AZ IGÉNY SZERINTI TÖMEGGYÁRTÁS TERMELÉSPROGRAMOZÁSÁNAK EGY HIBRID MEGOLDÁSI MÓDSZERE

Kulcsár Gyula
egyetemi tanársegéd
Miskolci Egyetem, Informatikai Intézet, Alkalmazott Informatikai Tanszék

Abstract. A cikk az igény szerinti tömeggyártás termelésprogramozási feladatával foglalkozik. A korszerű gyártó-szerelő rendszerekben jellemzően előforduló alternatív technológiai útvonalak, korlátozottan rendelkezésre álló többfunkciós párhuzamos gépek, sorrendfüggő átállási idők, terméktől függő termelési sebességek valamint határidős munkák együttes figyelembevételével gyakorlati igényekhez alkalmazkodó többcélú ütemezési koncepciót mutat be. Egy kiterjesztett rugalmas Flow Shop ütemezési modell alapján az erőforrások allokálására és a munkák végrehajtásának időbeli megtervezésére irányuló kérdések változó célokhoz rugalmasan alkalmazkodó megválaszolására egy hibrid heurisztikus megoldási módszer szolgál. Ebben a módszerben szabályalapú felépítő jellegű ütemezési heurisztikák, módosított tabu keresési technika, indexelt adatmodellen alapuló gyors szimulációs kiértékelés továbbá interaktív felületen bevitt szakértői tudás kombinációja valósul meg.

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a termelő nagyvállalatok egy része közvetlenül a vevők igényeit próbálja meg kiszolgálni (pl.: háztartási gépek, lámpák gyártása). A versenyképesség növelése érdekében szükséges, hogy minél jobban alkalmazkodjanak a piaci körülmények gyors változásaihoz. Ennek érdekében a gyártási hatékonyságot és a szállítóképességet kell javítani [12], [13]. Az előbbit az erőforrások minél jobb kihasználásával, az utóbbit pedig, előzetes becslésen alapuló raktárra történő gyártással tudják növelni. A vállalatok sikeressége nagymértékben a megrendelők igényeinek magas szintű kielégítésén múlik, ennek egyik fontos feltétele a megrendelésekhez tartozó munkák ütemezésének minél hatékonyabb megoldása [8].

A finomprogramozás a gyártásirányítás (Manufacturing Execution System, MES) szintjén fellépő rövid távú, valósidejű tervezési feladat megoldását követeli meg [2]. Ezen a szinten az ütemezési feladat azt jelenti, hogy ismert és pontosan meghatározott (technológiai, anyag stb.) korlátozások figyelembe vételével, a gyártásra kiadott, ismert belső rendeléseken alapuló munkák elvégzéséhez gyártási erőforrások (gépek, eszközök, stb.) allokálását és munkák indítási időpontjának sorozatát kell megtervezni úgy, hogy a definiált korlátozások teljesüljenek, és a vállalat magasabb szintjén megfogalmazott célok megvalósuljanak.

Az igény szerinti tömeggyártás során a műveletek végrehajtása jellemzően soros elrendezésű gyártórendszerben történik [7]. A soros elrendezésű gyártási struktúrához kapcsolódó alapmodellben (Flow Shop) adott számú különböző gép a technológiai sorrendnek megfelelően egymás után van elhelyezve. Minden munkadarab ezeken a gépeken halad végig.

Ha megengedett hogy az egyes gépeken a munkák sorrendje eltérő legyen, akkor előzéses, ellenkező esetben előzésmentes modellről van szó. Ezekről a modellekről és megoldási módszereikről számos munka nyújt részletes áttekintést (pl.: [4], [5], [10], [11], [16], [15], [20]).

Az alapmodellnek párhuzamos gépekkel történő kibővítéseként ismert a rugalmas egyutas (Flexible Flow Shop) modell. Ebben a modellben összetett munkahelyek vannak definiálva. Minden egyes munkahelyen adott számú egymással teljesen egyenértékű gép található. A gépek száma munkahelyenként eltérő lehet. A munkadarabokat minden munkahelyen, annak egy kiválasztott gépén kell megmunkálni. Ebben a modellben tehát megjelenik a gépválasztás feladata is, ugyanakkor továbbra is fontos szerepet játszik a munkák gépenkénti sorrendjének meghatározása.

