



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék



Magyar Tudományos Akadémia  
Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet

# Új modellek és algoritmusok az integrált termeléstervezés és -ütemezésben

Ph.D. értekezés tézisei

Kovács András

Témavezetők:

dr. Váncza József  
Magyar Tudományos Akadémia  
Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet

dr. Dobrowiecki Tadeusz  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

Budapest, 2005.

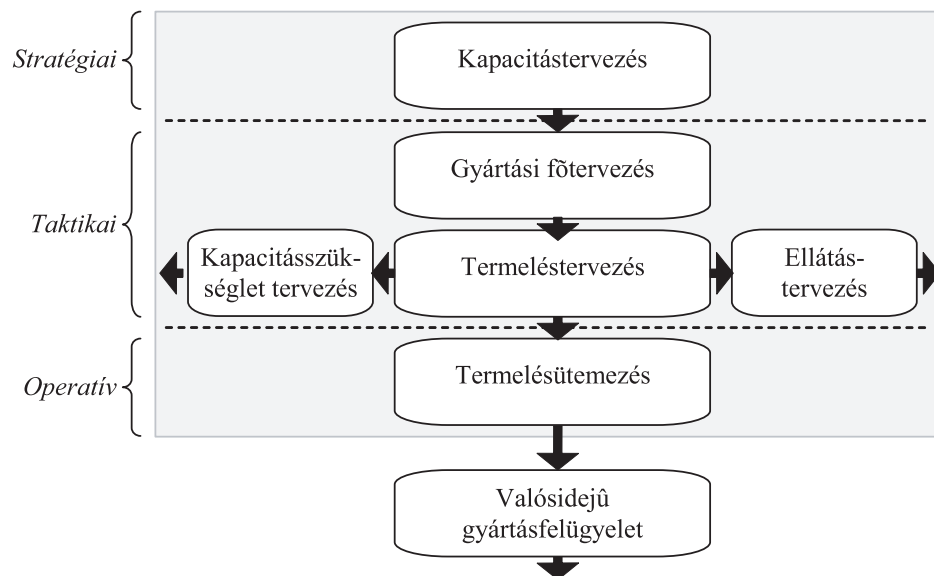


## 1. Előzmények

A termeléstervezés és -ütemezés fejlett módszerei jelentős figyelmet kaptak az elmúlt évtizedekben, mind a kutatók, mind az ipar részéről. Az érdeklődés oka az, hogy ezek a technikák a nagyobb termelékenység, jobb kiszolgálási szint, és alacsonyabb termelési költségek ígérését hordozzák, a menedzsment döntéseinek támogatása által a tervezési hierarchia minden szintjén. A vonzó kilátások ellenére a friss kutatási eredmények vajmi kis része került át a mindennapi gyakorlatba. Bár a mesterséges intelligencia és az operációkutatás területén elért eredmények számos új modellezési és megoldási technika kifejlesztéséhez vezettek, az ipari alkalmazások gyakran többet követelnek: a kutatók részéről gazdagabb modelleket és hatékonyabb algoritmusokat. Ez a disszertáció ilyen módszerekkel foglalkozik.

A tervezési feladatok leírására a megrendelésre történő gyártásban általában az 1. ábrán bemutatott háromszintű hierarchiát alkalmazzák. A döntéshozatal szintjei a stratégiai (hosszútávú), a taktikai (középtávú), és a műveleti (rövidtávú). A hierarchia minden tagja az adott szintet jellemző célok megvalósításáért felelős, és az egyes szinteken hozott döntések korlátokat képeznek az alacsonyabb szintek számára [Fle03].

