

MISKOLCI EGYETEM DOKTORI (PHD) TÉZISFÜZETEI



HATVANY JÓZSEF INFORMATIKAI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

**KITERJESZTETT MODELLEK ÉS MÓDSZEREK
ERŐFORRÁS-KORLÁTOS
TERMELÉSÜTEMEZÉSI FELADATOK MEGOLDÁSÁRA**

KÉSZÍTETTE:

DR. KULCSÁRNÉ FORRAI MÓNIKA

OKLEVELES MÉRNÖK-INFORMATIKUS

AKI DOKTORI (PHD) FOKOZAT ELNYERÉSÉRE PÁLYÁZIK

TÉMAVEZETŐ:

DR. ERDÉLYI FERENC

A MŰSZAKI TUDOMÁNY KANDIDÁTUSA

A DOKTORI ISKOLA VEZETŐJE:

PROF. DR. VÉGH JÁNOS

A FIZIKAI TUDOMÁNYOK DOKTORA

MISKOLC, 2017

TARTALOM

Tartalomjegyzék

1. A kutatás tématerülete	3
2. A kutatáshoz kapcsolódó alapvető termelésütemezési modellek áttekintése ...	4
2.1. Az ütemezési feladatok alapvető jellemzői	4
2.2. Ütemezési feladatok változatossága az erőforrások és operációk szempontjából	5
2.3. Ütemezési feladatok változatossága a munkák szempontjából	6
2.4. Ütemezési feladatok változatossága az ütemezési célok szempontjából ...	7
3. Az alkalmazott módszerek	8
4. A kutatómunka összefoglalása	9
5. Új tudományos eredmények.....	11
6. Az eredmények hasznosítása.....	13
7. Saját publikációk	15
8. Az értekezésben hivatkozott publikációk.....	16
New Scientific Results	21

1. A KUTATÁS TÉMATERÜLETE

Napjainkban a termelő vállalatoknak és a termelési hálózatoknak fokozódó piaci kihívásokkal kell szembenézniük. A globalizált piaci környezetben a versenyképesség növelése érdekében rendkívül fontos, hogy a termelő vállalatok minél gyorsabban alkalmazkodjanak a körülmények változásaihoz. Ennek érdekében folyamatosan javítani kell a termelési folyamatok hatékonyságát és rugalmasságát, az erőforrások kihasználtságát és a szállítókészséget, a készletek alacsony szinten tartása mellett.

Ezeket a feladatokat a termelés-menedzsment „gyártásirányítás” funkciója oldja meg. A gyártásirányítás olyan irányítási feladat, amely valós időben irányítja és felügyeli a gyártórendszerben zajló termelési folyamatokat. A gyártásirányítás az előre megtervezett, és a gyártási programokban rögzített aktuális célokat igyekszik megvalósítani, alkalmazkodva a fellépő bizonytalanságokhoz, és törekedve az eredmények adott feltételek (korlátozások) melletti optimalizálására. A gyártásirányításnak kell gondoskodnia az ütemezett feladatok végrehajtásához szükséges anyagok (alapanyag, komponensek, beépülő részegységek), erőforrások (munkaerő, gép, szerszám, eszköz, stb.) és információk (tervek, programok, utasítások, adatok stb.) rendelkezésre állásáról is.

A gyártásirányítási rendszer gondoskodik a gyártási feladatok megfogalmazásáról, ütemezéséről, kiosztásáról, elindításáról, a kivitelezés irányításáról, valamint a végrehajtás felügyeletéről és minőségének biztosításáról. A gyártásirányítás meghatározó funkciója a felettes termelésstervezési szinttől kapott középtávú termelési tervek rövidtávú finomprogramokká alakítása. A finomprogramozás során meg kell vizsgálni a szükséges technológiai tervek, anyagok és erőforrások rendelkezésre állását, fel kell térképezni a korlátozásokat és lehetőségeket. Ezt követően kerülhet csak sor az operációk és erőforrások egymáshoz rendelésére, továbbá az egyes munkák indítási sorrendjének és időpontjainak meghatározására.

A diszkrét gyártási folyamatok – a terméktől függően – sokfélék és technológiájuk is nagyon eltérő lehet, ezért a gyártási finomprogramok gyors és optimalizált (automatikus vagy fél-automatikus) elkészítése megfelelő modelleket, algoritmusokat és implementált szoftvereket igényel. A finomprogramozási funkció hatékony megvalósításának fontos feltétele a felmerülő ütemezési feladatok pontos megfogalmazása és a megoldások értékelése.

Egy termelésprogramozási feladat megfogalmazása során három alapvető körülményt kell megvizsgálni és a kapcsolódó kérdéseket pontosan megválaszolni. Ezek a következők:

1. Az erőforrás-környezet definíciója. Ez magában foglalja az ütemezési feladatban szereplő erőforrások (gépek, munkahelyek, dolgozók) jellemző

tulajdonságait és a közöttük lévő kapcsolatrendszer, különös tekintettel a munkákhoz tartozó operációk (műveletek) végrehajtásának jellemzőire.

2. A munkák (job-ok) definíciói. A munkák tulajdonságain kívül ez tartalmazza a munkákra vonatkozó előírásokat, korlátozásokat, végrehajtási jellemzőket és megengedett alternatívákat.
3. Az aktuális termelési politika definíciója. Ez prioritások, szabályok, célfüggvények, menedzser indexek rendszere, amely az ütemezés irányítási környezetét írja elő. Rendszerint számszerűsített teljesítménymutatók formájában.

Az ütemezési feladatok változatossága megnehezíti olyan modellek és szoftverek kidolgozását, amelyek könnyen és gyorsan adaptálhatók adott termelési rendszer gyártásirányításának támogatására. Az elméleti eredmények gyakorlati bevezetése ezért általában jelentős szakértői munkát igényel. Ennek hatékony támogatását az ütemezési feladatok modelljeinek, a megoldó módszereknek és a szoftver alkalmazások fejlesztésének kutatási eredményei biztosíthatják.

2. A KUTATÁSHOZ KAPCSOLÓDÓ ALAPVETŐ TERMELÉSÜTEMEZÉSI MODELLEK ÁTTEKINTÉSE

2.1. AZ ÜTEMEZÉSI FELADATOK ALAPVETŐ JELLEMZŐI

Általános értelemben az ütemezés elvégzendő munkák időbeli kiosztását (hozzárendelését és időzítését) jelenti rendelkezésre álló erőforrások között. A munkák és az erőforrások típusai nagyon sokfélék lehetnek és együttesen erősen függenek az aktuálisan vizsgált szituációtól. Az ütemezési feladatok kombinatorikus optimalizálási problémákhoz vezetnek, amelyekben az előzetesen meghatározott célfüggvény vagy célfüggvények szélsőértékét (minimumát vagy maximumát) eredményező megoldás megkeresésére törekszünk az előírt korlátfeltételek betartása mellett.

Az ütemezési problémákban a „munka” (job) rendszerint elvégzendő műveletek (operációk) halmaza. A termelésütemezési feladatokban a munka adott számú munkadarab együttesét is jelenti. Az adott munkadarab-halmaz egyedein előre definiált műveleteket kell elvégezni a technológiai tervben megadott módon. Az erőforrások képesek elvégezni a szükséges műveleteket a munkadarabokon, ezáltal végrehajtják a munkákhoz tartozó operációkat. Az ütemezési feladatok esetében a valós erőforrások modellje absztrakt virtuális entitással jellemezhető (ilyenek a szerszámgépek, technológiai berendezések, robotok, szakmunkások, operátorok, dolgozók, munkahelyek, szerszámok, készülékek, vezérlő programok stb.).

