterséges (számítógépi) intelligencia kombinált

alkalmazását. A különböző szemléletű megoldási módszerek előnyös tulajdonságainak egyesítésére többfázisú, kombinált megoldási koncepciót fejlesztettem ki.

A kidolgozott modellek, módszerek és algoritmusok alapján C++ Builder szoftverfejlesztő környezetben objektumorientált módon implementáltam egy ütemezőszoftver-prototípust, amely alkalmas EFFS ütemezési feladatok megoldásának automatikus, kézi és kombinált üzemmódú előállítására. A szoftver prototípusát átlagos személyi számítógépre, Windows operációs rendszeren történő használatra fejlesztettem ki.

5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. tézis: Új, kiterjesztett rugalmas Flow Shop ütemezési modell és annak számítógépi reprezentációja.

Ismeretes, hogy a diszkrét termelési folyamatok műhelyszintű prediktív ütemezése mind elméleti, mind gyakorlati szempontból az erősen modellfüggő és komplex feladatok körébe tartozik. A klasszikus „Flow Shop” ütemezési feladat formális modellje egy hármassal jellemezhető: (M, J, f) ahol M az erőforrások, J a feladatok (munkák) és f az irányítási célok leírása. Ebben a modellben az optimális ütemterv előállítása már a klasszikus egyutas, előzésmentes esetre is NP-teljes feladat. A napjaink ipari gyakorlatában egyre fontosabbá váló, rugalmas és igény szerinti tömeggyártás irányítása szükségessé teszi az ismert ütemezési modellek további jelentős kiterjesztését.

Kidolgoztam egy új, kiterjesztett ütemezési feladatosztályt (Extended Flexible Flow Shop, EFFS) és annak számítógépi reprezentációját a rövid távú, műhelyszintű termelésprogramozási feladatok modellezésére, figyelembe véve az igény szerinti tömeggyártás legfontosabb általános jellemzőit és követelményeit.

Az új, kiterjesztett modellt a következők jellemzik:

- 1.1 Egyszerre jelennek meg benne: (1) több művelet együttes végrehajtására képes összetett gépek (gépsorok), (2) párhuzamos gépekből funkciók szerint szervezett gépcsoportok, (3) terméktípustól függő végrehajtásiút-vonal-alternatívák, (4) géptől és terméktől függő termelési intenzitások, (5) géptől függő változó rendelkezésre állási időintervallumok, (6) munkák sorrendjétől függő gépatállítási idők, (7) munkák indítására és befejezésére vonatkozó időkorlátok.
- 1.2 Lehetővé teszi a munkák dinamikus kezelését, a rendelések összevonását és/vagy szétbontását. A modellnek ez a tulajdonsága a tömeggyártás „sorozatnagyság” problémájának egy lehetséges értelmezését nyújtja.

- 1.3 Egyidejűleg több és változó fontosságú optimalizálási célt valamint interaktív tervezői beavatkozásokat is képes kezelni a termelésirányítás rugalmasan változó igényeinek kielégítése érdekében.

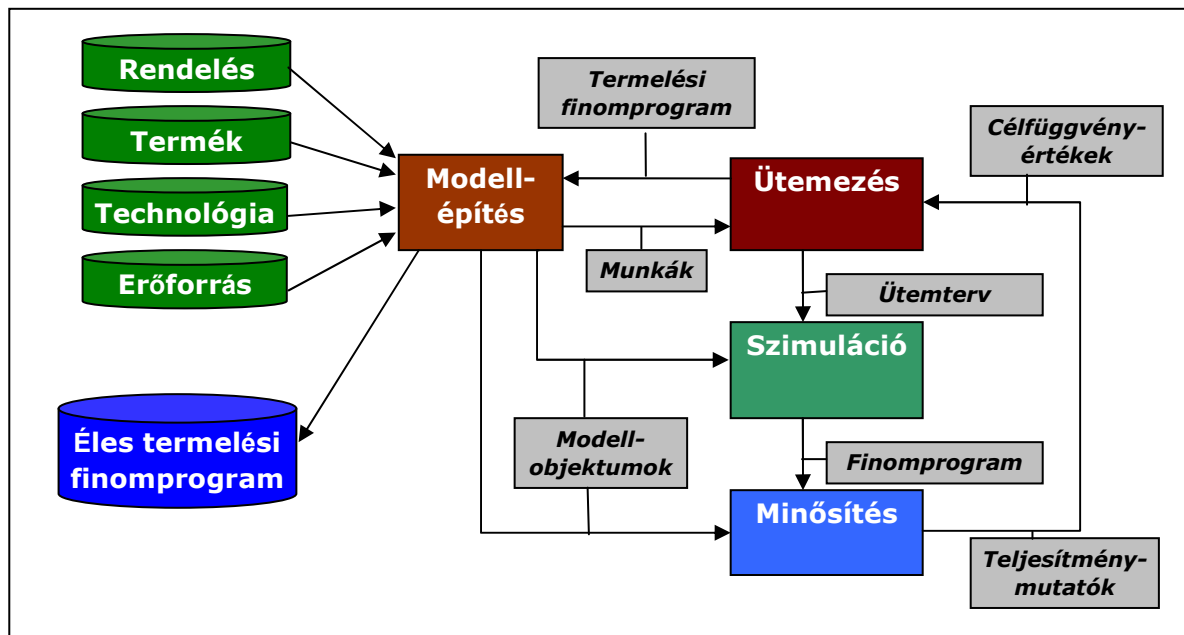
Definiáltam az ütemezési modell építőelemeit, részletesen megadtam a hozzájuk tartozó attribútumokat és leírtam azok kapcsolatrendszerét. Kifejlesztettem egy számítógépi implementálásra közvetlenül alkalmas adatmodellt, amelyben indexelt hivatkozásrendszert alkalmaztam az adatkezelés egyszerűsítése és gyorsítása érdekében. A modell alkalmazhatóságát a számítógépes implementáció teszt-feladatainak elemzése igazolta.

A modell tulajdonságait az értekezés 3. fejezete ismerteti. A modellt a [10], [8], [7], [13], [11] és az [1], [3] publikációkban is részletesen bemutattam.

2. tézis: Többfázisú heurisztikus módszer az EFFS ütemezési feladatok megoldására.