A stratégiai szinten való tervezés az olyan hosszútávú döntéseket meghozatalát foglalja magába, mint a gyárak elhelyezkedésének és kapacitásának megválasztása (facility planning), 'gyártani vagy vásárolni' típusú döntések, és az ellátási lánc tervezése (supply chain planning). A gépi és emberi erőforrások szükséges kapacitását is ezen a szinten határozzák meg, elsősorban keresleti előrejelzések alapján. Ezzel szemben, a taktikai szint döntési feladatai már konkrét megrendelésekhez kapcsolódnak. A gyártási főtervezés (master planning) határoz az egyes megrendelések elfogadásáról vagy visszautasításáról, és a gyártási projektek határidejéről. Ezek után, a termeléstervező (production planning) modul rendeli időhöz az egyes gyártási tevékenységeket



1. ábra. A tervezési hierarchia szintjei.

egy aggregált időskálán. Ez a hozzárendelés szolgál a középtávú kapacitásterv és ellátási terv alapjául. Végezetül a termelésütemezési (production scheduling) modul az operatív szinten részletes erőforrás hozzárendéssé és műveleti sorrenddé bontja ki a termelési terv első szakaszait. Az ütemezés már egy részletes, az egyes műveletek leírását tartalmazó modellen történik, véges és rögzített kapacitások figyelembevételével.

A disszertációban a termelésstervezés és -ütemezés feladatával foglalkozom, megrendelésre történő gyártás esetén. Feltételezem, hogy a tervezési feladat egzakt leírása – a megrendelések, erőforrás kapacitások, nyersanyag készletek, és a részletes technológiai tervek – rendelkezésre állnak a középtávú időhorizonton. Ugyancsak felteszem, hogy a bizonytalanságok, különféle zavarok hatása elég kicsi ahhoz, hogy az megengedje determinisztikus modellek alkalmazását. Mindezen feltételezések lehetővé teszik a fenti tervezési és ütemezési feladatokat kombinatorikus optimalizálási feladatokként való kezelését.

## 2. Célkitűzések és a kutatás módszertana

Ma a vállalatok többsége anyagszükséglet-tervező (MRP), vagy gyártási erőforrástervező (MRP II) rendszereket alkalmaz középtávú termelés tervezési feladatainak megoldására [Vol97]. Ezek a rendszerek az anyagfolyam szempontjából vizsgálják a termelési folyamatokat, és azt feltételezik, hogy a termékek rögzített átfutási idővel gyárthatók. Ily módon teljességgel eltekintenek a termelési kapacitásokon futó terheléstől, lényegében végtelen kapacitásokat tételeznek fel. Nem csoda, ha a piaci változások és egyre rövidebb termék életciklusok mellett az így készített tervek gyakran nem valósíthatók meg a gyakorlatban. Számos, a közelmúltban publikált modell próbálja egyesíteni a termelés anyagfolyam- és kapacitásorientált aspektusait [Han01]. Ezeknek a módszereknek egy közös jellemzője, hogy egy magasszintű leírással ragadják meg a termelési tevékenységeket és azok komplex összefüggéseit. Azonban a leírás, melyet egy humán szakértőnek kell összeállítania, nem mindig tükrözi a valós termelési folyamatok viszonyait, és ezért ezek a módszerek sem tudják garantálni, hogy a termelési tervek kifejthetők legyenek részletes ütemtervvé. Továbbá a módszer sikeressége nagyban függ az emberi szakértő hozzáértésétől és gondosságától.

Célom a termelés tervezési feladat egy olyan újszerű, aggregált reprezentációjának kidolgozása volt, amellyel biztosítható, hogy a készített tervek kifejthetők helytálló részletes ütemtervvé. Az aggregált reprezentációt automatikusan kívántam felépíteni olyan, részletes termelési adatokból, amelyek készen elérhetők a szokásos vállalati adatbázisokban.

A termelésütemezés terén szintén a heurisztikus megközelítések, pl. prioritási szabályokon alapuló eljárások uralják a mai ipari gyakorlatot. Mégis, formális módszerek ismertek az ütemtervvvel szemben támasztott követelmények leírására, a feladat optimális megoldásának előállítására. Ezen módszerek közül a legígéretesebb, a korlátozás-alapú ütemezés, a nyolcvanas évekből

ered [BLN01]. Gazdag és lényegretörő reprezentációs eszközöket kínál az ütemezési feladat részletekbe menő leírására. A nagyméretű, és általában NP-teljes ütemezési feladatok gyors megoldása azonban komoly kihívást jelent a mai algoritmusok számára [Wal96].