Egy ütemezési feladat végső megoldása az „ütemterv”, amely a munkák operációinak a kiválasztott erőforrásokon (erőforrásokkal) történő időbeli végrehajtását definiálja.

Az ütemezéssel kapcsolatos döntések meghozatala alapvetően prediktív és reaktív módon történhet. A gyakorlatban jelenleg inkább elterjedt prediktív ütemezés

meghatározott időközönként, adott időszakra előre készít aktuális gyártási ütemtervet [45], [44], [38]. Egyre nagyobb azonban az igény a bizonytalanságok és a váratlan események gyors kezelésére. Ezt a célt szolgálja a reaktív ütemezés, melynek során a rendszerben bekövetkező események hatására valamilyen döntési logika alapján kerül kiválasztásra a szituációnak leginkább megfelelő beavatkozási tevékenység [47], [48], [4], [37], [13], [20], [31].

2.2. ÜTEMEZÉSI FELADATOK VÁLTOZATOSSÁGA AZ ERŐFORRÁSOK ÉS OPERÁCIÓK SZEMPONTJÁBÓL

A témakör elméletével foglalkozó kutatók többsége főként operációkutatási szempontok szerint vizsgálja az ütemezési feladatokat [10], [38], [39]. Az erőforrás-környezet szempontjából legegyszerűbb az egygépes (Single Machine) ütemezési modell típus, amelyben minden munka esetében egyetlen operációt kell végrehajtani, és csupán egy gép (erőforrás) terhelhető [27].

A párhuzamos gépes modellek (Parallel Machines) alapvető jellemzője, hogy minden munka esetében csupán egyetlen operációt kell végrehajtani, de több gép dolgozhat párhuzamosan különböző munkákon. A gépek képességeit figyelembe véve három további kategóriát különböztethetünk meg [10], [38], [12]:

- teljes mértékben egyenértékű gépek csoportja (Identical Parallel Machines);
- egymástól különböző állandó intenzitás-értékkel működő gépek csoportja (Uniform Parallel Machines);
- munkától függő intenzitás-értékekkel működő gépek csoportja (Unrelated Parallel Machines).

A szakirodalomban sok cikk ad részletes áttekintést a párhuzamosan működő gépek ütemezési modelljeiről, azonban Weng és társai [50] valamint Lamothe és társai [26] felhívták a figyelmet arra, hogy a korlátozott gyártási képességeket, átállási időket és másodlagos erőforrás-korlátokat együttesen kezelő modellek száma sokkal kisebb.

A műhelymodellek esetén több munka, több operáció és több gép tartozik a rendszerhez. Minden munka több operációból állhat. Minden egyes operációt egy adott gép végezhet el. Az operációk száma lehet munkánként eltérő vagy azonos (General Shop). Különböző előírás vonatkozhat a munkák operációinak számára és sorrendjére [10]:

- minden munka esetében azonos (Flow Shop),
- kötött, de munkánként eltérő lehet (Job Shop),
- nem korlátozott (Open Shop),
- a felsorolt alaptípusok kombináltan egyszerre is előfordulhatnak (Mixed Shop).

A rugalmas műhelymodellekben (Flexible Flow Shop, Flexible Job Shop stb.) a rugalmas jelző (flexible) az ütemezési modellekhez kapcsolva arra utal, hogy míg az alap műhelymodellekben egy adott operáció végrehajtására egyetlen gép alkalmas csupán, addig a rugalmas modellben az adott operációt a gépek egy meghatározott

csoportjába (halmazába) tartozó bármelyik gép elvégezheti. Ezáltal az alap műhelymodell kibővül operációhoz kapcsolódó gépválasztási feladattal, ugyanakkor továbbra is alapvető szerepet játszik a munkák gépenkénti sorrendjének és indítási időpontjának meghatározása. A gépcsoport gépei egymással párhuzamosan működő egyenértékű, részben azonos vagy különböző intenzitás- és más paraméterértékekkel rendelkező gépek lehetnek. Jellegzetes példái a rugalmas műhelymodelleknek a rugalmas egyutas (Flexible Flow Shop, FFS) és a rugalmas többutas (Flexible Job Shop, FJS) modell típusok [2], [32], [40], [49], [15], [11].

A kiterjesztett rugalmas modellek (Extended Flexible Flow Shop, Extended Flexible Job Shop stb.) esetén vannak a rendszerben olyan erőforrások (gépsorok, munkahelyek), amelyek összevontan több operációt tudnak végrehajtani. Az operáció helyett nagyobb egységek (technológiai lépések, végrehajtási lépések) tekinthetők az ütemezés alapegységeinek [23], [24], [s11].

A vázolt modell típusok további speciális képességekkel bővíthetők. Ezek közé tartoznak a többcélú gépeket is integráló modell típusok (Multi-Purpose Machine, MPM), melyekben egy adott gép többféle operáció elvégzésére alkalmas (több halmazhoz tartozik). A rugalmas gyártórendszerekben gyakran egy adott gép több különböző szerszámot, készüléket, programot stb. használhat, így átállítást követően többféle operáció elvégzésére is alkalmas különböző időkben (átlapolódás nélkül).

Az ütemezési modellekkel szemben támasztott követelmények között szerepel az igényelt erőforrásokra vonatkozó aktuális korlátozások minél pontosabb definiálása. Ebbe a kategóriába tartoznak például az erőforrások (pl. gépek, személyek, eszközök) időbeli rendelkezésre állására vonatkozó előírások [2], az erőforrások (pl. megmunkáló gépek, műveletközi tárolók) kapacitáskorlátai, az erőforrások (pl. szerszámok, készülékek) alkalmazhatóságára vonatkozó korlátozások.

A korlátozottan rendelkezésre álló párhuzamos gépek ütemezési modelljeivel és módszereivel viszonylag sok cikk foglalkozik. Ezekről részletes összefoglalást adnak például a [17] és [19] publikációk. Ehhez a témakörhöz szorosan kapcsolódik az értekezésben szereplő modellek és módszerek többsége. Az értekezés erőforráskörnyezet szempontjából szorosan kapcsolódik a rugalmas gépcsoportokból (stage) összekapcsolt gyártórendszerek ütemezési problémáihoz is, amikor a gépek rendelkezésre állása nem folyamatos. Ilyen feladatokról ad jó áttekintést például a [2] és [35] cikk.

2.3. ÜTEMEZÉSI FELADATOK VÁLTOZATOSSÁGA A MUNKÁK SZEMPONTJÁBÓL

A legtöbb esetben a munkák operációi nem szakíthatók meg, azonban vannak olyan szituációk, amikor megengedett az operációk végrehajtásának felfüggesztése majd egy későbbi időpontban való újraindítása. Ez utóbbi esetben az ütemező döntési hatásköre jelentősen kibővül. Hasonló változást eredményez az is, ha megengedett a munkák kisebb egységekre bontása és/vagy nagyobb egységekbe való összevonása. Újabb elvárásokat generál, ezáltal további modellbővítést indokol a munkák

végrehajtásához kapcsolódó minőségi jellemzők figyelembevételének igénye is (pl. közbenső minőségellenőrzés után a művelet ismételt végrehajtása szükséges). További jelentős kiterjesztést igényel a változtatható intenzitás-paraméterek alkalmazhatóságának és a helyettesítő komponensek rendelkezésre állásának figyelembe vétele.