A szakirodalomban számos cikk különböző mélységekben foglalkozik a rugalmas Flow Shop ütemezési modellel (pl.: [1], [3], [5], [9], [17], [18], [19]). A témakörhöz tartozó cikkek többsége célfüggvényként a rendeléscsoport legkésőbbi befejezési idejét (makespan) használja. Sokkal kevesebb eredmény ismert határidős gyártás (make to order) esetén a késésekkel kapcsolatos célfüggvények minimalizálására.

A jelenleg ismert többgépes modellek nem tudják figyelembe venni egyszerre az igény szerinti tömeggyártás jellegzetességeit: több művelet együttes végrehajtására képes gépeket, technológiai útvonal alternatívákat, gépek változó rendelkezésre állási időintervallumait, eltérő termelési sebességeket és sorrendfüggő átállási időket, így szükség van ezeknek a modelleknek a kiterjesztésére, továbbfejlesztésére.

2. KITERJESZTETT FLOW SHOP MODELL

Az igény szerinti tömeggyártást folytató vállalatok különböző típusú termékeket állítanak elő. Jellemzően, adott egy rendelés állomány, amelyet a külső rendelések és az előrejelzések figyelembe vételével a vállalat termeléstervezés szintjén definiálnak. Minden egyes rendelés meghatározott típusú, adott darabszámú egyforma termék, adott határidőre történő legyártását igényli. A műhelyszintű irányításban fontos szerepet játszik a logisztikai egység, amely előre megadott darabszámú, azonos termék együttesét jelenti.

Az általunk vizsgált gyártási struktúra gyártó-szerelő jellegű, automatizált gépcsoportokból (gépekből és/vagy gépsorokból) áll. A gépek közötti anyagmozgatás eszköze a paletta. Egy rendelés paletták halmazának is tekinthető, ahol a paletták számát a rendelt mennyiség és a paletták termékfüggő mérete együttesen határozza meg.

A termékek előállításához legfeljebb négy, vagy annál kevesebb műveletet kell kötött sorrendben végrehajtani. A műveletek operációk sorozatából tevődhetnek össze. Mivel a műveletek nem megszakíthatók, ezért ezek tekinthetők az ütemezés során a legkisebb allokációs egységeknek. Az egyes műveletek elvégzéséhez – a megfelelő gépeken túlmenően – meghatározott anyagoknak, komponenseknek is rendelkezésre kell állni adott mennyiségben. A gyártás rugalmas jellegéből következik, hogy egy adott típusú termék különféle anyagok, komponensek, gépek és útvonalak használatával is előállítható.

A rendszerben szereplő gépek – amelyek valójában különböző gyártási képességekkel rendelkező gépsorok – a terméktől függő gyártási sebességekkel, a munkák sorrendjétől függő átállási időkkel, rendelkezésre állási

időintervallumokkal és egy adott termékcsoportra érvényes műveletsorozattal jellemezhetők.

A gyártás során egy adott gép egyszerre csak egy munkán dolgozhat, és egy adott munka egyszerre csak egy géphez lehet hozzárendelve. A gépek közötti tároló helyek mérete nem korlátozott.

Az ütemterv elkészítésekor azt is figyelembe kell venni, hogy az ütemezési időhorizonton a műhely bizonyos gépei már korábbi, még be nem fejezett, nem módosítható feladatokkal terheltek, így az utolsó megerősített és érvényben lévő ütemterv következményei hatással vannak az új ütemtervre.

3. AZ ÜTEMEZÉSI FELADAT MEGOLDÁSA

Az ismertetett ütemezési feladat kombinatorikus tulajdonságai miatt az NP teljes feladatosztályba tartozik. Ezért az elméleti globális optimum keresése helyett, olyan megoldási módszerekkel foglalkozunk, amelyek nagy méretű feladatok (pl. 600 megrendelés, 3000 munka, 160 gép) esetén is elfogadható időn belül megvalósítható ütemtervet állítanak elő, úgy hogy a megadott célfüggvények együttes figyelembevételével minél közelebb legyen az optimumhoz.