Az ismert FFS ütemezési feladatokhoz viszonyítva az 1. tézisben definiált EFFS termelésprogramozási feladatokban a végrehajtási útvonalak és a párhuzamos gépek alternatívái, valamint a dinamikus sorozatnagyság-képzés lehetőségei jelentősen megnövelik a megvalósítható ütemtervek keresési terét. A méretnövekedésnek a feladat megoldása szempontjából nehezítő hatását fokozza a megengedett megoldások terének szerkezetváltozása is. Ez a változás – többek között – a többműveletes végrehajtási lépések, a gépenként változó termelési intenzitások, és az átállítási időtartamok munka-függőségének következménye. További speciális követelményt jelent a gépek terhelhetőségénél egyes korábban ütemezett terhelések figyelembe vétele. Ezek következményeként az EFFS feladatok megoldására az ismert ütemezési módszerek közvetlenül nem alkalmazhatók, szükség van a gyakorlatban előforduló méretű és nehézségű feladatokat megoldó, elfogadható futási idejű új módszerek kifejlesztésére.

Az EFFS modellel kezelhető termelésprogramozási feladatok megoldására kifejlesztettem egy új szemléletű integrált módszert, amely végrehajtás-szimulációra alapozott problémátér-transzformációval, heurisztikus algoritmusok valamint keresési technikák kombinált alkalmazásával egyidejűleg támogatja a rendelések bontására és/vagy egyesítésére, a gyártási sorozatnagyságok dinamikus meghatározására, a technológiai alternatívák kezelésére, a gépi erőforrások allokálására, a gyártási feladatok definiálására és azok végrehajtásának időbeli ütemezésére vonatkozó döntéseket.



1. ábra: Az ütemező belső struktúrájának vázlata

A módszer fontosabb jellemzői:

- 2.1 A belső rendelések ütemezési alapegységekre bontásával önálló munkák jönnek létre. Ezek ütemezése egymástól függetlenül, végrehajtási lépésekre alapozott feladatok (taszkok) formájában történik (a csomagkapcsolt hálózati adattovábbítás elvének egy speciális alkalmazásával). Ezáltal a gépeken a gyártási sorozatnagyságok és az azokat elválasztó átállítási műveletek dinamikusan, ütemezés közben alakulnak ki.
- 2.2 A technológiai alternatívák teljes körű rendszerezését és megvalósíthatósági (érvényességi) vizsgálatát követően azok beépülnek az EFFE modellben szereplő építőelemek attribútumai által definiált kapcsolatrendszerbe. Minden egyes döntési helyzetben a választás már csak megengedett megoldást eredményezhet, ezért nincs szükség további megvalósíthatósági vizsgálatra.
- 2.3 Az EFFE feladatosztályhoz tartozó (gépek aktuális terhelésére és rendelkezésre állására, legkorábbi műveletkezdesre, műveleti sorrendre, rendelések határidejére vonatkozó) korlátfeltételek és a speciális követelmények (eltérő termelési intenzitások, változó átállítási időtartamok, különböző méretű logisztikai egységek) figyelembevételét egy szabályalapú számítási eljárás végzi, amely egy jól definiált ütemterv adott gyártási környezetben történő végrehajtásának gyors szimulációjára is alkalmas.
- 2.4 A végrehajtás-szimuláció az ütemtervben szereplő gyártási feladatokhoz, munkákhoz és megrendelésekhez tartozó kezdési, előkészítési, műveleti és befejezési időadatok kiszámításával a problémátér transzformációját valósítja meg. Egy egyszerűsített ütemtervhez – amely a munkák és gépek megengedett összerendeléseit és a munkák végrehajtásának gépenkénti sorrendjét tartalmazza

– egyértelműen hozzárendel egy megvalósítható, minősített, részletes termelési finomprogramot.

- 2.5 A hozzárendelési és sorrendi problémákat egy kétfázisú, kombinált heurisztikus módszer oldja meg. Az első fázisban gyors felépítő algoritmusok (BWBA, HEFCA, HIA, EHIA) több „jó” kezdeti megoldást generálnak. A legjobb kezdeti megoldásból kiindulva a második fázisban többféle szomszédsági operátor (N1, N2, N3, N4, N5) kombinált alkalmazásával, többfunkciós tabulista-kezeléssel és folyamatos tanuláson alapuló, paraméteres szabályozással működő, tabukeresési megoldóalgoritmus javítja a megoldást.

A definiált EFFS ütemezési feladatok megoldására tesztadatok és/vagy összehasonlításra alkalmas eredmények a szakirodalomból közvetlenül nem nyerhetők. Az új, integrált ütemezési módszer vizsgálatára ezért egy számítógépi keretrendszert hoztam létre. A rendszer egymástól jól elkülönített funkcionális modulokból áll, így az egyes modulok, a megvalósított funkciók, valamint azok különböző algoritmusai önmagukban is, csoportosan is tesztelhetők, összehasonlíthatók. A módszer helyességét és hatékonyságát – erre a célra fejlesztett problémagenerátorral előállított – különböző méretű és nehézségű tesztfeladatokon elvégzett futási eredmények támasztják alá.

A megoldási módszer részleteit, a kifejlesztett algoritmusokat az értekezés 4. fejezete részletesen ismerteti, valamint a [10], [7], [13], [12], [11] és az [1], [2], [3] publikációkban nyomon követhetők a módszer kifejlesztésének fontosabb fokozatai.

3. tézis: Új módszer többcélú kombinatorikus optimalizálási feladat megengedett megoldásainak egymáshoz viszonyított minősítésére.

Ismeretes, hogy a többcélú, kombinatorikus optimalizálási feladatoknak csak kivételes esetekben van olyan megoldása, amely az összes célfüggvény szempontjából egyszerre tekinthető optimálisnak. Kompromisszumos megoldás értelmezéséhez és megtalálásához szükséges annak definiálása, hogy milyen szempontok szerint és hogyan hasonlíthatók össze a lehetséges megoldások. Léteznek különböző elvek és módszerek erre a célra, azonban dinamikus rendszerekben ezek alkalmazása – főként a paraméterezés bonyolultsága miatt – nehézkes, így indokolt új, rugalmasan, könnyen adaptálható módszerek kifejlesztése.