A modellekkel szemben támasztott követelmények között szerepel a munkákra vonatkozó aktuális korlátozások minél pontosabb definiálása. Ebbe a kategóriába tartoznak például:

- az indításra és/vagy befejezésre vonatkozó időbeli előírások [27],
- a munkák között fennálló megelőzési relációk [14],
- a munkák gépekhez rendelésére vonatkozó korlátozások [33], [29],
- a munkák operációinak megkezdését lehetővé tevő átállítási/beállítási időtartamok [1]
- a logisztikai feladatok kezelése [28], stb.

Komoly elvárást támaszt az ütemezési modellekkel szemben a rendszerben jelenlévő párhuzamos végrehajtású munka (Multiprocessor Task, MPT): Ilyen esetben egy párhuzamos végrehajtású munka rendelkezik legalább egy olyan operációval, amelynek végrehajtásához egyszerre egynél több erőforrásra (gépre, dolgozóra, szerszámra stb.) van szükség a teljes műveleti idő alatt (egyidejűleg több erőforrást foglal).

2.4. ÜTEMEZÉSI FELADATOK VÁLTOZATOSSÁGA AZ ÜTEMEZÉSI CÉLOK SZEMPONTJÁBÓL

A termelés lokális (munkahelyi), rendszer (műhely) szintű és globális (vállalati) céljai (pl. stabilitás, kihasználtság, készletek, átfutási idők, csúszások, minőség, piaci pozíció, profit, hatékonyság javítása stb.) igen eltérőek, esetenként ellentmondóak is lehetnek. A gyorsan változó piaci környezet és az arra történő gyors reagálás az egyes szinteken felállított célok felülvizsgálatát és megváltoztatását is eredményezheti. Fontos elvárás tehát, hogy a modern ütemezési modellek – a termelési politika változó céljainak megfelelően – többkritériumos szemléletűek legyenek és támogassák az időben változó célok elérését.

A szakirodalomban publikált ütemezési modellek többsége csupán egyetlen elsődleges célfüggvény optimalizálása koncentrálna. Az igény szerinti rugalmas gyártás szempontjából kiemelkedően fontos többcélú optimalizálási szemlélet sokkal kevesebb ütemezési modellben jelenik meg [34], [43].

Az ütemezési feladatban alkalmazható optimalizálási célfüggvények igen sokfélék lehetnek. Ezek a célok bizonyos esetekben a teljesítménymutatók (pl. költségek, késések, csúszások, befejezési időpontok, átfutási idők, várakozási idők, gépátállítások, készletszintek stb.) minimalizálását követelik meg. Más célok esetén a teljesítménymutatók (pl. gépi és emberi erőforrások kihasználása, áteresztőképesség, gyártási hatékonyság stb.) maximalizálása a követelmény. A célfüggvények gyakran egymástól sem függetlenek, kapcsolatrendszerük bonyolult, komplex feladatok

esetében nehezen modellezhető [8]. Az ilyen feladatoknak csak kivételes esetekben van olyan megoldása, amely az összes célfüggvény szempontjából egyszerre tekinthető optimálisnak. A korszerű ütemezési modelleknek lehetővé kell tenniük a változó célfüggvény-rendszerek definiálását. Ez a kiindulási alapja annak, hogy hatékony és rugalmas megoldási módszerek alkalmazásával kompromisszumos kvázi-optimális végrehajtható megoldás (vagy megoldás halmaz) elfogadható idő alatt előállítható legyen.

A gyakorlat szempontjából fontos elvárás, hogy nemcsak optimum-közeli, hanem robusztus ütemtervet kell előállítani több, prioritással ellátott cél esetén. Robusztus ütemterveknek nevezhetjük az ütemtervek olyan csoportját, amely a reaktív (előre nem vagy csak nagy bizonytalansággal tervezhető eseményekre adandó válasz) tevékenységeket a lehető legjobban támogatja (pl. a KPI mutatók értéke valamilyen időátlag definíció szerint optimális).

Az ütemezési feladatok és a szükséges modellek változatossága megnehezíti olyan szoftverek kidolgozását, amelyek könnyen és gyorsan adaptálhatók adott termelési rendszer gyártásirányításának támogatására. A korszerű gyártásirányítást támogató szoftverek (Manufacturing Execution System, MES) ISA-95 alapú modellje a következő négy funkcionális fő komponenszt definiálja [42]: (1) termelésirányítás, (2) üzemfenntartás, (3) minőségbiztosítás, (4) készlet-gazdálkodás. A termelésirányítás (termelés-menedzsment) szolgáltatásai között kiemelt szerepet kap az ütemezés és az újraütemezés [16]. Ezek támogatása érdekében erőteljes nemzetközi kutató munka folyik világszerte. Az elméleti eredmények gyakorlati bevezetése azonban további jelentős implementációs szakértői munkát igényel.

3. AZ ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

A termelésütemezés és finomprogramozás végrehajtása, kezelése dinamikus modelleket igényel. A feladatok bonyolultsága és összetettsége miatt az ismert modellek bővítése és új modellek kidolgozása egymáshoz szorosan kapcsolódó tudományterületek eredményeire támaszkodva valósítható meg. A modellezés során alapvetően a termelésinformatika, a diszkrét matematika, az ütemezés-elmélet, valamint a mesterséges intelligencia modelljeinek, módszereinek és eredményeinek kombinált alkalmazására támaszkodtam. Kezdetben a szakirodalomban publikált modelleket tanulmányoztam és a vizsgáltam néhány új, a gyakorlatban felmerült probléma sajátosságait. Ebben nagy segítségemre voltak a Miskolci Egyetem Alkalmazott Informatikai Intézeti Tanszék K+F+I projektjeiben résztvevő kollégáim. A fő kutatási irányok kitűzésében témavezetőm Erdélyi Ferenc javaslataira támaszkodtam. A vizsgált problémakört a tanulmányozott valós ipari feladatok igényei tovább konkretizálták. A megfelelő megoldásokat a megismert konkrét vállalati igényekre figyelemmel kerestem.

A kutatómunkám során a felmerült részfeladatokhoz kapcsolódó ismereteket összegyűjtöttem. Az ismert eredményekre alapozva kerestem alkalmas kiindulási modelleket. Ezt követően fogalmaztam meg az ütemezési feladatok és részfeladatok problémás, még meg nem oldott elemeit.

A szakirodalom tanulmányozása során példák sokaságán keresztül egyértelművé vált, hogy a vizsgálatra kitűzött ütemezési feladatoknál jóval egyszerűbb feladatok esetében sem lehet polinomiális idő-költségű algoritmust készíteni optimális megoldásra, ezért heurisztikus és meta-heurisztikus megoldási módszerekkel foglalkoztam. Olyan megoldó eljárás-mintákat kerestem, vizsgáltam, módosítottam és bővítettem, amelyek más feladatokban már eredményesek voltak.

A kiválasztott feladatok sajátosságaihoz illeszkedő új modellváltozatokat dolgoztam ki, és ezeket szimulációval elemeztem. A tapasztalatok alapján módosítottam, finomítottam és pontosítottam a modellek részleteit, a feladatmegoldás koncepcióját és egyes eljárás-elemeit. Megfelelő eredmények elérése után szigorúbb követelményrendszerrel és kiterjesztett célok kitűzésével bővítettem modelljeimet.