3.1. Megoldási koncepció

A lehető legtágabb értelmezés szerint minden fizikai palettát önálló absztrakt munkának (*job*) tekintünk. A feladat megoldása során ilyen munkák kerülnek ütemezésre. Nem használunk előre rögzített gyártási sorozatnagyságot. A gyártási sorozatnagyságot az azonos beállítással készülő munkák száma adja meg. A rendelési sorozatnagyság ennél nagyobb vagy kisebb is lehet. Az ütemezés során az egyes gépeken kialakuló gyártási sorozatnagyság az egy munkaköteg, amely két egymást követő beállítási időintervallum közötti azonos termékre vonatkozó rendelt munkák sorozata. A köteg nagysága tehát dinamikusan változhat, megengedve a rendelési sorozat bontását és egyesítését.

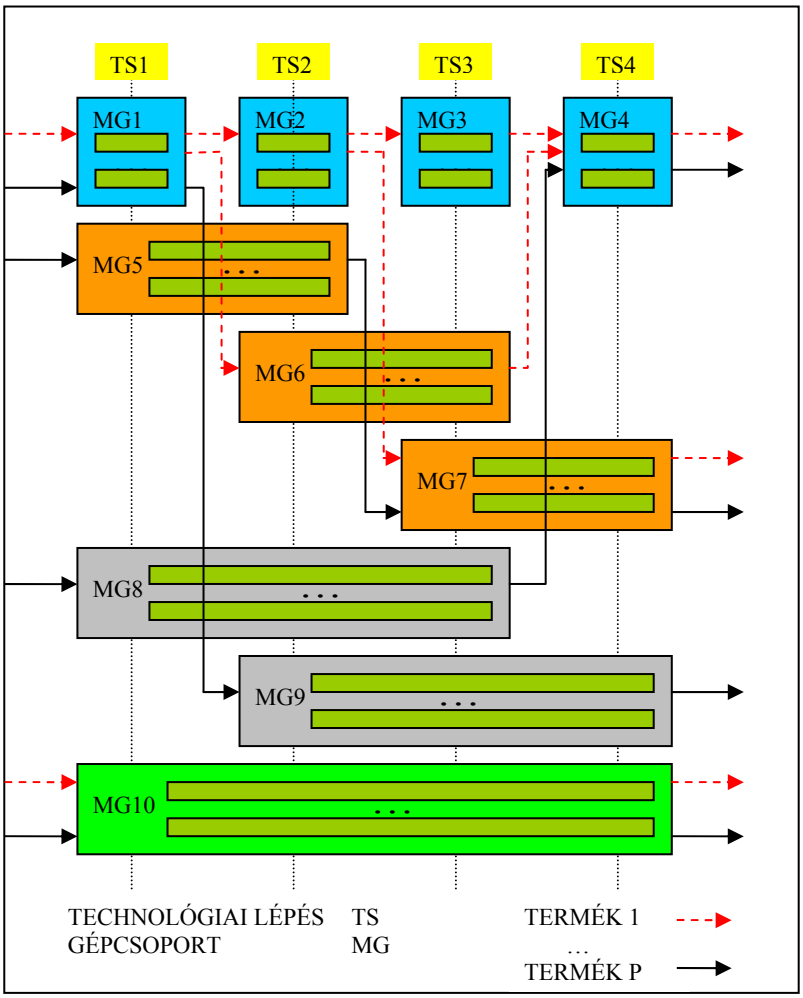
A modellben feltételezzük, hogy az ütemezés előtt minden munkához hozzárendelhető egy korlátozás, legkorábbi kezdési időpont, amely a kezdő technológiai lépés indíthatóságának időbeli korlátozására vezeti vissza a gyártási-szerelési komponensek rendelkezésre állását.

Az ütemezés során a modellben szereplő korlátozások közül a munkákhoz rendelt befejezési határidőket puha (megsérthető) korlátozásnak tekintjük, a célfüggvényekben vesszük figyelembe azokat. Minden más korlátozást kemény (nem megsérthető korlátozásnak) tekintünk.

A gépek által végrehajtható műveleteket technológiai lépésként értelmezzük. Bevezetjük a végrehajtási lépés fogalmát, amely alatt a technológiai lépések olyan sorozatát kell érteni, amely gépváltás nélkül elvégezhető. Egy multifunkcionális gépsorhoz tartozó végrehajtási lépés több technológiai lépést tartalmaz, míg egy hagyományos géphez tartozó csak egyet. Az ütemezés alapegységének nem a technológiai lépést, hanem a végrehajtási lépést tekintjük.

