

# Gyártásütemezési módszertanok vizsgálata, adaptálása és kiterjesztése: Költséggel kiegészített időzített automata modell nedves marási feladatok ütemezésére

## 1. BEVEZETÉS

Ütemezési feladatok az élet rengeteg területén előfordulnak, és az adott alkalmazástól függően különböző módszerek adottak a felmerülő problémák megoldására. A gyártásütemezés egy, a gyakorlati alkalmazását tekintve hangsúlyos terület, melynek a vizsgálata több évtizedes múltra tekint vissza.

A korai heurisztikus eszközöket követően a vegyes-egész lineáris programozási (mixed integer linear programming, MILP) modelleken alapuló eszközök kidolgozása vált hangsúlyossá.<sup>2</sup> A MILP modell alapú módszertanok az évek folyamán rengeteg eredményes fejlesztésen estek át, melyek főleg a modellek megoldásának hatékonyságát, valamint annak minél szélesebb körű alkalmazhatóságát célozták meg. Bár a hatékonyság terén az új módszerek nagyságrendi javulásokat hoztak, azonban több esetben az eredmény helyességének, megvalósíthatóságának a garanciája elveszett.<sup>3</sup>

A MILP modelleken alapuló módszerek mellett több másik eszköz is publikálva lett, melyek közül kifejezetten erre a problémaosztályra kifejlesztett modellt alkalmaz az S-gráf módszertan.<sup>4</sup> Az S-gráf egy irányított gráfokon alapuló

---

[1] Tudományos főmunkatárs, Gépészmérnöki, Informatikai és Villamosmérnöki Kar, Informatika Tanszék.

[2] FLOUDAS, C. A. – LIN, X.: Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review, in *Computers & Chemical Engineering*, 28. évf., 2004/11, 2109–2129. o.; MENDEZ, C. A. – CERDA, J. – GROSSMANN, I. E. – HARJUNKOSKI, I. – FAHL, M.: State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes, in *Computers & Chemical Engineering*, 30. évf., 2006/6-7, 913–946. o.

[3] HEGYHÁTI, M. – MAJOZI, T. – HOLCZINGER, T. – FRIEDLER, F.: Practical infeasibility of cross-transfer in batch plants with complex recipes: S-graph vs MILP methods, in *Chemical Engineering Science*, 64. évf., 2009/3, 605–610. o.; FERRER-NADAL, S. – CAPÓN-GARCÍA, E. – MÉNDEZ, C. A. – PUIGJANER, L.: Material transfer operations in batch scheduling. A critical modeling issue, in *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47. évf., 2008, 7721–7732. o.

[4] SANMARTÍ, E. – HOLCZINGER, T. – PUIGJANER, L. L. – FRIEDLER, F. – SANMARTÍ, E. – PUIGJANER, L. L. – FRIEDLER, F.: Combinatorial framework for effective scheduling of multipurpose batch plants, in *AIChE Journal*, 48. évf., 2002/11, 2557–2570. o.; HEGYHÁTI, M. – FRIEDLER, F.: Combinatorial Algorithms of the S-Graph Framework for Batch Scheduling, in *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50. évf., 2011/9. szám, 5169–5174. o.

matematikai modell, mely az ütemezési döntéseket élek formájában modellezi. Ezen a modellen egy korlátozás és szétválasztás (branch-and-bound, B&B) alapú algoritmus keresi meg az optimális ütemezést. A módszertan az évek folyamán sok fejlesztésen esett át, melyek a MILP modellekhez hasonlóan a módszertan gyorsítását és kiterjesztését célozták meg.

Az említett eszközökön túl további megoldásokat is kidolgoztak, melyek időzített automatákat, petri hálókat, speciális gráfokat, korlátprogramozást vagy éppen SMT modelleket alkalmaztak.

A kutatás célja megvizsgálni a kevésbé kidolgozott módszertanokat, azok alkalmazhatóságát, hatékonyságát.

## 2. A KÉT KIVÁLASZTOTT MÓDSZER

A kutatás során a cél két új módszer megvizsgálása volt. A lehetséges eszközök közül az időzített automatákra és az eS-gráf módszertanra esett a választás.

Az időzített automaták választását indokolta, hogy a fent említett módszerek után a legtöbb publikáció ilyen modelleket alkalmazott.<sup>5</sup> További érv volt, hogy a költséggel ellátott, időzített automaták optimális eseménysorának megtalálására több szoftveres megvalósítás létezik már, így ehhez a vizsgálathoz nem szükséges saját megoldó fejlesztése, csupán a meglévő formátumokhoz egy wrapper elkészítése a modellek könnyű teszteléséhez.