A kidolgozott modellek implementálásában nagy segítségemre volt intézetünk termelésinformatikai kutató csoportja. Mérnök- és gazdasági-informatikus hallgatók, TDK, projekt-feladat, szakdolgozat és diplomamunka keretében – Kulcsár Gyula vezetésével – sok alkalmazás-fejlesztési részfeladatot oldottak meg az általam kidolgozott új modelleken. Így például eljárások módosítása, szoftver alkalmazások futási sebességének növelése, más információ-technológia részletkérdések megoldása nem tartoztak szorosan kutató munkám feladatai közé, azokat a témakörrel foglalkozó társaim önálló kutatómunka keretében vizsgálták és vizsgálják jelenleg is. (Pl. párhuzamos algoritmusok, GPGPU alapú programozás, in-memory computing stb.)

A tézisek érvényességét – a mesterségesen létrehozott adatokon végzett futtatási tesztek kedvező tapasztalatait követően – valós problémák ipari környezetben történő megoldásával igazoltam. Ehhez konkrét termelési rendszerek műszaki specifikációi és ipari adatbázis adatok kerültek felhasználásra, ipari partnerek bevonásával és engedélyével.

A kapcsolódó K+F+I projektek tapasztalatait is felhasználva, a tudományos eredményeket konferenciákon mutattam be és folyóiratokban is publikáltam.

4. A KUTATÓMUNKA ÖSSZEFOGLALÁSA

A PhD értekezésemben bemutatom az erőforrás-korlátos ütemezési feladatok modellezésével és megoldásával kapcsolatban végzett kutatómunkám eredményeit. A vizsgálatom az igény szerinti rugalmas gyártás (Make to Order, MTO) különböző kiterjesztett ütemezési feladattípusainak modellezésére és gyakorlat-orientált megoldására irányult.

Kutatómunkám során a következő két főirányt követtem:

I. Az első főirány az ismert EFFS (Extended Flexible Flow Shop) ütemezési modell bővítése volt.

- Ez vonatkozik egyrészt a gyártási folyamat logisztikájával kapcsolatos kérdések részletes vizsgálatára, korlátozott méretű átmeneti tárolók, anyagmozgatási idők figyelembevételére és hatásuk vizsgálatára.
- Egy másik fontos fejlesztési irány a bővített modellel kezelhető ütemezési feladatok körének szélesítése. Ide tartoznak például a részben kötött munkasorrendekre, valamint a gyártási és logisztikai sorozatnagyságokra vonatkozó előírásokból eredő feladatok kezelésére irányuló kutatások.
- A bővítés egy speciális iránya az emberi erőforrások és gépi erőforrások szinkronizálása az ún. „műszakbeosztások” integrált kezelésével (döntési változó és/vagy korlátfeltétel alkalmazásával).

II. A kutatás második főiránya a prediktív ütemezési és reaktív újraütemezési módszerek bővítése és továbbfejlesztése volt, integrált proaktív szemléletű kombinált ütemezési módszer irányába. Az ilyen modell és feladatmegoldó rendszer különösen alkalmasnak látszik a „lehívásos” jellegű beszállító rendszerek finomprogramozási feladatainak megoldására.

- A megrendelésre és raktárra gyártás együttes ütemezése esetén fontos szempont a beszállítói szerződésekben rögzített cikkenként eltérő minimális készletszintek fenntartása és a szigorú határidős direkt rendelések (lehívások) egyidejű kiszolgálása (termelésstervezési, készletezési és finomprogramozási funkciók integrációja).
- További kihívást jelent a művelet-végrehajtás előkészítésére vonatkozó különleges (pl. gyártási egységek előkészítésére vonatkozó) korlátozások betartásából származó feladatok modellezése.
- A vizsgált feladattípus egy további sajátossága az osztott hozzáférésű kiegészítő erőforrások (szerszámok, készülékek és dolgozók) „multiprocessor task” jellegű kiosztási problémáinak kezelése változó erőforrás-korlátos ütemezési feladatok modellezésével és megoldásával (finomprogramozási és erőforrásgazdálkodási funkciók integrációja).

Az értekezésben bemutatom a vizsgált diszkrét gyártó-szerelő rendszereket, a hozzájuk kapcsolódó termelési, előkészítési és logisztikai folyamatokat, a kidolgozott új erőforrás-korlátos ütemezési modelleket, a megoldási koncepciókat, a fontosabb algoritmusokat és a kifejlesztett új ütemezési célfüggvény-rendszereket.

Az értekezés 3. fejezetében összefoglalom a kutatómunkám első szakaszában vizsgált háztartási nagygépek diszkrét alkatrészgyártási és szerelési fázisainak szinkronizálására kidolgozott termelésprogramozási modelleket. A modellezett

erőforrás-korlátos gyártó-szerelő rendszer legfontosabb jellemzői közé tartoznak az alternatív technológiai útvonalak, a korlátozottan rendelkezésre álló gépek, a korlátozott méretű műveletközi tárolók, az eltérő műveletvégzési, átállítási és anyagmozgatási idők valamint a szigorú belső határidős munkák. A probléma megoldása magába foglalja a munkák erőforrásokhoz rendelését, ütemezését és az erőforrások műszakbeosztásának meghatározását is.

Az értekezés 4. fejezetében részletesen bemutatom egy járműipari összetett termelésprogramozási feladat modellezését és megoldását. A feladat egyik jellegzetessége, hogy többféle osztott hozzáférésű erőforrást kell egyidejűleg kiosztani és párhuzamos végrehajtású munkákat kell ütemezni szigorú határidős gyártási rendelések teljesítése érdekében. A probléma egy másik sajátossága, hogy a termelésütemezés és a készletgazdálkodás egy kombinált új feladatát kell egyidejűleg megoldani úgy, hogy a technológiai főfolyamatok mellett a szerszám-előkészítési mellékfolyamatokat beágyazott részfeladatként szintén ütemezni kell.

5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. tézis: **Műszakbeosztások igény-vezérelt tervezési módszere termelési finomprogramokban.**

Kidolgoztam egy igény-vezérelt műszakbeosztási modellt az emberi erőforrások és gépi erőforrások szinkronizálására, amely az erőforrások rendelkezésre állási időintervallumait döntési változóként és/vagy korlátfeltételként képes kezelni a termelési finomprogramozási feladatokban. Új módszert dolgoztam ki a fenti finomprogram-tervezési feladat megoldására a diszkrét gyártó-szerelő rendszerek ütemezési és műszakbeosztási feladatainak integrált megoldásával.

Az integrált tervezési módszer fontosabb jellemzői:

- 1.1. A műszakbeosztásra vonatkozó modell-kiterjesztés tetszőleges típusú termelésütemezési feladat esetében alkalmazható.
- 1.2. A szinkronizált feladatmegoldás kétfázisú: Az első fázisban az erőforrásokhoz önállóan konstansként definiált időintervallumok rendelhetők (korlátfeltételek). A második fázisban az ütemezési feladat megoldása során kialakuló aktuális terhelések alapján véglegesíthető az aktív műszakok kiosztása (döntési változók).
- 1.3. A műszakok költségének minimalizálása érdekében kidolgoztam egy új „relatív műszakköltség” szemléletű célfüggvény koncepcióját.
- 1.4. A kidolgozott módszerrel az ütemezési és a műszakbeosztási feladat egyidejűleg megoldható egy bővített többoperátoros és többcélú keresési technikával (MOMOTS, Multi-Operator and Multi-Objective Tabu Search). A kiindulási (alap) ütemezési feladat választott kereső algoritmusának módosító operátora

(vagy operátorai) kiegészítendők a műszakbeosztást módosító operátorokkal, továbbá az eredeti célfüggvények a műszakbeosztásra vonatkozó célfüggvényekkel.