A végrehajtási útvonal fogalmát a végrehajtási lépések olyan sorozataként definiáljuk, amelyben az előforduló technológiai lépések csak egyszeresen vannak lefedve, azaz a végrehajtási lépések közös része üres halmaz.

A végrehajtási lépések típusai alapján gépcsoportokat (géptípus osztályokat) definiálunk (1. ábra). A gépcsoportokon belül különböző darabszámú és gyártási képességű gépek lehetnek. Mivel a gépek nem minden terméktípust képesek kezelni, így a gépcsoportok terméktípusonként (vagy terméktípus csoportonként) eltérőek.



1. ábra: Kiterjesztett rugalmas Flow Shop modell

3.2. Hibrid finomprogramozó rendszer

A kifejlesztett ütemező rendszerünkben a termelési finomprogram a következők szerint készül (2. ábra):

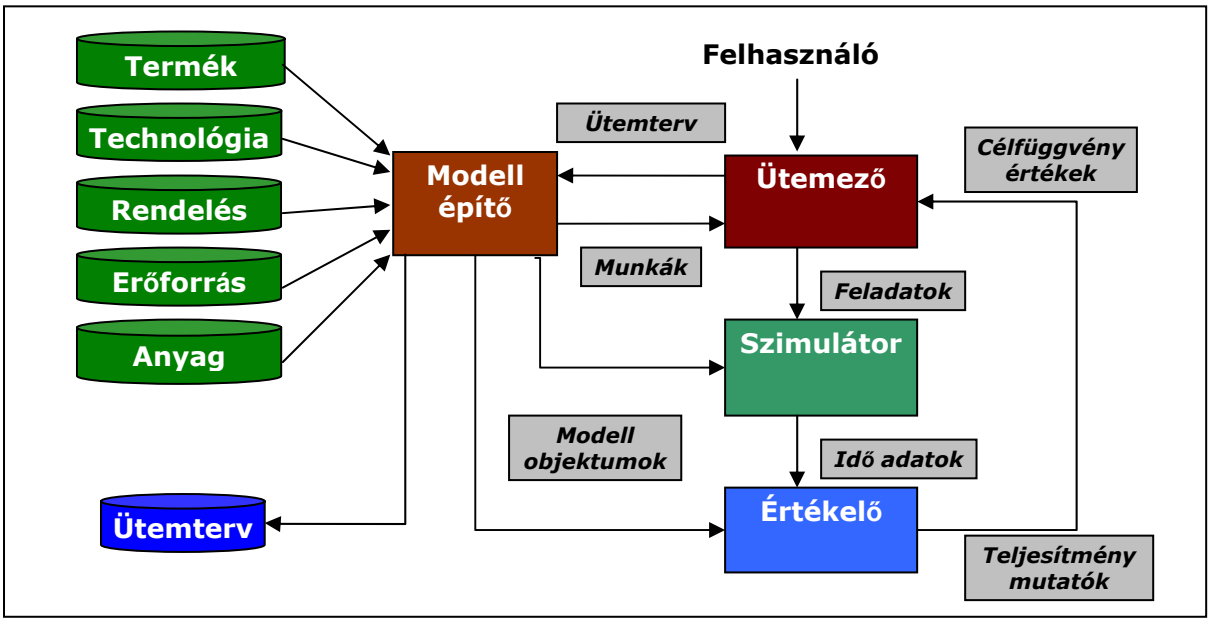
A termelésinformatikai rendszerek adatbázisában tárolt aktuális adatok felhasználásával a modellépítő definiálja a rendszerben lévő objektumokat. Kiemelt fontosságú feladata a rendelések (*order*) munkákra (*job*) bontása és a korlátozások definiálása.

Az ütemező modul az ütemterv elkészítésekor minden egyes munkához hozzárendel egy megfelelő végrehajtási útvonalat, továbbá hozzárendel egy megfelelő gépet a kiválasztott útvonal minden egyes végrehajtási lépésének megfelelő gépcsoportból, valamint meghatározza minden hozzárendelt gépen a végrehajtási sorban elfoglalt pozícióját. Ezáltal a munkákat feladatokra (*task*) bontja fel. Egy feladat jelenti egy adott munka adott végrehajtási lépésének adott gépen történő megvalósítását.