A részletes termelésütemezési feladat megoldására a korlátozás-alapú megközelítést alkalmaztam. Kutatási célként a ma ismert megoldó algoritmusok hatékonyságának növelését tűztem ki, az iparban felmerülő ütemezési feladatok néhány tipikus strukturális tulajdonságának kihasználásával. E célt úgynevezett konzisztencia megőrző transzformációk alkalmazásával kívántam elérni.

A kutatás során hangsúlyt helyeztem arra, hogy valós, gyakorlati relevanciával bíró feladatokat oldjak meg. Részt vettem egy kísérleti integrált termelésstervező és ütemező rendszert kifejlesztésében, amelynek segítségével a javasolt algoritmusokat valós, ipari partnerünktől származó tervezési és ütemezési feladatokon tesztelhettem.

### 3. Új tudományos eredmények

Az új eredmények két témakörbe sorolhatók: az 1. és a 2. tézis termelésstervezési feladatok aggregált modellezésével, a 3. tézis pedig korlátozás-alapú ütemezési feladatok megoldásával foglalkozik.

#### 1. tézis: A termelésstervezési feladat aggregált modellje

Egy aggregációs eljárás, amely képes a termelésstervezés aggregált modelljét részletes termelési adatokból automatikusan felépíteni, óriási jelentőséggel bír. A két reprezentáció közötti kapcsolat lehet a termelési terv végrehajthatóságának a kulcsa. Egy aggregációs eljárás legfontosabb – bár ritkán garantálható – tulajdonságai a megengedhetőség (esetünkben az, hogy az aggregált tervek kifejthetők-e részletes ütemtervvé) és az optimalitás (az agg-

regált terv kifejtéseként kapott részletes ütemterv célfüggvény-értéke egyezik-e a részletes modellen elérhető elvi optimummal).

**1.1 A termeléstervezési feladat aggregált modellje.** A termeléstervezési feladat egy új, aggregált modelljét vezettem be a megrendelésre történő, projekt-orientált gyártás területén, és aggregációs eljárást definiáltam ezen modell részletes termelési adatokból való automatikus felépítésére (2.3 fejezet).

**1.2 Az aggregációs eljárás megengedhetősége és optimalitása.** Formálisan bizonyítottam, hogy a megengedhetőség és optimalitás több relaxált változata teljesül a javasolt aggregációs eljárásra. Ezek a tulajdonságok tartalmazzák az időbeli megengedhetőséget, az erőforrás megengedhetőséget minden aggregált időegységre, és egy állítást a gyártásközi raktárkészletek (WIP) szerinti optimalitásról. (2.3.3 fejezet és 2.1–2.3 tételek).

Valós termelési adatokon végzett tesztek által igazoltam, hogy a javasolt aggregációs eljárás egy olyan, kompakt reprezentációját állítja elő a termeléstervezési feladatnak, ami egy, a közelmúltban kifejlesztett branch-and-cut algoritmussal [Kis05] hatékonyan megoldható. A készített termelési tervek kifejthetők olyan részletes ütemtervvé, amelyek megfelelően közelítik a megengedhetőséget és az optimalitást (2.6 fejezet).

A tézis a disszertáció 2. fejezetében és a [2, 3, 9, 14, 16] közleményekben került bemutatásra.

## **2. tézis: Faparticionálási algoritmusok az aggregált modellek felépítéséhez**

Vizsgáltam faparticionálási feladatok egy, az 1. tézis aggregációs eljárása által felvetett családját. Ezekben a feladatokban egy gyökeres fát kell rész-

fákra osztani úgy, hogy a részfák betartsanak egy adott súlykorlátot. A részfák súlyát különféle súlyfüggvényekkel mérhetjük. Az optimalizálási kritériumaok a partícionálás magassága, számossága, és e kettő Pareto kombinációja. Közös, ‘alulról felfelé’ (bottom-up) elvet követő algoritmusokat adtam a következő feladatok megoldására.