Az eS-gráf az S-gráf módszertan egy általánosítása, melynek segítségével összetettebb problémák is könnyen modellezhetővé és megoldhatóvá válnak az alapalgoritmusok változtatása nélkül. A választást többek között indokolta, hogy a terület még teljesen friss, így sok érdekes kérdés nyitott még. A döntés mellett további meghatározó érv volt, hogy az időzített automata és az eS-gráf modellek bizonyos értelemben egymás duálisai. Míg az előbbi esetében a csúcspok állapotokat jelölnek, s a köztük lévő élek jelentik az eseményeket, addig az utóbinál az eseményeknek vannak megfelelően a csúcspok. A két módszer párhuzamos vizsgálatával így párhuzamosan jól láthatóvá válnak az egyes modellezési módszerek előnyei, hátrányai.

A Petri-háló alapú módszerek hasonló elgondoláson alapulnak, mint az időzített automaták megközelítések, azonban sokkal kisebb irodalommal és szoftveres támogatottsággal rendelkeznek.

Az SMT és korlátprogramozás teljesen más, logikai kielégíthetőségen alapuló módszer alapját adhatja, s ennek megfelelően a jövőben mindenképpen tervezük a vizsgálatok ilyen irányú kiterjesztését is.

---

[5] AGUIRRE, A. M. – MÉNDEZ, C. A. – GARCÍA-SÁNCHEZ, Á. – ORTEGA-MIER, M. – CASTRO, P. M.: General framework for automated manufacturing systems. Multiple hoists scheduling solution, *Chemical Engineering Transactions*, 32. évf., 2013, 1381–1386. o.; CASTRO, P. M. – AGUIRRE, A. M. – ZEBALLOS, L. J. – MÉNDEZ, C. A.: Hybrid Mathematical Programming Discrete-Event Simulation Approach for Large-Scale Scheduling Problems Ind. Eng. Chem. Res., in *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50. évf., 2011, 10665–10680. o.

### 3. A KIVÁLASZTOTT PROBLÉMAOSZTÁLY

A módszertanok összehasonlításához egy összetettebb, gyakorlatból származó feladatosztályt választottunk, melynek vizsgálata már az irodalomban is számottevő. Ez a feladatosztály a félvezetőgyártás egyik lépésének, a nedves marási fázisnak az ütemezése. Ezen fázisban a szilícium lapkákat egy robotkar szállítja kádak között, s ennek az ütemezését szükséges úgy megadni, hogy az egyes lapkák a maró- illetve lemosó kádokban csak egy megengedett intervallumon belüli időt tölthessenek el. Ennek a feladatosztálynak az ütemezésére több MILP modell is kidolgozásra került,<sup>6</sup> valamint az S-gráf módszertan is alkalmazva lett rá.<sup>7</sup>

A feladatosztály azonban még mindig tág, és sok különböző paramétertől függ az alkalmazható módszerek száma, hatékonysága. A vizsgálat alapját a leggyakoribb, és egyben legleszűkítettebb feladatosztály adja, melyben:

- Egymást felváltva követi lineárisan  $n$  maró és  $n$  tisztító kád.
- Minden lapkának az összes kádon balról jobbra kell végighaladnia.
- Minden kádból pontosan egy áll rendelkezésre.
- A rendszerben egyetlen robotkar adott.

A leszűkített feladatosztályon történő tesztelést követően az egyes általánosítások modellezési lehetőségei is megvizsgálásra kerülnek, mint például:

- több ugyanolyan kád
- tetszőleges kádsorrendű lapkák
- több robotkar
- megosztott sín pályák
- üres mozgások figyelembe vétele
- ...

### 4. EGY LEHETSÉGES AUTOMATA MODELL A KIVÁLASZTOTT ÜTEMEZÉSI FELADATRA

A kutatás során az UPPAAL<sup>8</sup> modellező eszközt használtuk, mely az alap időzített automatához képest egy sok funkcionalitással kiterjesztett modellt támogat. Ezeket a költségekkel, saját változókkal, stb. kiterjesztett időzített automatákon alapulva a kiválasztott problémaosztály feladatai több módon is modellezhetők. Modellezési döntés kérdése például, hogy a robotkar helyzetét állapotoknak, vagy egy sablonváltozónak feleltetjük-e meg. Elsőként egy olyan modell került kidolgozásra, mely csak az alapvető automata modell eszközeit használja:

---

[6] CASTRO – AGUIRRE – ZEBALLOS – MÉNDEZ: i. m.; HEGYHÁTI, M. – ÖSZ, O. – KOVÁCS, B. – FRIEDLER, F.: Scheduling of Automated Wet-Etch Stations, in *Chemical Engineering Transactions*, 39. évf., 2014, 433–438.