Matematikai modellt és megoldási módszert dolgoztam ki a többcélú kombinatorikus optimalizálási feladatokban előírt – dinamikusan változó fontosságú, különböző dimenziójú és értékészletű – célfüggvények együttes figyelembevételére és a megengedett megoldások egymáshoz viszonyított (relatív) minőségének számszerűsítésére.

A módszer rövid leírása:

Jelölje S a megengedett megoldások halmazát.

Adottak az f_1, \dots, f_K optimalizálási célfüggvények:

$$f_k : S \rightarrow \mathfrak{R}^+ \cup \{0\}, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K\}.$$

A feladat a legjobb $s^* \in S$ „kompromisszumos” megoldás megtalálása.

$$\min_{s \in S} [f_1(s), \dots, f_k(s), \dots, f_K(s)], \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K\}.$$

Legyenek

$$w_k \in \mathfrak{R}, \quad w_k \geq 0, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K\},$$

a célfüggvények aktuális fontosságát, „prioritását” kifejező tényezők, amelyek értékei egymástól függetlenül a felhasználó által tetszőlegesen beállíthatók.

Legyenek az $s_x, s_y, s_z \in S$ lehetséges (megengedett) megoldások.

Jelölje \max a következő operátort:

$$\max : \mathfrak{R}^2 \rightarrow \mathfrak{R}, \quad \max(a, b) = \begin{cases} a, & \text{ha } a > b \\ b, & \text{egyébként} \end{cases}.$$

Legyen D a következő függvény:

$$D : \mathfrak{R}^2 \rightarrow \mathfrak{R}, \quad a, b \in \mathfrak{R}, \quad D(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{ha } \max(a, b) = 0 \\ \frac{b - a}{\max(a, b)} \cdot 100, & \text{egyébként} \end{cases}.$$

Legyen F a következő függvény:

$$F : S^2 \rightarrow \mathfrak{R}, \quad F(s_x, s_y) = \sum_{k=1}^K (w_k \cdot D(f_k(s_x), f_k(s_y))).$$

A tézisben leírt módszer az $F(s_x, s_y)$ előjeles értéket nevezi az s_y megoldás s_x megoldáshoz viszonyított (relatív) jóságának (minőségének).

Ennek alapján a következő relációs operátorokat definiáltam:

$$s_x < s_y \quad (s_x \text{ jobb megoldás, mint } s_y) \text{ akkor, ha} \quad F(s_x, s_y) > 0.$$

$$s_x = s_y \quad (s_x, s_y \text{ azonosan jó megoldások) akkor, ha} \quad F(s_x, s_y) = 0.$$

$$s_x > s_y \quad (s_x \text{ rosszabb megoldás, mint } s_y) \text{ akkor, ha} \quad F(s_x, s_y) < 0.$$

A módszer többféle feladat-megoldási stratégiában is jól felhasználható az aktuális céloknak legjobban megfelelő megoldás megtalálására. A módszert – termelési finomprogramok minőségének összehasonlítására – objektumorientált elvek alapján, relációs operátorok újraértelmezésével implementáltam. Kimutattam, hogy a módszer széles problémakörben felhasználható ismert keresési algoritmusok (meta-heurisztikák) támogatására, kombinatorikus többcélú optimalizációs feladatok megoldására.

A módszert és annak tulajdonságait az értekezés 4.3.2. fejezete részletesen ismerteti, valamint az [1], [3], [12] és az [4] publikációkban is bemutattam.

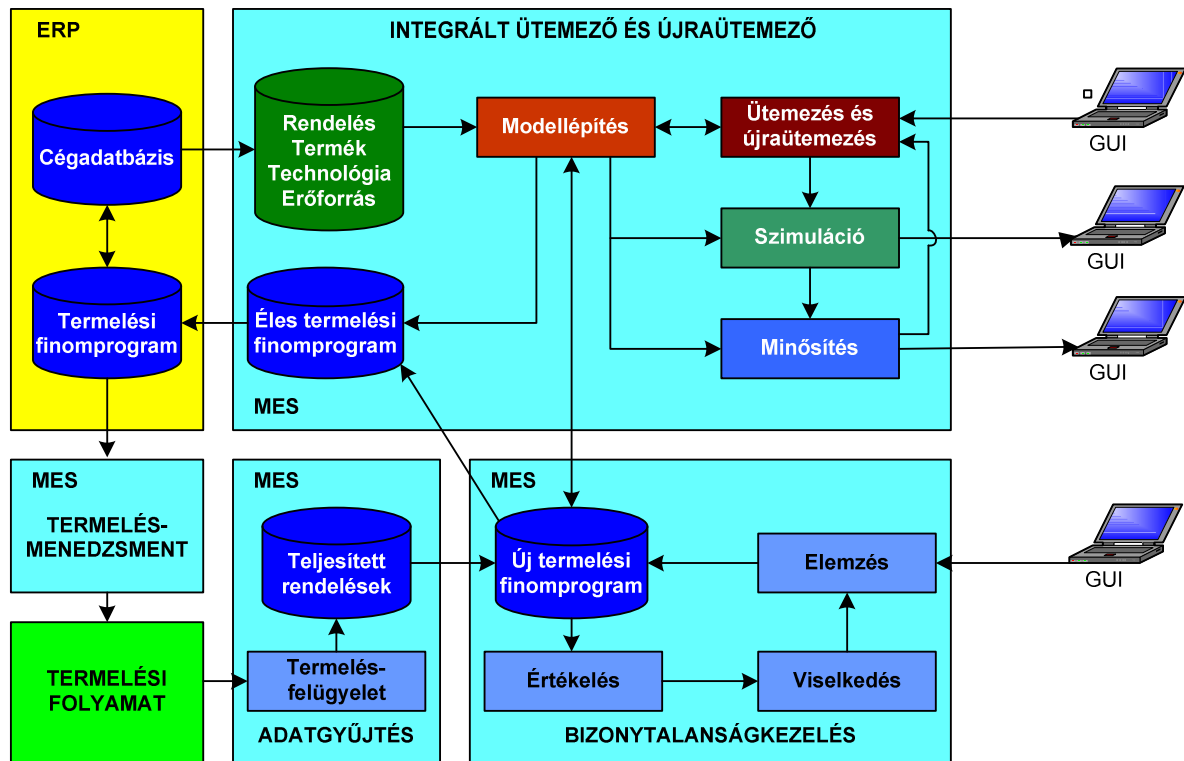
4. tézis: Integrált termelésprogramozási modell a rugalmas tömeggyártásban fellépő változások és zavarok kezelésének támogatására.