- 1.5. Az integrált megoldási módszer – a fentiekén túlmenően – támogatja az alternatív technológiai útvonal változatok menedzselését, az anyagmozgatási idők és korlátozott méretű műveletközi tárolók figyelembe vételét, valamint a rendelési, gyártási és logisztikai sorozatnagyságok megkülönböztetését és kezelését.
- 1.6. Egy nagyméretű, valós ipari feladat megoldásán keresztül igazoltam, hogy az új koncepció alkalmas diszkrét alkatrészgyártási és szerelési folyamatok termelésütemezési és műszakbeosztási feladatainak integrált megoldására.

Az 1. tézisben összefoglalt eredményeket az értekezés 3. fejezetében részletesen ismertettem, valamint az [s4], [s3], [s5], [s7], [s9], [s10], [s11], [s12], [s14], [s15], [s17], [s16] publikációkban is bemutattam.

2. tézis: Proaktív szemléletű modell és kombinált ütemezési módszer a „lehívásos” jellegű alkatrészgyártó rendszerek finomprogramozási feladatainak megoldására.

Új modellt és megoldási módszert dolgoztam ki a megrendelésre és raktárra gyártás együttes ütemezésére, amely alkalmas a beszállítói szerződésekben rögzített cikkenként eltérő minimális készletszintek fenntartására és a szigorú határidős direkt rendelések (lehívások) egyidejű kiszolgálására. A termelésütemezés és az igény-vezérelt készletgazdálkodás integrációján túlmenően a javasolt modellezési szemlélet lehetővé teszi a gyártási főfolyamatok ütemezésének és a kapcsolódó előkészítési tevékenységek ütemezésének együttes megoldását is.

A modell fontosabb jellemzői:

- 2.1 A kidolgozott IPSIC modell alapvetően az autóiipari üléselemek gyártási jellemzői és követelményei alapján készült (párhuzamosan működő körpályás gyártósorok modellje), de más gyártástechnológiai környezetre is gyorsan adaptálható.
- 2.2 A modell együtt (integráltan) kezeli a határidős gyártási rendelések kiszolgálását és a cikkszámokként előírt készletszint-optimalizálást.
- 2.3 A modell figyelembe veszi az erőforrások sajátosságait és korlátozott rendelkezésre állásait.
- 2.4 Megvalósítja a gyártósorok szinkronizált átállítási (set-up) feladatainak ütemezését, figyelembe véve a gyártáselőkészítési feladatokat is.

2.5 Támogatja a gyártási feladatok elvégzéséhez szükséges osztott hozzáférésű szerszámok és készülékek konfigurálásának igény-vezérelt menedzselését az aktuális technológiai előírások és alternatívák szerint.

A 2. tézisben összefoglalt eredményeket az értekezés 4.1., 4.2., és 4.4. alfejezeteiben részletesen ismertettem, valamint az [s1], [s2], [s6], [s13] publikációkban is bemutattam.

3. tézis: Új modell és megoldási módszer egyoperációs, időben változó számú erőforrásos ütemezési feladatok megoldására.

Az egyoperációs határidős munkák ütemezésére kidolgoztam a $P(s) | p_i=1; r_i=integer; d_i=integer | L_{max}$ formalizmussal definiált modellt és annak egzakt megoldó algoritmusát. A modell legfontosabb újonsága, hogy a párhuzamosan működő erőforrások száma függhet az időtől. Kidolgoztam egy továbbfejlesztett JIT-orientált algoritmust, amely biztonsági vezérlő paramétereket használva a határidők betartása mellett csökkenti a munkák túl korai befejezését.

A modell és megoldási koncepció fontosabb jellemzői:

- 3.1 Egy valós ipari feladat által motivált igény alapján kidolgoztam egy új általánosított modellt, amely a szakirodalomban megtalálható $P | p_i=1; r_i=integer; d_i=integer | L_{max}$ modell kiterjesztésének és általánosításának tekinthető.
- 3.2 Az új modellel leírható feladatok megoldására polinomiális futási idejű egzakt megoldó algoritmust dolgoztam ki: Tartalékidő-orientált algoritmus (Slack-Oriented Algorithm).
- 3.3 A külső és belső forrásból érkező váratlan események káros hatásának csökkentése érdekében kidolgoztam egy továbbfejlesztett JIT-orientált algoritmust, amely biztonsági vezérlő paramétereket használva a határidők betartása mellett csökkenti a munkák túl korai befejezését.
- 3.4 A modell és a megoldási módszerek gyakorlati alkalmazása érdekében kidolgoztam egy speciális probléma-transzformációs eljárást, amely a formális modell és egy valós műhelyszintű ütemezési feladattípus egyértelmű megfeleltetését biztosítja.

A 3. tézisben összefoglalt eredményeket az értekezés 4.3. alfejezetében részletesen ismertettem, valamint az [s1], [s2], [s6], [s13] publikációkban is bemutattam.

6. AZ EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSA

Napjainkban a termelési rendszerek és folyamatok fejlesztésében, az ipari informatikai infrastruktúrák tervezésében, létrehozásában és működtetésében egyre

fontosabb szerepet játszanak a *kiber-fizikai gyártórendszerek (Cyber-Physical Production Systems)*, az *Ipar 4.0 (Industry 4.0)*, a *dolgok Internete (Internet of Things, IoT)*, a *felhőalapú számítás (Cloud Computing)*, és a *nagy adatmennyiség (Big Data)* paradigmák és technológiák. A rohamosan fejlődő informatikai és kommunikációs környezetben megnövekszik az igény az új technológiák által nyújtott szolgáltatások üzleti és automatizálási célú kiaknázására, többek között például integrált optimalizálási, innovatív döntéstámogató modellek és módszerek kidolgozására, valamint implementált szoftvereken keresztül ezek gyakorlati alkalmazására.

Az általam kidolgozott új modellek hozzájárulnak ehhez a fejlődéshez, mert a felsorolt technológiák lehetővé teszik a megfelelő bemenő adatok, a számítási kapacitás, az alkalmazási környezet biztosítását, ezáltal megvalósítható a modellek integrálása a vállalatok hagyományos és korszerű termelésinformatikai rendszerébe egyaránt.

Az értekezésben összefoglalt eredmények a diszkrét termelési rendszerekben folyó igény szerinti rugalmas gyártás és szerelés területein hasznosíthatók termelésstervezési, ütemezési, finomprogramozási és integrált döntéstámogatási feladatok megoldására.

A tézisek érvényességét – a mesterségesen létrehozott adatokon végzett futtatási tesztek kedvező tapasztalatait követően – valós problémák ipari környezetben történő megoldásával igazoltam. Ehhez konkrét termelési rendszerek műszaki specifikációi és ipari adatok kerültek felhasználásra ipari partnerek bevonásával (Electrolux Lehel Hűtőgépgyár, Jászberény; Fehrer Hungaria Járműipari Kft., Mór).

A kapcsolódó K+F+I projektek tapasztalatait is felhasználva, a tudományos eredményeket az irodalomjegyzékben felsorolt publikációk formájában konferenciákon mutattam be és folyóiratokban is publikáltam.

Az új modelleket bemutató részek végén – a 3.5., a 4.3.8., és a 4.5. alfejezetekben – összefoglaltam a kapcsolódó eredmények alkalmazási lehetőségeit.

