

Ipar 4.0 ütemezési feladatok megoldása

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Bakon Krisztián Attila

Témavezetők

Holczinger Tibor

Jaskó Szilárd

Informatikai Tudományok Doktori Iskola

Pannon Egyetem

Magyarország, Veszprém

Január 2026

Tartalmi kivonat

A disszertáció korszerű ütemezési technikákat vizsgál dinamikus gyártási környezetben, különös tekintettel a reaktív alkalmazkodás, a köztes tárolás kezelése és a többcélú optimalizálás integrálására egy egységes keretrendszerben. A kutatás célja a növekvő gyártási komplexitás és a valós idejű változások kezelése, két fő ütemezési paradigmán keresztül: a reaktív ütemezésen (dinamikus megrendelések esetén), valamint a determinisztikus ütemezésen (határidők és tárolási korlátok figyelembevételével).

A kutatás első része egy S-gráfon alapuló, reaktív szétválasztás és korlátozás ütemezési modellt dolgoz ki, amely képes új megrendelésekhez igazodni előre meghatározott újraütemezési irányelvek szerint. A különböző irányelvek összehasonlító elemzése kimutatja, hogy a teljes újraütemezés következetesen a legjobb átfutási időt eredményezi, magasabb számítási költség árán. Az algoritmus új mechanizmusokat vezet be, mint például a zéró-várákozás él, a feladat-sorrend megőrzése, valamint a részmegoldások újrahasonosítása, amelyek lehetővé teszik a hatékony valós idejű alkalmazkodást.

A dolgozat második része egy determinisztikus modellt mutat be, amely integrálja a köztes tárolási irányelveket a határidők betartásával. A dolgozat egy többcélú költségfüggvényt vezet be, amely célja a korai és késedelmes teljesítések büntetéseinek, valamint a köztes tárolási idő minimalizálása, az ütemezés helyi keresési műveleteken alapuló dinamikus finomhangolásával. A megközelítés jelentős előrelépést mutat a szűkös tárolási kapacitásokkal rendelkező gyártási környezetekben, mivel minimalizálja az eszközblokkolást a folyamatok megszakítása nélkül.

Végezetül a dolgozat egy olyan átfogó, többcélú ütemezési keretrendszert mutat be, amely egységesíti a reaktív és determinisztikus modellek előnyeit. A rendszer ötvözi az irányelvekre épülő újraütemezést, a tárolásra érzékeny feladatelhelyezést és a határidő-optimalizálást egy S-gráf alapú modellben. A keretrendszert elméleti megfogalmazás, algoritmikus eljárások és szemléletes példapéldák támasztják alá.

Tézisek

1st thesis group: *Reaktív ütemezés rugalmas munkahelyrendszerekben a makespan minimalizálását célozza célzott S-gráf-módosítások alkalmazásával – zero-wait élek beszúrásával és szelektív kiadási csomópont-zárolással – három különböző politika mellett (csak hozzáfűzés, részleges beszúrás szigorú vagy rugalmas késleltetéssel, valamint teljes újraütemezés), amelyek zökkenőmentesen integrálódnak berendezés- vagy feladatalapú elágaztatás révén.*

(A téziscsoporthoz kapcsolódó saját publikációk: [P1], [P2])

A megközelítés lehetővé teszi új megrendelések dinamikus integrálását a számítási hatékonyság és a makespan optimalizálásának megőrzése mellett. A módszertan a feladatokat három halmazba sorolja: már elindított, még nem ütemezett és új feladatokra, majd egy gyöker részproblémát hoz létre zero-wait élek beszúrásával, amelyek szükség esetén rögzítik a kezdési időpontokat. A politikafüggő gráfszerkesztések megőrzik vagy felszabadítják a feladatsorrendeket és időzítéseket: a csak hozzáfűzés politikája minden nem ütemezett feladatot zárol; a szigorú beszúrás kizárólag meglévő üresjáratok résekbe enged elhelyezést; a rugalmas késleltetéses beszúrás meglévő feladatok eltolásával hoz létre helyet; míg a teljes újraütemezés minden még nem végrehajtott feladatot felszabadít. A berendezésalapú elágaztatás a gépkiosztásokat szekvenciálisan kezeli, míg a feladatalapú elágaztatás aktivitási listákra támaszkodik; mindkét esetben csupán minimális kiegészítésekre – például

réskorlátozásokra – van szükség a politikák érvényesítéséhez. A kiadási csomópontok zárolásának, a zero-wait éleknek és a precedenciaéleknek az S-gráf keretrendszerén belüli egységes kezelésével a megközelítés kontrollált rugalmasságot biztosít az új megrendelések dinamikus integrációjához, egyensúlyt teremtve a számítási hatékonyság és a makespan optimalizálása között.

2nd thesis group: *A kiterjesztett S-gráf keretrendszer együttesen minimalizálja a korai-késési büntetéseket és a közbenső tárolási időt rugalmas munkahelyrendszerek határidős ütemezésében, zero-wait élmódosításokra, berendezés- és receptélek szerinti sorrendezésre, valamint LP-megoldóval való hibrid integrációra támaszkodva, az időszerűség és az anyagkezelés egyensúlyának megteremtésére NIS és UIS politikák mellett.*

(A téziscsoporthoz kapcsolódó saját publikációk: [P3])

A keretrendszer az S-gráf modellt úgy bővíti, hogy egyszerre kezelje a határidők betartását és a közbenső tárolás minimalizálását rugalmas munkahelyrendszerekben. Zero-wait élmódosításokat alkalmaz a folyamatban lévő feladatok kezdési idejének szigorú rögzítésére, míg a recept- és ütemezési élek a precedencia- és erőforrás-korlátozásokat írják le. A kettős célfüggvény az összes koraiságot, késést és közbenső tárolási időt egyesíti, és irányt ad az elágaztatási döntéseknek. Lokális ütemezési módosítások csökkentik az üresjáratú tárolást, amennyiben ez megvalósítható, míg a hibrid megközelítés minden részleges S-gráfot LP-modellé alakít át szoros alsó korlátok számítása és a feladatidőzítések finomítása érdekében. Ez az

integrált stratégia megvalósítható, kompakt ütemterveket biztosít, amelyek betartják a határidőket és minimalizálják a készlettartási költségeket, moduláris és rugalmas megoldást kínálva összetett ütemezési környezetekben.