[7] HEGYHÁTI, – ÖSZ, – KOVÁCS, – FRIEDLER, i. m.

[8] BENGTSOON, J. – LARSEN, K. G. – LARSSON, F. – PETTERSSON, P. – YI, W.: {SC UPPAAL} – a Tool Suite for Automatic Verification of Real-Time Systems, in *Proceedings of Workshop on Verification and Control of Hybrid Systems*, Lecture Notes in Computer Science, nr. 1066., 1995, 232–243.

- állapotok
- szinkronizáló események
- órák
- őrfeltételek az állapotátmeneteken
- órannullázások az állapotátmeneteken

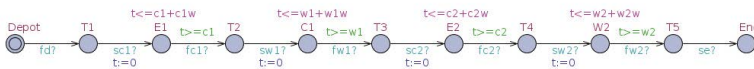
Az elkészült modell alkalmaz továbbá úgynevezett „committed” állapotokat, azonban ezek a háttérben órákká, nullázásokká és őrfeltételekké fordítódnak le, azaz az alap eszközökkel is kezelhetők, csak a felhasználó számára nyújtanak modellezési könnyebbséget, jobb átláthatóságot. Az így felépített modellben azonban a sablonok mérete a feladat bemeneti paramétereitől függnék. Az alábbiakban az átláthatóság kedvéért egy 2+2 kádas példán szemléltetjük a modell felépítését.

#### 4.1. Sablonok

Az elkészült modell 5 féle sablont alkalmaz:

Lapkákhoz tartozó sablon

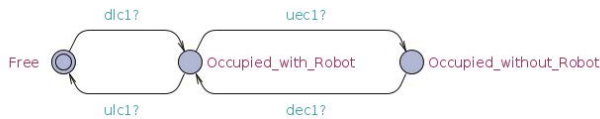
A sablonnak 8 inicializáló paramétere van ( $c1, c1w, w1, \dots$ ), melyek az egyes kádokban eltöltött szükséges időt, valamint az azt követő maximális várást adják meg.



Az automata állapotai a lapkák helyzetét modellezik, mely lehet valamely kád, valamely szállítás a robotkaron, vagy a bemeneti / kimeneti puffer. A sablonnak egyetlen  $t$  belső órája van, mely a kádban töltött idők mérésére szolgál, s az egyes átmenetek erre az órára adnak korlátokat, nullázásokat. A szinkronizálendő események kibocsátói a Robot sablonban találhatóak.

Kádak sablonja

A sablonnak nincs inicializáló paramétere, és három állapottal rendelkezik, melyek azt jelzik, hogy a kád teljesen üres, a kádban van lapja, de robotkar nincs, vagy van lapka, amit épp egy robotkar mozgat.

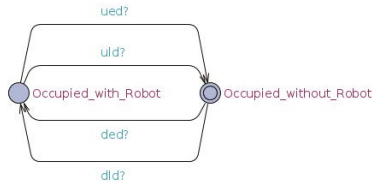


Saját órája ennek a sablonnak nincsen, a szinkronizálendő események kibocsátói szintén a Robot sablonban találhatóak. Ebből a sablonból hasonló módon, az események megfelelő cseréjével létre kell hozni minden kád számára egyet.

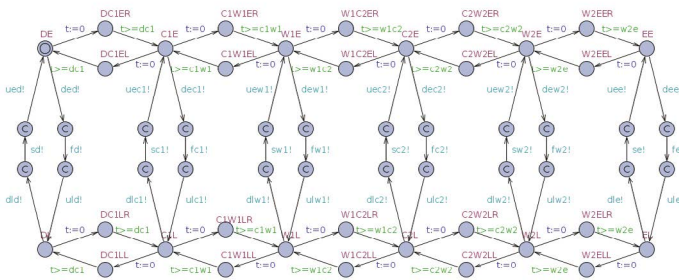
## Pufferek sablonja

A pufferek sablonja nagyban hasonlít a kádak modelljére azzal a különbséggel, hogy nincsen teljesen szabad állapot.