A kidolgozott új modellek és algoritmusok, valamint a kapcsolódó ütemező szoftverek bekerültek a Miskolci Egyetemen folyó mérnökinformatikus és gazdaságinformatikus képzés termelésinformatikai specializációjának oktatásába az Alkalmazott Informatikai Intézeti Tanszék által gondozott „A termelésinformatikai alapjai”, a „Diszkrét termelési folyamatok számítógépes tervezése és irányítása”, és a „Virtuális vállalat” c. tantárgyak tananyagán keresztül.

Az eredmények ipari alkalmazási példák formájában részét képezik a Miskolci Egyetem online kurzusait menedzselő „MeMOOC Studio” szabad hozzáférésű (open online) keretrendszerben elérhető „Ütemezési modellek és algoritmusok” c. magyar nyelvű és „Scheduling Models and Algorithms” c. angol nyelvű kurzusnak is.

7. SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

- [s1] Kulcsárné Forrai, M., Kulcsár, Gy.: Modeling and Solving an Extended Parallel Resource Scheduling Problem in the Automotive Industry, *Acta Polytechnica Hungarica*, ISSN 1785-8860 (Paper Number: 3102, accepted).
- [s2] Kulcsárné Forrai, M., Kulcsár, Gy.: A New Scheduling Software for Supporting Automotive Component Manufacturing, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, ISSN 2195-4356, Vol. 1, pp. 257-274, 2017.
- [s3] Kulcsár, Gy., Kulcsárné Forrai, M.: Detailed Production Scheduling Based on Multi-Objective Search and Simulation, *Production Systems and Information Engineering*, ISSN 1785-1270, Vol. 6, pp. 41-56, 2013.
- [s4] Kulcsár, Gy., Kulcsárné Forrai, M.: Solving Multi-Objective Production Scheduling Problems Using a New Approach, *Production Systems and Information Engineering*, ISSN 1785-1270, Vol. 5, pp. 81-94, 2009.
- [s5] Bikfalvi, P., Erdélyi, F., Kulcsár, Gy., Tóth, T., Kulcsárné Forrai, M.: On Some Functions of the MES Applications Supporting Production Operations Management, In: Bognár, G., Tóth, T., (eds.) *Applied Information Science, Engineering and Technology: Selected Topics from the Field of Production Information Engineering and IT for Manufacturing: Theory and Practice*, (Topics in Intelligent Engineering and Informatics; 7.), ISBN:978-3-319-01918-5. Berlin: Springer-Verlag, pp. 103-129, 2014.
- [s6] Kulcsárné Forrai, M., Kulcsár, Gy., Új modell időben változó erőforrás-korlátos ütemezési feladatok megoldására, *Műszaki Tudományos Közlemények / Papers on Technical Science*, 3, ISSN 2393 – 1280, pp. 195-198, 2015.
- [s7] Kulcsár, Gy., Kulcsárné Forrai, M.: Kiterjesztett termelésprogramozási modell erőforrás-korlátos ütemezési feladatok megoldására, *Multidiszciplináris tudományok*, Vol. 4 (1), HU ISSN 2062-9737, pp. 19-30, 2014.
- [s8] Hadházy, P., Kulcsár, Gy., Kulcsárné Forrai, M., Magyar, D.: A FlexiForce Hungary Kft. termeléstervezési feladatának modellezése és heurisztikus megoldása, *Multidiszciplináris tudományok*, Vol. 3 (1-2), HU ISSN 2062-9737, pp. 305-316, 2013.
- [s9] Tóth, T., Kulcsár, Gy., Erdélyi, F., Kulcsárné Forrai, M., Bikfalvi, P.: Extended Models for Supporting CAPP-MES Integration in Discrete Production Systems, *Proceedings of The 16th International Conference on Machine Design and Production: UMTIK*, June 30 – July 03 2014, Izmir, Turkey, (ISBN:978-975-429-332-6 (1.c)), pp. 555-570, 2014.
- [s10] Tóth, T., Kulcsár, Gy., Erdélyi, F., Kulcsárné Forrai, M., Bikfalvi, P.: The Role of CAPP-MES Integration in the Cyber-Physical Production Systems Paradigm, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Tools and Methods of*

- Competitive Engineering: TMCE 2014, May 19-23, Budapest, Hungary, (ISBN:9789461861764; 9789461861771), pp. 1381-1392, 2014.
- [s11] Kulcsárné Forrai, M., Erdélyi, F., Kulcsár, Gy.: A New Extended Model for Solving Flexible Job Shop Scheduling Problems, Proceedings of the International Conference on Innovative Technologies, IN-TECH 2013, (ISBN:978-953-6326-88-4), Budapest, Hungary, 2013.09.10-2013.09.12. pp. 325-328, 2013.
- [s12] Kulcsár, Gy., Kulcsárné Forrai, M.: Detailed Scheduling Based on Simulation, Proceedings of the XXVI. microCAD International Scientific Conference, Miskolc, Hungary, 29th – 30th March, 2012, p. 6. (CD), 2012.
- [s13] Kulcsár, Gy., Kulcsárné Forrai, M.: Járműipari alkatrészgyártás termelésprogramozási feladatainak modellezése és megoldása, Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2016 konferencia, Miskolc, 2016, május 25. ISBN 978-963-7064-33-3, pp. 278-291. 2016.
- [s14] Kulcsárné Forrai, M., Kulcsár, Gy.: Termelésütemezési és műszakbeosztási feladatok integrált megoldása, Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2016 konferencia, Miskolc, 2016, május 25. ISBN 978-963-7064-33-3, pp. 292-304, 2016.
- [s15] Kulcsár, Gy., Kulcsárné Forrai, M.: Kiterjesztett rugalmas Job Shop ütemezési feladatok megoldása többcélú keresési módszer alkalmazásával, Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2013 konferencia, Debrecen, 2013, június 4. ISBN 978-963-7064-30-2, pp. 271-279, 2013.
- [s16] Kulcsárné Forrai, M.: Erőforrás-korlátos ütemezési feladatok szimulációval segített megoldása, In: Vadászné Dr Bognár Gabriella (szerk.) DOKTORANDUSZOK FÓRUMA Gépészmérnöki és Informatikai Kar Szekciókiadványa, Miskolc, p.6., 2013.
- [s17] Kulcsárné Forrai, M., Erdélyi, F.: Gyártásirányítási modellek és ütemezési célok, In: Vadászné Dr Bognár Gabriella (szerk.) DOKTORANDUSZOK FÓRUMA Gépészmérnöki és Informatikai Kar Szekciókiadványa, Miskolc, pp. 36-41, 2012.

8. AZ ÉRTEKEZÉSBEN HIVATKOZOTT PUBLIKÁCIÓK

- [1] Allahverdi, A., Ng, C. T., Cheng, T. C. E., Kovalyov, M. Y.: A survey of scheduling problems with setup times or costs, European Journal of Operational Research, Vol. 187, pp. 985-1032, 2008.
- [2] Allaoui, H., Artiba, A.: Scheduling two-stage hybrid flow shop with availability constraints, Computers and Operations Research, Vol. 33, pp. 1399-1419, 2006.
- [3] Askin, R. G., Standridge, C. R.: Modeling and Analysis of Manufacturing Systems, J. Wiley Inc., New York, 1993.