A rugalmas tömeggyártásban fellépő műhelyszintű termelésirányítási feladatok esetében a hagyományos MES alkalmazások az igények egy részét nem tudják maradék nélkül kielégíteni. Hatékony, zárt (visszacsatolt) irányítás (szabályozás) megvalósítása érdekében szükség van a tervezett és a tényleges termelési rendszer-állapot ismételt összevetésére és szükség esetén korrekciós beavatkozások kezdeményezésére. A kívánt állapotot a mindenkori érvényes termelési finomprogram képviseli, amely a termelés teljesítményét mérő mutatók előidejű optimalizálásával készült. Ehhez szükséges, hogy az ütemezőben rendelkezésre álljon egy gyors termelésifolyamat-szimulátor. Az éles finomprogram valós termelési teljesítményét mérő mutatók a MES rendszerből visszacsatolhatók és összevethetők a tervezettekkel. Az értékelés egyik lehetséges következményeként a hatékony beavatkozás érdekében újraütemezésre kerülhet sor, amelyet a ütemező megoldó heurisztikája és/vagy egy interaktív kézi ütemezést biztosító szolgáltatás támogat.

A MES szintű gyártásirányítás és bizonytalanságkezelés ütemezési és újraütemezési feladatainak támogatására kifejlesztettem egy új, integrált modellt és kidolgoztam annak egy számítógépi (szoftver) reprezentációját. A megoldás alkalmas az igény szerinti tömeggyártás műhelyszintű termelésirányítási feladatainak integrált, kiterjesztett funkciójú kezelésére.

A modellt a következők jellemzik:

- 4.1 Az előidejű ütemezésre használt megoldási módszer továbbfejlesztett, kibővített formában újraütemezési feladatok megoldására is alkalmas. Ez kezdeti megoldásnak az eredetileg érvényben lévő ütemtervet vagy annak egy interaktív szerkesztésű következményét tekinti. A minősítés kritériumai között ilyenkor megjelennek olyan új elemek is, amelyek kifejezik az ütemtervváltozásokkal szemben támasztott speciális igényeket. Ilyenek lehetnek egyedi (pl. egyes kiemelt gépek átállítására, rendelések késésének engedélyezésére vonatkozó) illetve összesített (pl. megváltozott allokációk vagy indítási sorrendek számának minimalizálására vonatkozó) elvárások is.
- 4.2 A termelés rövid távú programozására valamint a termelési bizonytalanságokból és zavarokból keletkező hibák elhárítására (csökkentésére) funkcionális komponensekből felépített termelésprogramozó szoftvert hoztam létre. Az alkalmazás funkcionális modelljét, és a termelésinformatikai rendszerben betöltött szerepét a 2. ábra vázolja.



2. ábra: Az integrált ütemező/újraütemező szoftver funkcionális kapcsolatai

- 4.3 A szoftver új, többfunkciós koncepciót valósít meg a következő fő komponensekkel: (1) többfunkciós paraméterkezelő, (2) ütemezési feladat-generátor (modellépítő), (3) heurisztikán és keresési metaheurisztikán alapuló feladatmegoldó ütemező és újraütemező (interaktív grafikus felülettel a felhasználói beavatkozás támogatására), (4) gyors termelésifolyamat-szimulátor a tascok időadatainak meghatározására és (5) termelési teljesítménymutatókat számító és minősítő komponens.
- 4.4 A modellt megvalósító szoftver a gyártásirányító vezetői döntéshozást automata, kézi és kombinált üzemmódban, termelési célfüggvények és mutatók számításával, részletes és áttekinthető grafikus diagramok, táblázatos jelentések készítésével támogatja.
- 4.5 Fontos jellemzője az alkalmazásnak, hogy megrendelés-, munka-, feladat- és gépszintű konzisztens beavatkozást biztosító interaktív operációkészlettel támogatja a felhasználót az ütemezési és újraütemezési feladatok megoldásában, ezáltal lehetővé teszi a természetes (felhasználói) intelligencia és a megoldási módszerekben realizált mesterséges (számítógépi) intelligencia kombinált alkalmazását.

A kidolgozott modell és a megoldóalgoritmusok alapján megterveztem és C++ Builder szoftverfejlesztő környezetben objektumorientált módon megvalósítottam a többfunkciós, integrált termelésprogramozó szoftver prototípusát, amely alkalmas:

(1) Többműveletes, EFFS típusú termelésirányítási feladatok többkritériumos optimumközeli ütemezésére. (2) A tervezett és a megvalósult termelési célok összevetésére. (3) Viselkedés alapú beavatkozás támogatójaként a feladatok újrafogalmazására. (4) A feladatok újraütemezésére. A szoftver alkalmazhatóságát próbafeladatokon végrehajtott tesztek eredményei támasztják alá.

A modell jellemzőit, a szoftver felépítésének részleteit, az alkalmazott információs technológiát, valamint az interaktív felhasználói felület tulajdonságait az értekezés 5. és 6. fejezete részletesen ismerteti. A legfontosabb jellemzők az [1], [2], [3], [7], [12], [11] és a [4] publikációkban is bemutatásra kerültek.

6. AZ EREDMÉNYEK HASZNOSÍTHATÓSÁGA

A Miskolci Egyetem Alkalmazott Informatikai Tanszékén Erdélyi Ferenc vezetésével végzett kutatómunkám egyik feladata volt hozzájárulni az MTA SZTAKI vezette „VITAL” *Valós idejű, kooperatív vállalatok* (NKTH 2/010/2004) kutatási projekt *Integrált kapacitástervezés, erőforrás-menedzsment és ütemezés* klasztere keretében folyó kutatási és fejlesztési munka támogatásához. Az értekezésben összefoglalt eredmények (ütemezési modell, megoldási koncepció, az alkalmazott módszerek és a megvalósított funkciók) szóbeli prezentáció és írásos kutatási jelentések formájában kerültek belső felhasználásra.