Az ütemtervben szereplő munkák időadatainak számítását gyors szimulátor végzi. A szimulátor az ütemező által elkészített ütemterv munka-gép összerendeléseiből és a munkák gépenkénti sorrendjéből indul ki. A gyártási folyamatot egy szabályalapú számítási eljárással szimulálja, amely figyelembe veszi az egyes gépek rendelkezésre állási időintervallumait, az egyes gépeken az adott munkák sorrendje által meghatározott átállítási időket, a munka-gép összerendelések alapján számítható megmunkálási időket. A munka aktuális besorolása (korlátozások: időablak, sorrend, erőforrás, útvonal) alapján ismertté válik az egyes munkák gépenkénti indítási időpontja és a befejezési időpontja.

A kiszámított időadatok felhasználásával az ütemterv jóságát, minőségét előre definiált célfüggvények kiértékelésével és teljesítmény-mutatók kiszámításával számszerűsíti az értékelő modul.

Az ütemező modul az ütemterv minősítése alapján módosítja az ütemtervet. A lépéssorozat ismételt végrehajtása során javul az ütemterv.



2. ábra: A kifejlesztett ütemező rendszer működése

A felhasználó számára az ütemező rendszer – interaktív grafikus felületen keresztül – további szolgáltatásokat biztosít. Ezek lehetővé teszik a felhasználó számára az eredmények alakulásának követését, befolyásolását.

A felhasználó kijelölheti az aktuális célfüggvényeket és súlyozhatja azokat, megválaszthatja a kiindulási ütemterv inicializálásának módját, megszakíthatja az ütemezési folyamatot, jelentéseket, teljesítmény-mutatókat kérhet az aktuális ütemtervről, módosíthatja az ütemterv részleteit, megváltoztathatja az ütemezési paramétereket és a vezérlési stratégiát, tovább futtathatja vagy újraindíthatja a folyamatot.

3.3. Heurisztikus algoritmusok

Többféle heurisztikus megoldási módszert fejlesztettünk ki és építettünk be az ütemező modulba. A végrehajtási útvonal és gépek munkákhoz való rendelésének,

valamint a munkák gépenkénti sorrendjének meghatározása alapján két csoportba sorolhatók az algoritmusok.

Az első csoportba tartoznak a felépítő jellegű heurisztikák. Ezek – a korábban ütemezett és nem módosítható hozzárendelésektől eltekintve – üres ütemtervből kiindulva, a kiválasztott soron következő ütemezendő munkához tartozó útvonalra, gépre és sorrendre vonatkozó döntéseket heurisztikus szabályok és szimulációs kiértékelés alapján hozzák meg.

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 ütemterv.

A továbbiakban az ütemterv elkészítésének egy olyan módszerét vázoljuk, melynek során az ütemezési feladatot egy keresési feladatként fogalmazzuk meg, majd egy módosított tabukeresési technikával oldjuk meg a feladatot.

A kezdeti ütemterv elkészíthető felépítő jellegű heurisztikus algoritmus alkalmazásával, vagy egy véletlenszerűen választott megengedett megoldás generálásával, vagy kézi ütemezéssel.

A keresési folyamat során ebből a kezdeti ütemtervből kiindulva megengedett módosítások ismételt végrehajtásával alakul ki a végső ütemterv. A módosító operátor alapvetően kétféle változtatást idézhet elő az ütemtervben:

1. Egy kiválasztott munkát kiemel az ütemtervből, majd a hozzárendelt útvonalat és gépeket részben, vagy teljes egészében megváltoztatva újra beszúrja azt az ütemtervbe.
2. Egy kiválasztott gépen a munkák sorrendjét megváltoztatja.