-
- [4] Aytug, H., Lawley, M. A., Mckay, K., Mohan, S., Uzsoy, R.: Executing production schedules in the face of uncertainties: a review and some future directions, *European Journal of Operational Research*, Vol. 161, pp 86-110, 2005.
- [5] Barkmeyer E., Denno P., Feng S., Jones A., Wallace E.: NIST Response to MES Request for Information, NISTIR 6397, National Institute of Standards and Technology, pp. 1-124, 1999.
- [6] Bauer, A., Bowden, R., Browne, J. Duggan, J.: *Shop Floor Control Systems - from Design to Implementation*, Chapman & Hall, UK, 1993.
- [7] Baykasoğlu, A., Özbakir, L., Dereli, T.: Multiple dispatching rule based heuristic for multi-objective scheduling of job shops using tabu search, *Proceedings of the 5th International Conference on Managing Innovations in Manufacturing*, Milwaukee, USA, pp. 396-402, 2002.
- [8] Bikfalvi, P., Kulcsár, Gy., Erdélyi, F., Tóth, T.: Performance Analysis of some Manufacturing Systems based on Multi-Objective Approach, *Proceedings of the 15th International Conference on Machine Design and Production (UMTIK 2012)*, Pamukkale, Denizli, Turkey, 19th–22th June 2012, CD, Paper No. 55, 2012.
- [9] Buzacott, J. A., Shanthikumar, J. G.: *Stochastic Models of Manufacturing Systems*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NY, 1993.
- [10] Brucker, P.: *Scheduling Algorithms*, 5th ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [11] Chaudry, I. A., Khan, A. A.: A research survey: review of flexible job shop scheduling techniques, *International Transactions in Operational Research*, Volume 23, Issue 3, pp. 551–591, 2016.
- [12] Cheng, T. C. E., Sin, C. C. S.: A state-of-the-art review of parallel-machine scheduling research, *European Journal of Operational Research*, Vol. 47, pp. 271-292, 1990.
- [13] Csáji, B. Cs., Monostori, L.: 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, 2005.
- [14] Davari, M., Demeulemeester, E., Leus, R. Nobibon, F. T.: Exact Algorithms for Single-Machine Scheduling with Time Windows and Precedence Constraints, *Journal of Scheduling*, Vol. 19, Issue 3, pp. 309-334, 2016.
- [15] Defersha, F. M., Chen, M.: A Parallel Genetic Algorithm for a Flexible Job-Shop Scheduling Problem with Sequence Dependent Setups, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49 (1), pp. 263-279, 2012.

-
- [16] Erdélyi, F., Tóth, T., Kulcsár, Gy., Bikfalvi, P.: Some New Considerations for Applying MES Models to Improve the Effectiveness of Production Operations Management in Discrete Manufacturing, Proceedings of the 14th International Conference on Modern Information Technology in the Innovation Processes of the Industrial Enterprises - MITIP 2012, Budapest, Hungary, pp. 391-400, 2012.
- [17] Gharbi, A., Haouari, M.: Optimal parallel machines scheduling with availability constraints, Discrete Applied Mathematics, Vol. 148, pp. 63-87, 2005.
- [18] Graham, R. L., Lawler, E. L., Lenstra, J. K., Rinnooy Kan, A. H. G.: Optimization and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling: A Survey, Annals of Discrete Mathematics, 5, pp. 287–326, 1979.
- [19] Kaabi, J., Harrath, Y.: A survey of parallel machine scheduling under availability constraints, International Journal of Computer and Information Technology, Vol. 3, Issue 2, pp. 238-245, 2014.
- [20] Kádár, B., Pfeiffer, A., Monostori, L.: Stability-oriented Evaluation of Rescheduling Strategies by using Simulation, Computers in Industry, Volume 58, Issue 7, pp. 630-643, 2007.
- [21] Koulamas, C.: The total tardiness problem: review and extensions, Operations Research, Vol. 42, pp. 1025-1041, 1994.
- [22] Kulcsár, Gy.: A Practice-Oriented Approach for Solving Production Scheduling Problems, Proceedings of the XXV microCAD International Scientific Conference, Miskolc, Hungary, pp. 61-66, 2011.
- [23] Kulcsár, Gy.: Ütemezési modell és heurisztikus módszerek az igény szerinti tömeggyártás finomprogramozásának támogatására, PhD értekezés, Miskolci Egyetem, 2007.
- [24] Kulcsár, Gy., Erdélyi F.: A New Approach to Solve Multi-Objective Scheduling and Rescheduling Tasks, International Journal of Computational Intelligence Research, 3 (4), pp. 343-351, 2007.
- [25] Kulcsár, Gy., Erdélyi, F.: Modelling and solving of the extended flexible flow shop scheduling problem, Production Systems and Information Engineering, Vol. 3, pp. 121-139, 2006.
- [26] Lamothe, J., Marmier, F., Dupuy, M., Gaborit, P., Dupont, L.: Scheduling rules to minimize total tardiness in a parallel machine problem with setup and calendar constraints, Computers & Operations Research, Vol. 39, Issue 6, pp. 1236–1244, 2012.
- [27] Lazarev, A. A., Arkhipov, D. I., Werner, F.: Scheduling jobs with equal processing times on a single machine: minimizing maximum lateness and makespan, Optimization Letters, pp. 1-13, 2016.
- [28] Lee, C.-Y., Chen, Z.-L.: Machine Scheduling with Transportation Considerations, Journal of Scheduling, Vol. 4, Issue 1, pp. 3-24, 2001.

-
- [29] Lee, K., Leung, J. Y.-T., Pinedo, M. L.: Scheduling jobs with equal processing times subject to machine eligibility constraints, *Journal of Scheduling*, Vol. 14, Issue 1, pp. 27-38, 2011.
- [30] Lei, D.: Multi-objective production scheduling: a survey, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 43, Issue 9-10, pp. 926-938, 2009.
- [31] Lengyel, A., Erdélyi, F.: Behaviour Based Combined Approaches to Uncertainty Management in Manufacturing Systems, *Proceedings of the 6th International Workshop on Emergent Synthesis, IWES'06*, 18-19 August, 2006, Kashiwa, Japan, pp. 77-82, 2006.
- [32] Linn, R., Zhang, W.: Hybrid flow shop scheduling: a survey, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 37, No. 1-2, pp. 57-61, 1999.
- [33] Lin, Y., Li, W.: Parallel machine scheduling of machine-dependent jobs with unit-length, *European Journal of Operational Research*, Vol. 156, Issue 1, pp. 261-266, 2004.
- [34] Loukil, T., Teghem, J., Tuyttens, D.: Solving multi-objective production scheduling problems using metaheuristics, *European Journal of Operational Research*, 161, pp. 42-61, 2005.
- [35] Ma, Y., Chu, C. B., Zuo, C. R.: A survey of scheduling with deterministic machine availability constraints, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 58, pp. 199-211, 2010.
- [36] Mokotoff, E.: Parallel machine scheduling problems: a survey, *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, Vol. 18, pp. 193-242, 2001.
- [37] Petrovic, D., Duenas, A.: A Fuzzy Logic Based Production Scheduling/Rescheduling in the Presence of Uncertain Disruptions, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 157, pp. 2273-2285, 2006.
- [38] Pinedo, M. L.: *Planning and Scheduling in Manufacturing and Service*, 2nd ed., Springer Verlag New York, 2009.
- [39] Pinedo, M. L.: *Scheduling Theory, Algorithms, and Systems*, 3rd ed., Springer Verlag New York, 2008.
- [40] Quadt, D., Kuhn, H.: A Taxonomy of Flexible Flow Line Scheduling Procedures, *European Journal of Operational Research*, 178, pp. 686-698, 2007.
- [41] Sbalzarini, L. F., Müller, S., Koumoutsos, P.: Multiobjective optimization using evolutionary algorithms, In *Center of Turbulence Research, Proceedings of the Summer Program 2000*, pp. 63-74, 2000.
- [42] Scholten, B.: *The road to integration. A guide to applying the ISA 95 standard in manufacturing*, ISA Instrumentation Systems and Automation Society. ISBN 0 9792 343-8-7, 2007.