Az értekezésben összefoglalt eredmények a rugalmas tömeggyártás más területein is hasznosíthatók. Mintafeladatokon produkált futási eredmények azt mutatják, hogy a kifejlesztett EFFS ütemezési modell és annak megoldómódszerei alkalmasak a definiált feladatosztályba sorolható sokféle ütemezési feladat megoldására. A megvalósított szoftverprototípus adatbáziskezelő rendszerekhez (DBMS) kapcsolódhat, ezáltal termelésinformatikai rendszerekbe ágyazható. Gyakorlati alkalmazásához szükség lehet a konkrét termelési adatbázis-struktúrához illesztő (adatkonverziós) modul módosítására, a felmerülő igényeknek megfelelően további célfüggvények, termelési mutatók definiálására, valamint a konkrét gyártó-szerelő rendszer speciális jellemzőinek és igényeinek megfelelően a szimulátor módosítására, esetleg továbbfejlesztésére.

Az ütemező szoftver könnyen kezelhető grafikus felülete, beépített problémagenerátora, valamint eredménykijelző és -értékelő szolgáltatásai lehetővé teszik a felsőfokú oktatásban való felhasználását is (pl.: ME Alkalmazott Informatikai Tanszék által oktatott „Számítógépes gyártásirányítás”, „Számítógépes termelésirányítás”, „Termelési rendszerek és folyamatok” és „Számítógéppel integrált gyártás” c. tárgyak laborgyakorlatainak keretein belül).

A többcélú optimalizálási feladat megoldásainak egymáshoz viszonyított (relatív) minőségének számszerűsítésére kifejlesztett (a harmadik tézisben összefoglalt) matematikai modell és megoldási módszer – termelésütemezési problémától független tulajdonsága következtében – széles feladatkörben felhasználható ismert keresési

algoritmusok és metaheurisztikák támogatására, kombinatorikus többcélú optimalizálási feladatok megoldására.

7. TOVÁBBI KUTATÁSI FELADATOK

A továbbfejlesztés egyik iránya lehet az EFFS modell bővítése. Ez vonatkozhat egyrészt a modell specializálására, finomítására további részletek kibontásával, modellezésével és beépítésével. Ilyenek lehetnek például a gyártási folyamat során felhasznált anyagokkal, beépülő komponensekkel és azok alternatíváival mint nem megújuló erőforrásokkal kapcsolatos kérdések részletes vizsgálata, korlátozott méretű átmeneti tárolók, anyagmozgatási idők figyelembevétele és hatásuk vizsgálata. Általános irányú funkcionális bővítés is kitűzhető cél lehet, melynek során a modellel kezelhető ütemezési feladatok körét tovább lehet szélesíteni. Ilyenek lehetnek például a művelet-végrehajtási (pl. megszakíthatóságra vonatkozó) jellemzők változtatásából származó feladatok, a műveleti sorrendekre vonatkozó előírások általánosításából eredő („job shop”, „open shop” vagy „general shop” típusú) feladatok kezelésére irányuló kutatások.

A továbbfejlesztés egy másik lehetséges irányát jelentheti a tisztán determinisztikus előidejű ütemezési (proactive) és újraütemezési (reactive) feladatok vizsgált körének bővítése sztochasztikus ütemezési feladatok irányába, adott eloszlások szerint véletlenszerűen generált elemek (pl. időközben beérkező megrendelések, ütemezés közben megváltozó műveleti és rendelkezésre állási idők, egyéb jellemzők) bevonásával.

További kutatási feladatot jelenthetnek a szimulációt megvalósító, a megoldást előállító és a kiértékelést végző algoritmusok sebességének növelésére (összességében az adott minőségű eredmények előállításához szükséges futási idő csökkentésére, vagy adott futási időkorlát mellett elérhető még jobb minőségű eredmények előállítására) irányuló törekvések.

Hosszú távú fejlesztési célként említhető meg az ütemező szoftver és további (meglévő vagy fejlesztés alatt álló) alkalmazások felhasználásával az ME AIT termelésinformatikai laboratóriumában virtuális körülmények között működő teljes funkcionalitású gyártásirányító rendszer kialakítása kutatási és oktatási céllal.

8. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN KÉSZÍTETT SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

Angol nyelven megjelent tudományos közlemények:

- [1] **KULCSÁR, GY.**, ERDÉLYI, F., 2007, *A New Approach to Solve Multi-Objective Scheduling and Rescheduling Tasks*, International Journal of Computational Intelligence Research, Vol. 3, No. 4, (megjelenés alatt).
- [2] TÓTH, T., ERDÉLYI, F., **KULCSÁR, GY.**, 2008, *Decision Supporting of Production Planning and Control by means of Key Production Performance Measuring Indicators*, Seventh International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering, TMCE 2008, April 21–25, 2008, Kusadasi, Turkey, (közlésre elfogadva).
- [3] **KULCSÁR, GY.**, ERDÉLYI, F., HORNYÁK, O., 2007, *Multi-Objective Optimization and Heuristic Approaches for Solving Scheduling Problems*, IFAC Workshop on Manufacturing Modeling, Management and Control, MIM 2007, Budapest, November 14-16, 2007, pp. 127-132.
- [4] **KULCSÁR, GY.**, ERDÉLYI, F., 2007, *Multi-Objective Searching Methods for Solving Scheduling and Rescheduling Problems*, microCAD 2007 International Scientific Conference, Miskolc, Hungary, pp. 133-138.
- [5] HORNYÁK, O., ERDÉLYI, F., **KULCSÁR, GY.**, 2006, *Behaviour-Based Control for Uncertainty Management in Manufacturing Execution Systems*, Proceedings of the 8th International Conference on The Modern Information Technology in the Innovation Processes of the Industrial Enterprises, MITIP 2006. September 11-12, 2006, Budapest, Hungary, pp. 73-79.
- [6] HORNYÁK, O., ERDÉLYI, F., **KULCSÁR, GY.**, 2006, *Detailed Scheduling and Uncertainty Management in Customized Mass Production*, 12th International Conference on Machine Design and Production, Kusadasi, Turkey, pp. 423-439.
- [7] **KULCSÁR, GY.**, ERDÉLYI, F., 2006, *Modeling and Solving of the Extended Flexible Flow Shop Scheduling Problem*, Production Systems and Information Engineering, A Publication of the University of Miskolc, Vol. 3, Miskolc, Hungary, pp. 121-139.
- [8] **KULCSÁR, GY.**, ERDÉLYI, F., 2006, *Extended Flexible Flow Shop Scheduling Problem with Limited Machine Availability*, microCAD 2006 International Scientific Conference, Miskolc, Hungary, pp. 181-186.
- [9] **KULCSÁR, GY.**, ERDÉLYI, F., 2005, *Production Goals and Heuristics Methods in Extended Flexible Flow Shop Scheduling Problems*, Forum of PhD Students, Miskolc, Hungary, pp. 104-109.