A keresési folyamat egy közbenső lépése során az algoritmus bizonyos számú (K) kiterjesztett ütemtervet készít a módosító operátor alkalmazásával. Ha egy kiterjesztett ütemterv szerepel a tabulistán, akkor azt nem értékeli ki, figyelmen kívül hagyja. Ha egy kiterjesztett ütemterv nem szerepel a tabulistán, akkor felveszi a listára, a legkorábban felvett elemet pedig törli a listáról. A szimulációs kiértékelést követően, ha a vizsgált ütemterv jobb, mint az adott kiterjesztés addigi legjobb ütemterve, akkor megjegyzésre kerül. A kiterjesztés legjobb ütemterve lesz a következő lépés kiterjesztésének a kiindulási bázisa. Továbbá, ha a keresés során megtalált legjobb ütemtervtől jobb az aktuális kiterjesztés legjobb ütemterve, akkor ez kerül megjegyzésre.

3.4. Többcélú ütemezés

Két ütemterv jóságának összehasonlítása nem a két ütemterv külön-külön vett abszolút jóságának valamilyen módon történő számszerűsítése, majd ezek összehasonlításának eredményén alapul (pl: súlyozott összeg), hanem az egyik ütemtervnek a másikhoz viszonyított (relatív) jósága kerül számszerűsítésre és ez alapján dönthető el, az hogy melyik tekinthető jobb ütemtervnek.

Jelölje S a keresési teret, amelynek pontjai az ütemezési feladat lehetséges megoldásait jelentik. Adottak az ütemezési célok, amelyek $f_1,...,f_K$ függvényeknek tekinthetők úgy, hogy $\forall k \in \{1,2,..., K\}$, $f_k : S \to \Re$. A feladat megoldását $s \in S$ keressük, úgy hogy minden $f_k(s)$ érték a lehető legkisebb legyen. Ez egy többcélú

optimálási feladat. A legtöbb esetben nincs olyan megoldás, amely abszolút megoldásnak tekinthető, vagyis minden célfüggvény egyszerre venné fel a legkisebb értékét. Ha sikeresen javítjuk az egyik célfüggvény értékét, általában egy vagy több célfüggvény értéke romlik.

A keresési feladat megoldása során két ütemterv között az összehasonlító operátort (operátorokat) a következők szerint értelmezzük.

Legyen $x, y \in S$ két ütemterv. Definiáljunk egy F függvényt úgy, hogy $F : S^2 \to \Re$, $F(x, y) = \sum_{k=1}^{K} (w_k * D(f_k(x), f_k(y)))$, amelyben D jelenti a következő függvényt: $D : \Re^2 \to \Re$, $a, b \in \Re$ $D(a,b) = \begin{cases} 0, ha \max(a,b) = 0 \\ \dfrac{b-a}{\max(a,b)} * 100, egyébként \end{cases}$. A *max* operátor jelentése pedig a következő: $\max : \Re^2 \to \Re$, $\max(a,b) = \begin{cases} a, ha\, a > b \\ b, egyébként \end{cases}$.

Továbbá, egy adott komponens célfüggvény f_k fontosságának kifejezésére w_k súlyozó tényezőt használunk, amely egy egész számot jelent a [0,...,10] intervallumból véve.

Két ütemtervről $x, y \in S$ azt mondjuk, hogy:

- x jobb megoldás, mint y ($x < y$ igaz) akkor ha $F(x, y) > 0$,
- x és y azonosan jó megoldások (x=y igaz) ha $F(x, y) = 0$,
- x rosszabb megoldás, mint y ($x > y$ igaz) ha $F(x, y) < 0$.

Az elvégzett vizsgálatok igazolták, hogy a vázolt megoldási módszer a gyakorlatban előforduló nagyméretű feladatok esetében is hatékonyan alkalmazható, rugalmasan alkalmazkodik az aktuális célokhoz és kivárható időn belül szolgáltatja az eredményt.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben az igény szerinti tömeggyártás műhelyszintű ütemezési feladataival foglalkoztunk. Az erőforrások allokálásának és a munkák ütemezésének modellezésére egy kiterjesztett rugalmas Flow Shop ütemezési modellt használtunk. Az alternatív útvonalak, korlátozottan rendelkezésre álló párhuzamos gépek, sorrendfüggő átállási idők, terméktől függő termelési sebességek valamint határidős munkák együttes figyelembevételével valós gyártási környezethez alkalmazkodó ütemező rendszert mutattunk be.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerző ezúton mond köszönetet a kutatási és fejlesztési munka támogatásáért a Magyar Tudományos Akadémia Termelésinformatikai Kutatóhelyének (alapítva a Miskolci Egyetem Alkalmazott Informatikai Tanszékén, Grant No. MTA – TKI 06108). Az ismertetett eredmények egy része a „VITAL” nevű projekthez (Nemzeti Kutatási és Technológiai Hivatal, Grant No.: 2/010/2004) kapcsolódó kutatási munkák során született.