3rd thesis group: *Egy egységes reaktív S-gráf keretrendszer integrálja a határidő-optimalizálást és a közbenső tárolás kezelést rugalmas munkahelyrendszerekben, lehetővé téve új megrendelések dinamikus integrációját NIS/UIS politikák mellett, politikavezérelt gráfbővítések és tárolástudatos konfliktuskezeléssel kiegészített branch-and-bound keresés alkalmazásával.*

(A téziscsoporthoz kapcsolódó saját publikációk: [P4])

A keretrendszer az S-gráf modellt úgy terjeszti ki, hogy egyidejűleg kezelje a határidő-optimalizálást és a közbenső tárolás menedzsmentjét rugalmas munkahelyrendszerekben. Politikavezérelt gráfbővítéseket alkalmaz – például zero-wait éleket a kezdési idők szigorú rögzítésére és szelektív kiadási csomópont-zárólást – az új megrendelések dinamikus integrációjának támogatására mind NIS, mind UIS politikák esetén. A branch-and-bound keresés tárolástudatos konfliktusfeloldást alkalmaz, amely a tárolási tartalékok újraelosztásával oldja fel az ütközéseket az ütemezés megvalósíthatóságának megőrzése mellett. A reaktív alkalmazkodóképesség és a többcélú optimalizálás integrálásával a keretrendszer robusztus megoldást kínál dinamikus, bizonytalansággal és egymással versengő célokkal jellemezhető gyártási környezetek kezelésére.

A szerző publikációi

A doktori kutatás főbb eredményei lektorált nemzetközi folyóiratokban kerültek publikálásra, valamint hazai és nemzetközi konferenciákon kerültek bemutatásra. Ez a fejezet a szerző publikációit tartalmazza, a disszertációhoz való kapcsolódásuk szerint csoportosítva. Az egyes publikációkhoz tartozó téziscsoportot zárójel jelzi. A publikációk megjelenésük időrendi sorrendjében kerülnek felsorolásra. A publikációk teljes és naprakész jegyzéke elérhető a szerző Magyar Tudományos Művek Tára (MTMT) adatbázisban vezetett nyilvános profilján:

<https://m2.mtmt.hu/api/author/10071598>

A disszertációhoz közvetlenül kapcsolódó publikációk:

[P1] **Bakon Krisztián Attila**, Holczinger Tibor, Süle Zoltán, Jaskó Szilárd és Abonyi János: *Scheduling Under Uncertainty for Industry 4.0 and 5.0*, IEEE Access, 10. kötet, 74977–75017. o., 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3191426.

Impaktfaktor: 3,367

[P2] **Bakon Krisztián Attila**, Holczinger Tibor: *S-Graph-Based Reactive Scheduling with Unexpected Arrivals of New Orders*, Machines, 2024. DOI: 10.3390/machines12070446.

Impaktfaktor: 2,1

[P3] **Bakon Krisztián Attila**, Holczinger Tibor: *Addressing Due Date and Storage Restrictions in the S-Graph Scheduling Framework*, Machines, 2025. DOI: 10.3390/machines13020131.

Impaktfaktor: 2,1

[P4] **Bakon Krisztián Attila**, Holczinger Tibor: *Reactive Scheduling under Due-Date and Intermediate Storage Constraints: A Conceptual Multi-Objective Approach*, in: Central European Conference on Information and Intelligent Systems (CECIIS) konferenciakötet, Varaždin, Horvátország, 2025.

A szerző további publikációi (a disszertációhoz közvetlenül nem kapcsolódó munkák):

[N1] **Bakon Krisztián Attila**, Holczinger Tibor, Jaskó Szilárd: *Demonstration of Maturity Questions with Multipurpose Digital Factory*, Logistics – Information Technology – Management, konferencia-előadások absztraktkötete, 13. o., 2021.

[N2] **Bakon Krisztián Attila**, Holczinger Tibor, Jaskó Szilárd, Kaszás Nikoletta: *Tourism 4.0 and the Path of Achievement*, VI. Nemzetközi Tudományos Konferencia a Turizmusról és Biztonságról, 225–237. o., 2022. ISBN: 9789633962237

[N3] **Bakon Krisztián Attila**, Holczinger Tibor, Jaskó Szilárd: *Production Flow of Customized Products in a Digital Factory*, Procedia Computer Science, 200. kötet, 1201–1208. o., 2022. DOI: 10.1016/j.procs.2022.01.320.

[N4] Hegyháti Máté, **Bakon Krisztián Attila**, Holczinger Tibor: *Optimization with Uncertainties: A Scheduling Example*, Central European Journal of Operational Research, 2023. DOI: 10.1007/s10100-023-00854-4.

Impaktfaktor: 2,407

[N5] **Bakon Krisztián Attila**: *Agile Circularity: Reactive Scheduling Approaches*, in: Mastering Time, 5. fejezet, IntechOpen, Rijeka, 2025. DOI: 10.5772/intechopen.1006167.