## A robotkar sablonja



Az összes közül a robotkar sablonja a legösszetettebb. Az említett feladatméretek mellett 5 inicializáló paraméterrel rendelkezik ( $dc1, c1w1, w1c2, \dots$ ), melyek az egyes szakaszok közötti mozgási időt adják meg.



Az automatában külön állapot felel meg a robotkar minden helyzetének, és minden duplázva aszerint, hogy tart-e éppen egy lapkát vagy sem. Minden szakaszon történő mozgáshoz hozzá van rendelve 4 állapot a mozgás iránya, és a lapkatartás szerint. További néhány állapot felel a lapkák felvételének, lerakásának modellezéséért. Az állapotok közötti események váltják ki a korábbi sablonokban már bemutatottakat. A sablonban egyetlen  $t$  óra szerepel, mely a mozgási idők mérésére szolgál, s az egyes átmenetek erre az órára adnak korlátokat, nullázásokat.

## Fiktív költség sablon

Az optimalizáláshoz szükséges  $COST$  paraméter egy külön egyállapotú és állapótmenet mentes sablonban található, és az állapot invariánsában eggyel nő.

## 4.2. Rendszerdeklarációk és a modell megadása

A rendszer működéséhez a következő deklarációk szükségesek:

```
chan dld, ued, ded, uld;
chan dle, uee, dee, ule;
chan dlc1, uec1, dec1, ulc1;
chan dlw1, uew1, dew1, ulw1;
chan dlc2, uec2, dec2, ulc2;
chan dlw2, uew2, dew2, ulw2;

chan sd, fd;
chan se, fe;
chan sc1, fc1;
chan sw1, fw1;
chan sc2, fc2;
chan sw2, fw2;

clock time;
```

A modell egy kétlapkás példa esetében a következő módon adható meg:

```
Robot1 = Robot (10,20,15,18,25);
Job1=Job( 430, 0, 670, 10000, 1130, 0, 630, 10000);
Job2=Job( 580, 0, 670, 10000, 820, 0, 650, 10000);
system Chemical1,Water1,Chemical2,Water2,Robot1,Depot,End,Cost,Job1,Job2;
```

## 4.3. A modell futása

A modell futtatása során az UPPAL-CORA szoftvere megadja az optimális megoldást, mely 38.54 időegység. Az optimális megoldáshoz tartozó trace kimenthető, és az UPPAL-CORA szoftverben tovább elemezhető.

## 4.4. Modell kiterjeszthetősége, alternatív modellezési lehetőségek

A fentebb bemutatott modell könnyen kiterjeszthető a következő dolgok figyelembe vételére:

- **üres mozgások:** a modell jelenleg feltételezi, hogy lapkával és anélkül is ugyanannyi a robotkar mozgási ideje. Ha egy feladat esetében ez eltérő volna, akkor könnyedén megadható a modellben ez inicializáló paraméterként, és a robotkar sablonjában a felső állapotok közötti átmeneteken ezek az adatok szerepelnének az őrfeltételekben.
- **lapkafelvételi idők:** amennyiben számottevő az az idő, míg a robotkar az egyes lapkákat felveszi, leadja, úgy ez szintén egyszerűen megadható inicializáló paraméterként, és a mozgásokhoz hasonlóan a lapkafelvételek és leadások eseményeinek óránullázásaival és őrfeltételeivel modellezhetővé válik.

- több robotkar: a robotkar sablonjának többszöri példányosításával egy olyan modell keletkezne, mely hibás megoldásokat szolgáltat, azonban néhány további módosítást követően ez is modellezhető.
- több azonos kád: a kádak sablonjának többszöri példányosításával a többi modell módosítása nélkül könnyen kezelhetővé válik ez a kiterjesztés.
- különböző kádsorrendek: a lapkák sablonján az események és állapotok sorrendjének cseréjével ez könnyen modellezhető.

Költségekkel kiegészített időzített automatákkal a kiválasztott feladatosztály más módon is modellezhető. Egy lehetséges megközelítés például, hogy a lapkák sablonja a kádak számától függetlenül 4 állapotot tartalmazzon csak: bemeneti puffer, szállítás, kád, kimeneti puffer. Hogy a középső két állapot a jelenlegi sok állapot közül éppen melyiket jelenti, azokat egészértékű sablonváltozókkal lehet modellezni. Hasonlóképp módosulhat például a robotkar modellje is, valamint a kádaké is általánosíthatóvá válik. Ezzel a módosítással egy sokkal könnyebben felparaméterezhető modellt kapunk, azonban vizsgálat szükséges annak megállapításához, hogy ez a hatékonyságot milyen formában befolyásolja.