IRODALOM

[1] ACERO-DOMINGUEZ M. J., PATERNINA-ARBOLEDA C. D., 2004, *Scheduling Jobs on a K-Stage Flexible Flow Shop Using a TOC- (Bottleneck) Procedure*, Proceedings of the 2004 Systems and Information Engineering Design Symposium.

[2] BARKMEYER E., DENNO P., FENG S., JONES A., WALLACE E., 1999, *"NIST Response to MES Request for Information"*, NISTIR 6397, National Institute of Standards and Technology: pp. 1-124.

[3] BRUCKER P., 1998, *Scheduling Algorithms*, Springer-Verlag, Berlin.

[4] BAUER A., BOWDEN R., BROWNE J., DUGGAN J., LYONS G., 1991, *Shop Floor Control Systems – From design to implementation*, Chapman &.Hall, UK.

[5] YAMADA T., 2003, *Studies on Metaheuristics for Jobshop and Flowshop Scheduling Problems*, Ph.D Thesis, Kyoto University, Japan.

[6] KULCSÁR GY., 2006, *Az igényszerinti tömeggyártás termelésprogramozásának modellezése és heurisztikus megoldása*, GÉP, A Gépipari Tudományos Egyesület Műszaki Folyóirata, LVII. évfolyam 2006/10 szám, pp. 3-13.

[7] 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, Wroclaw, Poland, pp. 138 – 152.

[8] KURNAZ A., COHN Y., KOREN Y., 2005, *A Framework for Evaluating Production Policies to Improve Customer Responsiveness*, CIRP Annals, Volume 54/1, pp. 401-406.

[9] LINN R., ZHANG W., 1999, *Hybrid Flow Shop Scheduling: A Survey*, Computers and Industrial Engineering, 37, pp. 37-51.

[10] MCKAY K. N., WIERS V. C. 1999, *Unifying the Theory and Practice of Production Scheduling*, Journal of Manufacturing Systems, Vol. 18, No. 4, pp. 241-248.

[11] MCCLELLAN M., 1997, *Applying Manufacturing Systems*, St. Lucie Press, Florida.

[12] TÓTH T., ERDÉLYI F., 2004, *Research and Development (R&D) Requirements for Up-to-date Production Planning & Scheduling (PPS) Systems*, The Eleventh International Conference on Machine Design and Production, pp. 13 – 15, Antalya, Turkey.

[13] TÓTH T., ERDÉLYI F., 1997, *The Role of Optimization and Robustness in Planning and Control of Discrete Manufacturing Processes*, Proceedings of the 2nd World Congress on Intelligent Manufacturing Processes & Systems, Budapest, Hungary, pp. 205-210.

[14] TÓTH T., 2004, *Termelési rendszerek és folyamatok*, Egyetemi tankönyv, Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc.

[15] TÓTH T., 1998, *Tervezési elvek, modellek és módszerek a számítógéppel integrált gyártásban*, Egyetemi tankönyv Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc.

[16] TÓTH T., 1994, *Heurisztikus módszerek termelés-programozási feladatok megoldására*, Oktatási segédlet, Miskolci Egyetem, Miskolc.

[17] TAILLARD E., 1990, *Some Efficient Heuristic Methods for the Flow Shop Sequencing Problem*, European Journal of Operational Research, 47, (1) pp. 65-74.

[18] ZWEBEN M., FOX M. S., 1994, *Intelligent Scheduling*, Morgan Kaufmann Publishing, San Francisco.

[19] SAUER J., 2006, *Modeling and solving multi-site scheduling problems*, Book section in: van WEZEL W., JORNA R., MEYSTEL A., *Planning in Intelligent Systems: Aspects, Motivations and Methods*, pp. 281 - 299, Wiley.

[20] VÍZVÁRI B., 2004, *Ütemezés elmélet*, 9. fejezet az IVÁNYI A. (szerk.), *Informatikai algoritmusok*, 364-415, ELTE Eötvös Kiadó.