- [10] **KULCSÁR, GY.**, HORNYÁK, O., ERDÉLYI, F., 2005, *Shop Floor Decision Supporting and MES Functions in Customized Mass Production*, Conference on Manufacturing Systems Development - Industry Expectations, Machine Engineering, Vol. 5. Wroclaw, Poland, pp. 138 - 152.

Magyar nyelven megjelent tudományos közlemények:

- [11] **KULCSÁR, GY.**, 2006, *Az igény szerinti tömeggyártás termelés-programozásának heurisztikus megoldási módszere*, Gyártás-2006 Magyar Tudományos Konferencia, pp. 130-140.
- [12] **KULCSÁR, GY.**, 2006, *Az igény szerinti tömeggyártás termelés-programozásának egy hibrid megoldási módszere*, Doktoranduszok Fóruma, Miskolc, pp. 104-111.
- [13] **KULCSÁR, GY.**, 2006, *Az igény szerinti tömeggyártás termelés-programozásának modellezése és heurisztikus megoldása*, GÉP, A Gépipari Tudományos Egyesület Műszaki Folyóirata, LVII. évfolyam, 2006/10 szám, pp. 3-13.
- [14] **KULCSÁR, GY.**, ERDÉLYI, F., 2006, *Kiterjesztett rugalmas Flow Shop ütemezési feladat modellezése és megoldása*, Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, Románia, pp. 223- 226.
- [15] HORNYÁK, O., ERDÉLYI, F., **KULCSÁR, GY.**, 2005, *Valós idejű gyártásirányítás (MES) funkciók fejlődése, modellek és módszerek*, Informatika a felsőoktatásban 2005, CD, Debrecen.
- [16] **KULCSÁR, GY.**, ERDÉLYI, F., 2004, *Technológiai alternatívák hatása rövid távú termelés ütemezési feladatok megoldására*, Doktoranduszok Fóruma, Miskolc, pp. 173-178.

9. HIVATKOZOTT IRODALOM

- [17] AHR, D., BÉKÉSI, J., GALAMBOS, G., OSWALD, M., REINELT, G., 2004, *An Exact Algorithm for Scheduling Identical Coupled Task Problems*, Mathematical Methods of Operations Research, Vol. 59, No. 2, pp. 193-203.
- [18] ALCARAZ, J., MAROTO, C., RUIZ, R., 2006, *Two New Robust Genetic Algorithms for the Flowshop Scheduling Problem*, Omega, Vol. 34, pp. 461-476.
- [19] ALLAHVERDI, A., GUPTA, J., N., D., ALDOWAISAN, T., 1999, *A Review of Scheduling Research Involving Setup Considerations*, Omega, Vol. 27, No. 2, pp. 219-239.
- [20] ALLAHVERDI, A., NG, C., T., CHENG, T., C., E., KOVALYOV, M., Y., 2007, *A Survey of Scheduling Problems with Setup Times or Costs*, European Journal of Operational Research, In Press, Corrected Proof, Available online 13 November 2006.

-
- [21] ALLAOUÏ, H., ARTIBA, A., 2006, *Scheduling Two-Stage Hybrid Flow Shop with Availability Constraints*, Computers and Operations Research, Vol. 33, pp. 1399-1419.
- [22] ARTHANARI, T., S., RAMAMURTHY, K., G., 1971, *An Extension of Two Machines Sequencing Problem*, Journal of Operational Research, Vol. 41, pp. 641-648.
- [23] ASKIN, G., A., STANDRIDGE, C., R., 1993, *Modeling and Analysis of Manufacturing Systems*, John Wiley and Sons Inc., New York.
- [24] AYTUG, H., LAWLEY, M., A., MCKAY, K., MOHAN, S., UZSOY, R., 2005, *Executing Production Schedules in the Face of Uncertainties: A Review and some Future Directions*, European Journal of Operational Research, Vol. 161, pp. 86-110.
- [25] BRUCKER, P., 1998, *Scheduling Algorithms*, Second, Revised and Enlarged Edition, Springer-Verlag, Berlin.
- [26] BRUCKER, P., KNUST, S., 2006, *Complexity Results for Scheduling Problems*, <http://www.mathematik.uni-osnabrueck.de/research/OR/class/>
- [27] CHENG, T., C., E., GUPTA, J., N., D., WANG, G., 2000, *A Review of Flowshop Scheduling Research with Setup Times*, Production and Operations Management, Vol. 8, No. 3, pp. 262-282.
- [28] CHROBAK, M., CSIRIK, J., IMREH, CS., NOGA, J., SGALL, J., WOEGINGER, G., 2001, *The Buffer Minimization Problem for Multiprocessor Scheduling with Conflicts*, Proceedings of ICALP 2001, LNCS 2076, pp. 862-874.
- [29] CRESCENZI, P., KANN, V., 2005, *A Compendium of NP Optimization Problems*, <http://www.nada.kth.se/~viggo/problemlist/>
- [30] CSÁJI, B., CS., MONOSTORI, L., 2005, *Stochastic Reactive Production Scheduling by Neurodynamic Learning*, 16th IFAC World Congress, July 4-8, 2005, Prague, Czech Republic, (CD version is available).
- [31] CSÁJI, B., CS., MONOSTORI, L., 2005, *Stochastic Reactive Production Scheduling by Multi-Agent Based Asynchronous Approximate Dynamic Programming*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer, Vol. 3690, Proceedings of the 4th International Central and Eastern European Conference on Multi-Agent Systems (CEEMAS 2005), September 15-17, 2005, Budapest, Hungary, pp 388-397.
- [32] CSÉBFALVI, G., 2000, *A New Exact Resource Leveling Procedure for the Multiple Resource Constrained Project Scheduling Problem*, Proc. North American Productivity Workshop, Jun 15-21, 2000, Schenectady, New York, USA.
- [33] CSÉBFALVI, G., KONSTANTINIDIS, P., 1998, *Egy implicit leszámrláláson alapuló új erőforrás kiegyenlítő eljárás*, Szigma, Vol. 29, pp. 43-52.
- [34] ERDÉLYI, F., 2004, *Technológiai folyamatok automatizálásának alapjai*, TÓTH, T., *Termelési rendszerek és folyamatok* 11. fejezete, p. 305-384, Miskolci Egyetemi Kiadó.