## 5. LEHETSÉGES ES-GRÁF MODELLEK A KIVÁLASZTOTT ÜTEMEZÉSI FELADATRA

Korábban az S-gráf módszertan már ki lett terjesztve a kiválasztott feladatosztályra. Mivel az eS-gráf módszertan egy bővebb, általánosabb modell, ezért az ott vázolt megoldás működőképes az új modellen is. Ugyanakkor azonban megadható egy olyan modell is, mely az eredeti B&B algoritmus módosítása nélkül is képes megfelelően kezelni ezeket a feladatokat. Jelen dokumentumban ez a modell, valamint annak kiterjesztési lehetőségei, nehézségei nem kerülnek bemutatásra.

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS, TERVEK

Elmondható, hogy mindkét módszertan képes a rögzített feladatosztály problémáit megoldani, azonban az egyes modellezési lehetőségek közül a leghatékonyabb kiválasztásához még több vizsgálat elvégzése szükséges. Az automata alapú modell kiterjeszhetősége mindenképp figyelemre méltó, hiszen az összes gyakorlati szempont könnyen implementálható apróbb változtatásokkal, vagy akár azok nélkül is.

A jövőben a különböző modellek hatékonyságának összehasonlítása az elsődleges cél.

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- AGUIRRE, A. M. – MÉNDEZ, C. A. – GARCÍA-SÁNCHEZ, Á. – ORTEGA-MIER, M. – CASTRO, P. M.: General framework for automated manufacturing systems. Multiple hoists scheduling solution, *Chemical Engineering Transactions*, 32. évf., 2013, 1381–1386. o.
- BENGTSOON, J. – LARSEN, K. G. – LARSSON, F. – PETTERSSON, P. – YI, W.: {\SC UPPAAL} – a Tool Suite for Automatic Verification of Real-Time Systems, in *Proceedings of Workshop on Verification and Control of Hybrid Systems*, Lecture Notes in Computer Science, nr. 1066., 1995, 232–243.
- CASTRO, P. M. – AGUIRRE, A. M. – ZEBALLOS, L. J. – MÉNDEZ, C. A.: Hybrid Mathematical Programming Discrete-Event Simulation Approach for Large-Scale Scheduling Problems Ind. Eng. Chem. Res., in *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50. évf., 2011, 10665–10680. o.
- FERRER-NADAL, S. – CAPÓN-GARCÍA, E. – MÉNDEZ, C. A. – PUIGJANER, L.: Material transfer operations in batch scheduling. A critical modeling issue, in *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47. évf., 2008, 7721–7732. o.
- FLOUDAS, C. A. – LIN, X.: Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review, in *Computers & Chemical Engineering*, 28. évf., 2004/11, 2109–2129. o.
- HEGYHÁTI, M. – FRIEDLER, F.: Combinatorial Algorithms of the S-Graph Framework for Batch Scheduling, in *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50. évf., 2011/9. szám, 5169–5174. o.
- HEGYHÁTI, M. – MAJOZI, T. – HOLCZINGER, T. – FRIEDLER, F.: Practical infeasibility of cross-transfer in batch plants with complex recipes: S-graph vs MILP methods, in *Chemical Engineering Science*, 64. évf., 2009/3, 605–610. o.
- HEGYHÁTI, M. – ÖSZ, O. – KOVÁCS, B. – FRIEDLER, F.: Scheduling of Automated Wet-Etch Stations, in *Chemical Engineering Transactions*, 39. évf., 2014, 433–438. o.
- MENDEZ, C. A. – CERDA, J. – GROSSMANN, I. E. – HARJUNKOSKI, I. – FAHL, M.: State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes, in *Computers & Chemical Engineering*, 30. évf., 2006/6-7, 913–946. o.
- SANMARTI, E. – HOLCZINGER, T. – PUIGJANER, L. L. – FRIEDLER, F. – SANMARTÍ, E. – PUIGJANER, L. L. – FRIEDLER, F.: Combinatorial framework for effective scheduling of multipurpose batch plants, in *AIChE Journal*, 48. évf., 2002/11, 2557–2570. o.