**2.1 A partícionálás magasságának minimalizálása.** Lineáris idejű algoritmust javasoltam, és bebizonyítottam, hogy az optimális megoldást készít monoton súlyfüggvények esetén (2.4.3 fejezet és 2.4 lemma).

**2.2 A partícionálás számosságának minimalizálása.** Lineáris idejű algoritmust javasoltam, és bebizonyítottam, hogy az optimális megoldást készít invariáns súlyfüggvények esetén (2.4.4 fejezet és 2.5, 2.6 lemmák).

**2.3 A partícionálás magasságának és számosságának minimalizálása,** azaz a minimális magasság és minimális számosság kritériumai szerint Pareto-optimális megoldások meghatározása. Polinomidejű algoritmust javasoltam, és bebizonyítottam, hogy az optimális megoldást készít invariáns súlyfüggvények esetén (2.4.5 fejezet és 2.7–2.10 lemmák).

Ezek az eredmények a [1, 16] cikkekben és a disszertáció 2.4 fejezetében kerültek közlésre.

### **3. tézis: Konzisztencia megőrző transzformációk a korlátozás-alapú ütemezésben**

Az erőforrás-korlátozott projektütemezési (RCPSP) feladatok modellezésére és megoldására ismert egyik leghatékonyabb megközelítés a korlátozás-alapú ütemezés. E technika hatékonysága nagyban függ a korlátozás programon elvégzett transzformációktól, melyek az eredeti feladat egy könnyebben megoldható reprezentációját állítják elő. A disszertációban két új, úgynevezett



konzisztencia megőrző transzformációt javasoltam korlátozás-alapú ütemezési feladatok megoldására, melyek az ipari feladatok néhány tipikus strukturális tulajdonságának kihasználásával képesek a megoldási folyamat gyorsítására.

**3.1 RCPSP feladatok progresszív megoldásai.** Definiáltam az erőforrás-korlátozott projektütemezési feladatok (RCPSP) progresszív megoldásait. Ezek a megoldások az RCPSP feladatok szokásos korlátozásain túl számos további előzési korlátozást is kielégítenek. Bebizonyítottam, hogy minden RCPSP feladatnak van progresszív megoldása. Következésképpen, az ilyen feladatok megoldása során a keresési tér a progresszív megoldásokra szűkíthető (3.2.2 fejezet és 3.1 tétel).

**3.2 Szabadon kiegészíthető részmegoldások (FCPS).** Definiáltam a korlátozás kielégítési feladatok szabadon kiegészíthető részmegoldásának (freely completable partial solution, FCPS) fogalmát. Egy FCPS a korlátozás programban szereplő változók egy részhalmazának olyan konzisztens lekötése, mely nem korlátozza a fennmaradó változók értékészletét. Bebizonyítottam, hogy a változók lekötése egy FCPS-beli értékükhöz konzisztencia megőrző transzformáció. Heurisztikus algoritmust adtam RCPSP feladatok szabadon kiegészíthető részmegoldásainak konstruálására. (3.2.3, 3.2.4 fejezetek, és 3.2 tétel).

Egy kereskedelmi korlátozás-alapú ütemező rendszer felhasználásával kifejlesztettem egy ütemező eszközt, amely mind a progresszív megoldások, mind az FCPS-ek terén elért eredményeket kihasználja a feladatok megoldása során. A javasolt algoritmusok hatékonyságát ezen szoftver segítségével, ipari feladatokon végzett tesztekkel illusztráltam, melyek során a módszer két nagyságrenddel csökkentette a keresési fák méretét (3.2.4 fejezet).

A tézis a disszertáció 3. fejezetén alapul. Az eredmények a [6, 7, 8, 15] közleményekben kerültek publikálásra.