-
- [35] ERDÉLYI, F., TÓTH, T., 2006, *Decision Supporting of Production Planning and Control (PPC) by Means of Rate-Type State Variables*, Sixth International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering, TMCE 2006, April 18-22, Ljubljana, (under review).
- [36] FRAMINAN, J., M., GUPTA, J., N., D., LEISTEN, R., 2002, *A Review and Classification of Heuristics for Permutation Flowshop Scheduling with Makespan Objective*, Technical Report OI/PPC-2001/02, Version 1.2 – 20/07/2002 (<http://taylor.us.es/cicyt/reports/TROI-2001-02.pdf>).
- [37] GAREY, M., R., JOHNSON, D., S., SETHI, R., 1976, *The Complexity of Flowshop and Jobshop Scheduling*, Mathematics of Operations Research, Vol. 1, No. 2, pp. 117-129.
- [38] GEIGER, M., J., 2006, *Foundations of the Pareto Iterated Local Search Metaheuristic*, Proceedings of the 18th International Conference on Multiple Criteria Decision Making, June 19-23, 2006, Chania, Greece. <http://www.dpem.tuc.gr/fel/mcdm2006/Papers/Geiger.pdf>
- [39] GUPTA, J., N., D., 1988, *Two-stage, hybrid flow shop scheduling problem*, The Journal of the Operational Research Society, Vol. 39, No. 4, pp. 359-364.
- [40] HOLCZINGER, T., ROMERO, J., PUIGJANER, L., FRIEDLER, F., 2002, *Scheduling of Multipurpose Batch Processes with Multiple Batches of the Products*, Hungarian Journal of Industrial Chemistry, Vol. 30, pp. 305-312.
- [41] HOOGEVEEN, J., A., LENSTRA, J., K., VELTMAN, B., 1996, *Preemptive scheduling in a two-stage multiprocessor flow shop is NP-hard*, European Journal of Operational Research, Vol. 89, No. 1-2, pp. 172-175.
- [42] HORNYÁK, O., ERDÉLYI, F., 2004, *Manufacturing Execution System for Advanced Shop Floor Control*, Proceedings of The Eleventh International Conference on Machine Design and Production, October 13-15, Antalya, Turkey. pp. 48-52.
- [43] IMREH, CS., 2001, *Scheduling on a Two Layer Multiprocessor Architecture*, Acta Cybernetica, Vol. 15, pp. 163-172.
- [44] IMREH, CS., 2003, *Scheduling Problems on Two Sets of Identical Machines*, Computing, Vol. 70, pp. 277-294.
- [45] JOHNSON, S., M., 1954, *Optimal Two- and Three-Stage Production Schedules with Setup Times Included*, Research Logistics Quarterly, Vol. 1, pp. 61-68.
- [46] JUNGWATTANAKI, J., REODECHA, M., CHAOVALITWONGSE, P., WERNER, F., 2006, *Algorithms for Flexible Flow Shop Scheduling Problems with Unrelated Parallel Machines, Setup Times, and Dual Criteria*, Preprint 2006-26, Mathematics Preprint Servers, Otto-von-Guericke-University, Magdeburg, Germany.
- [47] KÁDÁR, B., MONOSTORI, L., CSÁJI, B., 2005, *Adaptive Approaches to Increasing the Performance of Production Control Systems*, CIRP Journal of Manufacturing Systems, Vol. 34, No. 1, pp. 349-352.

-
- [48] KÁDÁR, B., PFEIFFER, A., MONOSTORI, L., 2005, *Stability-oriented Evaluation of Rescheduling Strategies by using Simulation*, Computers in Industry, Elsevier, (paper accepted in 2006).
- [49] KIS T., PESCH, E., 2005, *A Review of Exact Solution Methods for the Non-Preemptive Multiprocessor Flowshop Problem*, European Journal of Operational Research, Vol. 164, No. 3, pp. 573-695.
- [50] KIS, T., ERDŐS, G., 2005, *Specification: Automatic Scheduling System with Basic Scheduling Engine for GE Lighting*, (VITAL project NKTH 2/010/2004: internal report).
- [51] KOVÁCS, A., EGRI, P., KIS, T., VÁNCZA, J., 2005, *Proterv-II: An integrated Production Planning and Scheduling System*, In: Principles and Practice of Constraint Programming, Proc. of CP2005, (ed.: van Beek, P.), Springer LNCS.
- [52] LEE, I., R., SIKORA, AND M., J., SHAW, 1997, *A Genetic Algorithm-Based Approach to Flexible Flow-Line Scheduling with Variable Lot Sizes*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 27, No. 1, pp. 36-54.
- [53] LINN, R., ZHANG, W., 1999, *Hybrid Flow Shop Scheduling: A Survey*, Computers and Industrial Engineering, Vol. 37, No. 1-2, pp. 57-61.
- [54] LIU, C., Y., CHANG, S., C., 2000, *Scheduling Flexible Flow Shops with Sequence-Dependent Setup Effects*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 16, No. 4, pp. 408-419.
- [55] LOUKIL, T., TEGHEM, J., TUYTTENS, D., 2005, *Solving Multi-Objective Production Scheduling Problems Using Metaheuristics*, European Journal of Operational Research, Vol. 161, pp. 42-61.
- [56] MAJOZI, T., FRIEDLER, F., 2006, *Maximization of Throughput in a Multipurpose Batch Plant Under Fixed Time Horizon: S-Graph Approach*, Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 45, pp. 6713-6720.
- [57] MONOSTORI, L., CSÁJI, B., CS., 2006, *Stochastic Dynamic Production Control by Neurodynamic Programming*, Annals of the CIRP, Vol. 55, pp. 473-478.
- [58] MONOSTORI, L., VÁNCZA, J., KIS, T., KÁDÁR, B., VIHAROS, ZS., J., 2006, *Real-Time, Cooperative Enterprises: Requirements and Solution Approaches*, Preprints of the 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, INCOM-2006, May 16-19, 2006, Saint Etienne, France pp. 591-596.
- [59] PETROVIC, D., DUENAS, A., 2006, *A Fuzzy Logic Based Production Scheduling/Rescheduling in the Presence of Uncertain Disruptions*, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 157, pp. 2273-2285.
- [60] *Production Scheduling Portal*,
http://www.production scheduling.com/production_scheduling_books.html
- [61] QUADT, D., KUHN, H., 2007, *A Taxonomy of Flexible Flow Line Scheduling Procedures*, European Journal of Operational Research, Vol. 178, pp. 686-698.