-
- [43] Smith, K. I., Everson, R. M., Fieldsend, J. E.: Dominance Measures for Multi-Objective Simulated Annealing, Proceedings of Congress on Evolutionary Computation, Portland, Oregon, USA, 19-23 June 2004, pp. 23-30, 2004.
- [44] Tóth, T., Erdélyi, F.: 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, 2006.
- [45] Tóth, T.: Termelési rendszerek és folyamatok, Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, 2004.
- [46] Tóth, T.: Tervezési elvek, modellek és módszerek a számítógéppel integrált gyártásban. Miskolci Egyetemi Kiadó, 2006.
- [47] Vieira, G., Hermann, J., Lin, E.: Predicting the Performance of Rescheduling Strategies for Paralell Machines Systems, Journal of Manufacturing Systems, Vol. 19, No. 4, pp. 256-266, 2000.
- [48] Vieira, G., Hermann, J., Lin, E.: Rescheduling Manufacturing Systems: A Framework of Strategies, Policies and Methods, Journal of Scheduling, Vol. 6, No. 1, pp. 35-58, 2003.
- [49] Wang, W.: Flexible flow shop scheduling: optimum, heuristics, and artificial intelligence solutions, Expert Systems, Vol. 22, No. 2, pp. 78–85, 2005.
- [50] Weng, M. X., Lu, J., Ren, H.: Unrelated parallel machine scheduling with setup consideration and a total weighted completion time objective, International Journal of Production Economics, Vol. 70, pp. 215-226, 2001.

NEW SCIENTIFIC RESULTS

Thesis 1 Demand-driven Planning Method for Shift Assignments in Production Fine Schedules

In order to synchronize the human and machinery resources, I developed a demand-driven shift-assignment model that is able to manage the availability time intervals of the resources as decision variables and/or constraints in production fine scheduling problems. To solve this planning problem of fine scheduling, I elaborated a new method through integrated solving of the scheduling and the shift-assignment problems of discrete manufacturing-assembly systems.

The most important features of the integrated planning method are as follows:

- 1.1. The model extension concerning the shift assignment can be applied to any type of production scheduling problem.
- 1.2. The synchronized solving of the problem consists of two phases: in the first phase, predefined time intervals as constants (constraints) can be assigned to the resources individually. In the second phase, the assignments of active shifts (decision variables) can be finalized based on the actual loads that appear while solving the scheduling problem.
- 1.3. In order to minimize the cost of shifts, I developed the concept of a new objective function that uses "relative cost of shift" approach.
- 1.4. Using the developed method, the scheduling problem and the shift-assignment problem can be solved in the same time by applying an advanced multi-operator and multi-objective searching technique (MOMOTS, Multi-Operator and Multi-Objective Tabu Search). The neighboring operator (or operators) of the selected search algorithm of the initial (default) scheduling problem should be complemented by the shift-assignment operators and the original objective functions should be complemented by the objective functions concerning to the shift assignment.
- 1.5. The integrated solving method supports, in addition to the above, the management of alternative technological routing variants and the consideration of material handling times and intermediate buffers with limited sizes, as well as the distinction and management of the sizes of production order series, manufacturing series and logistical series.

- 1.6. By solving a large real industrial problem, I verified that the new approach is suitable for integrated solving of production scheduling and shift-assignment problems in discrete component manufacturing and assembly processes.

The results summarized in Thesis 1 are described in detail in Chapter 3 of the dissertation and have been published in 12 papers: [s4], [s3], [s5], [s7], [s9], [s10], [s11], [s12], [s14], [s15], [s17], [s16].

Thesis 2 Proactive Approach Based Model and Combined Scheduling Method for Solving Fine Scheduling Problems of "Drawdown"-oriented Component Manufacturing Systems

For integrated scheduling of make-to-order and make-to-stock manufacturing, I developed a new model and solving method that is able to maintain the product-dependent minimum stock levels defined by supplier contracts and to fulfill direct orders with strict due dates (drawdowns) simultaneously. In addition to the integration of production scheduling and demand-driven inventory management, the proposed modeling approach makes it possible to solve the combined scheduling of the manufacturing main processes and their related preparatory activities.

The most important features of the model are as follows:

- 2.1 The developed IPSIC model is fundamentally based on the production features and requirements of automotive seat elements (a model of circle-shaped parallel production lines), but it can be quickly adapted to other manufacturing environments.
- 2.2 The model manages the fulfillment of due date production orders and the optimization of product-dependent stock levels in a combined (integrated) manner.
- 2.3 The model takes into account the specialties and the limited availabilities of resources.
- 2.4 It implements scheduling of synchronized set-up tasks for production lines taking into account even the preparatory tasks of the production.
- 2.5 It supports the demand-driven management of the configuration of shared accessible tools and devices necessary to perform the manufacturing tasks according to the current technological standards and alternatives.

The results summarized in Thesis 2 are described in detail in subsections 4.1, 4.2, and 4.4 of the dissertation and have been published in papers [s1], [s2], [s6], [s13].

Thesis 3 A New Model and Solving Method to Solve Single Operation Scheduling Problems with Timely-Variable Number of Resources

I developed the model $P(s) | p_i=1; r_i=integer; d_i=integer / L_{max}$ and its exact solving algorithm to schedule single operation jobs with due dates. The most important novelty of the model is that the actual number of the available parallel resources can depend on time. I developed an improved JIT-oriented algorithm that reduces too-early completion of jobs while due dates are met by using safety control parameters.

The most important features of the model and the solving approach are as follows:

- 3.1 Based on a demand motivated by a real industrial problem, I developed a new generalized model that can be considered as an extension and generalization of the model $P | p_i=1; r_i=integer; d_i=integer / L_{max}$ found in the literature.
- 3.2 To solve the problems described with the new model, I developed a polynomial run-time solving algorithm: Slack-Oriented Algorithm.
- 3.3 To reduce the adverse effects of unexpected events arising from external and internal sources, I developed an improved JIT-oriented algorithm that reduces too-early completion of the jobs while meeting due dates using safety control parameters.
- 3.4 For applying the model and solving methods in practice, I developed a special problem-transformation procedure that provides a clear mapping of the formal model and a real workshop scheduling problem type.

The results summarized in Thesis 3 are described in detail in subsection 4.3 of the dissertation and have been published in papers [s1], [s2], [s6], [s13].

BÍRÁLÓ BIZOTTSÁG

Elnök:

Prof. Dr. Tóth Tibor, professor emeritus (ME)

Titkár és tag:

Dr. Baksáné Dr. Varga Erika, egyetemi docens (ME)

Tagok:

Prof. Dr. Illés Béla, intézetigazgató, egyetemi tanár (ME)

Dr. Kádár Botond, tudományos főmunkatárs (MTA SZTAKI)

Dr. Bohács Gábor, tanszékvezető-helyettes, egyetemi docens (BME)

Dr. Körei Attila, egyetemi docens (ME)

Hivatalos bírálók:

Dr. Pfeiffer András, igazgatóhelyettes, tudományos főmunkatárs (MTA SZTAKI)

Dr. Bányai Tamás József, egyetemi docens (ME)