## 4. Az új eredmények alkalmazása

A disszertációban termelésstervezési és -ütemezési feladatok megoldásával foglalkoztam a rendelésre történő gyártásban. A kitűzött feladatokat és az alkalmazott modelleket a Digitális Vállalatok c. NKFP projekt [MVM03] során, egy multinacionális vállalat hazai gyárának mérnökeivel együttműködve specifikáltuk. Az adott gyár összetett mechanikai szerelvényeket készít az energetikai ipar számára. A projekt kiterjedt a kutatási eredmények gyakorlati hasznosíthatóságának demonstrációjára is. E célból munkatársaimmal egy kísérleti termelésstervező és ütemező rendszert implementáltunk. A kifejlesztett rendszert, a Proterv-II-t sikeresen teszteltük a fenti gyártól kapott valós adatokon.

A disszertációban leírt eredmények közül kimagasló gyakorlati jelentőségűnek tartom az 1. tézisben megfogalmazott aggregációs eljárást, amely lehetővé teszi a termelésstervezés aggregált modelljének automatikus felépítését a bevett vállalati információs rendszerekben készen megtalálható részletes adatokból. Továbbá, az eredmények egy részre érdeklődésre tarthat számot a termelésstervezés és -ütemezés területén kívül is. A telekommunikációs hálózatok tervezése, útvonaltervezés és adatbázisok területén felmerülő egyes problémák is visszavezethetők olyan fapartícionálási feladatokra, ahol a cél a partícionálás magasságának vagy számosságának minimalizálása [MSN97]. A szabadon kiegészíthető rész megoldások terén elért eredmények jól illeszkednek abba a mai trendbe, amely a korlátozás-alapú megoldók hatékonyságának növelését célozza a gyakorlatban felmerülő feladatok bizonyos strukturális tulajdonságainak kihasználásával [WGS03]. Más, gyakran alkalmazott konzisztencia megőrző transzformációkhoz képest az FCPS előnye, hogy nem igényli a célzott strukturális tulajdonságok explicit leírását, ezért rejtett struktúra kiaknázására is alkalmas.

## A disszertációhoz kapcsolódó publikációk

### Külföldön megjelent, idegen nyelvű folyóiratcikkek

- [1] A. Kovács and T. Kis. Partitioning of trees for minimizing height and cardinality. *Information Processing Letters*, 89(4):181–185, 2004.
- [2] J. Váncza, T. Kis, and A. Kovács. Aggregation – the key to integrating production planning and scheduling. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 53(1):377–380, 2004.
- [3] A. Kovács. A novel approach to aggregate scheduling in project-oriented manufacturing. *Projects & Profits*, pages 73–80, October 2004.
- [4] A. Márkus, J. Váncza, T. Kis, and A. Kovács. Project scheduling approach to production planning. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 52(1):359–362, 2003.
- [5] A. Márkus, J. Váncza, and A. Kovács. Constraint-based process planning in sheet metal bending. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 51(1):425–428, 2002.

### Nemzetközi konferencia kiadványában megjelent cikkek

- [6] A. Kovács and J. Váncza. Completable partial solutions in constraint programming and constraint-based scheduling. In *Proc. of the 10th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (Springer LNCS 3258)*, pages 332–346, Toronto, 2004.
- [7] A. Kovács, J. Váncza, and A. Márkus. Structural exploration of constraint-based scheduling problems. In *Proc. of the 37th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, pages 433–439, Budapest, 2004.

- [8] A. Kovács and J. Váncza. Completable partial solutions in constraint programming and constraint-based scheduling. In *Proc. of the CSCLP04 – Joint Annual Workshop of ERCIM / CoLogNet on Constraint Solving and Constraint Logic Programming*, pages 244–257, Lausanne, 2004.
- [9] A. Kovács. A novel approach to aggregate scheduling in project-oriented manufacturing. In *Proc. of ICAPS'03 – the 13th International Conference on Automated Planning and Scheduling, Doctoral Consortium*, pages 63–67, Trento, 2003.
- [10] A. Kovács, J. Váncza, L. Monostori, B. Kádár, and A. Pfeiffer. Real-life scheduling using constraint programming and simulation. In *Intelligent Manufacturing Systems 2003 – Proc. of the 7th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*, pages 213–218, Budapest, 2003. Elsevier.
- [11] A. Kovács and J. Váncza. Constraint feedback in solving incomplete models: A case study in sheet metal bending. In *STAIRS 2002 – Proc. of the Starting Artificial Researchers Symposium*, pages 109–118, Lyon, 2002. IOS.
- [12] F. Deák, A. Kovács, J. Váncza, and T. Dobrowiecki. Hierarchical knowledge-based process planning in manufacturing. In *Digital Enterprise Challenges – Proceedings of the 11th International Conference on Programming Languages for Manufacturing*, pages 428–439, Budapest, 2001. Kluwer.