-
- [62] RANGSARITRATSAMEE, R., FERRELL, W., G., KURZ, M., B., 2004, *Dynamic Rescheduling that Simultaneously Considers Efficiency and Stability*, Computers and Industrial Engineering, Vol. 46, No. 1, pp. 1-15.
- [63] SMITH, K., L., EVERSON, R., M., FIELDSEND, J., E., 2004, *Dominance Measures for Multi-Objective Simulated Annealing*, Proceedings of the 2004 Congress on Evolutionary Computation, CEC 2004, June 19-23, 2004, Portland OR, USA, pp. 23-30.
- [64] SOMLÓ, J., 2006, *Új utak a gépipari rendszerek gyártásütemezésében*, Gyártás-2006 Magyar Tudományos Konferencia, pp. 155-161.
- [65] SOMLÓ, J., SAWKIN, A., V., 2006, *Periodic and Transient Switched Serves Schedules for FMS*, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 22, pp.93-112.
- [66] SOMLÓ, J., SAWKIN, A., V., ANUFRIEV, A., KONCZ, T., 2004, *Pragmatic Aspects of the Solution of FMS Scheduling Problems using Hybrid Dynamical Approach*, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 20, No. 1, pp. 35-49.
- [67] TÓTH, T., ERDÉLYI, F., 2006, *New Consideration of Production Performance Management for Discrete Manufacturing*, Proceedings of the 8th International Conference on The Modern Information Technology in the Innovation Processes of the Industrial Enterprises, September 11-12, 2006, Budapest, Hungary, pp. 435-444.
- [68] VAIK, ZS., 2005, *On Scheduling Problems with Parallel Multi-Purpose Machines*, Technical Report TR-2005-02, MTA-ELTE EGRES, Egerváry Research Group on Combinatorial Optimization.
- [69] VÁNCZA, J., MÁRKUS, A., 2000, *An Agent Model for Incentive-based Production Scheduling*, Computers in Industry, Vol. 43, No. 2, pp. 173-187.
- [70] VIEIRA, G., HERMANN, J., LIN, E., 2000, *Predicting the Performance of Rescheduling Strategies for Paralell Machines Systems*, Journal of Manufacturing Systems, Vol. 19, No. 4, pp. 256-266.
- [71] VIEIRA, G., HERMANN, J., LIN, E., 2003, *Rescheduling Manufacturing Systems: A Framework of Strategies, Policies and Methods*, Journal of Scheduling, Vol. 6, No. 1, pp. 35-58.
- [72] VÍZVÁRI B., 2004, *Ütemezéselmélet*, IVÁNYI, A., (szerk.), *Informatikai algoritmusok* 9. fejezete, p. 364-415, ELTE Eötvös Kiadó.
- [73] VÍZVÁRI, B., DÓSA, GY., 2004, *Az LPT(k)' algoritmus egyforma párhuzamos gépek ütemezésére*, Alkalmazott Matematikai Lapok, Vol. 21, pp. 269-289.
- [74] WANG, W., 2005, *Flexible Flow Shop Scheduling: Optimum, Heuristics, and Artificial Intelligence Solutions*, Expert Systems, Vol. 22, No. 2, pp. 78-85.
- [75] YANG, Y., KREIPL, S., PINEDO, M., 2000, *Heuristics for Minimizing Total Weighted Tardiness in Flexible Flow Shops*, Journal of Scheduling, Vol. 3, No. 2, pp. 89-108.

-
- [76] ZDANSKY, M., POZIVIL, J., 2002, *Combination Genetic/Tabu Search Algorithm for Hybrid Flowshops Optimization*, Proceedings of ALGORITMY 2002 Conference on Scientific Computing, pp. 230-236.
- [77] ZHU, X., WILHELM, W., E., 2006, *Scheduling and Lot Sizing with Sequence-Dependent Setup: A Literature review*, IIE Transactions, Vol. 38, pp. 987-1007.

NEW SCIENTIFIC RESULTS

Thesis 1 A new extended flexible flow shop scheduling model and its computer representation.

I defined a new class suitable for solving extended flexible flow shop (EFFS) problems. I elaborated a special model representation for computer application to be developed. The novelty of this model representation is as follows: it is able to take into consideration the most important general characteristics and requirements of customized mass production (CMP).

Thesis 2 Multi-phase heuristic method for solving EFFS scheduling problems.

A new integrated approach based method has been developed for solving fine scheduling problems, which can be managed by the EFFS model. The method supports the decision making of joining and/or dividing the production orders, calculation of the manufacturing lot sizes dynamically, management of the alternative technological routes, allocation of the machine resources, definition of the manufacturing tasks and scheduling its execution processes. The aforementioned method uses heuristic algorithms, searching techniques and problem space transformation based on execution simulation.

Thesis 3 A new method for relative qualification of the feasible solutions of a multi-objective combinatorial optimization problem.

A mathematical model and a solving method have been developed for managing the objective functions and evaluating the relative quality of the feasible solutions by comparing them to each other. The model has been applied to multi-objective combinatorial optimization problems, which include objective functions characterized by dynamically varying importance, different dimension and value range.

Thesis 4 An integrated fine scheduling model for supporting uncertainty management in customized mass production.

A new integrated model has been developed and its computer (software) representation has been implemented for supporting the scheduling and rescheduling tasks of the shop floor control and uncertainty management at the MES level. The solution is suitable for managing some problems of shop floor control in an integrated and extended functional form.