## Magyarországon megjelent folyóiratcikkek

- [13] P. Egri, A. Kovács, A. Márkus, and J. Váncza. Project-oriented approach to production planning and scheduling in make-to-order manufacturing. *Production Systems and Information Engineering* 2:23–36, 2004.

- [14] A. Kovács, P. Egri, and J. Váncza. Integrált termelésstervezés és ütemezés megrendelésre történő gyártásban. *Gépgyártás*, elfogadva, 2004.

## Hazai és helyi konferenciák kiadványában megjelent cikkek

- [15] A. Kovács. A dominance framework for constraint programming. In *Proc. of the 2004 Mini-symposium of BUTE-DMIS*, pages 26–27, Budapest, 2004.
- [16] A. Kovács. A tree partitioning algorithm for activity formation in aggregate scheduling. In *Proc. of the 2003 Mini-symposium of BUTE-DMIS*, pages 48–49, Budapest, 2003.
- [17] F. Erdélyi, T. Tóth, J. Somló, A. Kovács, B. Kádár, A. Márkus, and J. Váncza. Production management: Taking up the challenge of integration. In *Proc. of the 3rd Conference on Mechanical Engineering*, pages 705–709, Budapest, 2002.
- [18] A. Kovács. Real-world planning with constraints. In *Proc. of the 2002 Mini-symposium of BUTE-DMIS*, pages 26–27, Budapest, 2002.

## Egyebek

- [19] A. Kovács. A korlátozás programozás alapjai. Segédlet a BUTE VIMM 4344 tárgy hallgatói számára, 2003. Elérhető:  
[www.home.mit.bme.hu/~akovacs/publications/CLPsegedlet.pdf](http://www.home.mit.bme.hu/~akovacs/publications/CLPsegedlet.pdf)
- [20] A. Kovács. Algorithms for the support of the selection of machine-tools and candidate subcontractors for a family of mechanical products. Technical Report LICP-01.D2, EPFL, Lausanne.

## Hivatkozások

- [BLN01] P. Baptiste, C. Le Pape, and W. Nuijten. *Constraint-based Scheduling*. Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [Fle03] B. Fleischmann and H. Meyr. Planning hierarchy, modeling and advanced planning systems. In A.G. de Kok and S.C. Graves, editors, *Supply Chain Management: Design, Coordination and Operation*, volume 11 of *Handbooks in Operations Research and Management Science*, pages 457–523. Elsevier, 2003.
- [Han01] E.W. Hans. *Resource Loading by Branch-and-Price Techniques*. PhD thesis, Twente University, 2001.
- [Kis05] T. Kis. A branch-and-cut algorithm for scheduling projects with variable-intensity activities. *Mathematical Programming*, in print, 2005.
- [MSN97] M. Maravalle, B. Simeone, and R. Naldini. Clustering on trees. *Computational Statistics & Data Analysis*, 24(2):217–234, 1997.
- [MVM03] L. Monostori, J. Váncza, A. Márkus, B. Kádár, and Zs.J. Viharos. Towards the realization of digital enterprises. In *Proc. of the 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, pages 99–106, 2003.
- [Wal96] M.G. Wallace. Practical applications of constraint programming. *Constraints*, 1(1):139–168, 1996.
- [WGS03] R. Williams, C. Gomes, and B. Selman. Backdoors to typical case complexity. In *Proc. of IJCAI'03 – the 18th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 1173–1178, Acapulco, 2003.

- [Vol97] T. E. Vollmann, Berry W.L., and Whybark D.C. *Manufacturing Planning and Control Systems*. McGraw-Hill, 1997.