



## ÜTEMEZÉSI MÓDSZER A TECHNOLÓGIAI FOLYAMATTERVEZÉS ÉS A GYÁRTÁSIRÁNYÍTÁS INTEGRÁCIÓJÁNAK TÁMOGATÁSÁRA

KULCSÁR GYULA

Miskolci Egyetem,

Informatikai Intézet

[gyula.kulcsar@uni-miskolc.hu](mailto:gyula.kulcsar@uni-miskolc.hu)

KULCSÁRNÉ FORRAI MÓNICA

Miskolci Egyetem,

Informatikai Intézet

[monika.kulcsarne@uni-miskolc.hu](mailto:monika.kulcsarne@uni-miskolc.hu)

**Absztrakt.** A termelésinformatika folyamatosan nagy kihívásokkal néz szembe az intelligens gyártást támogató fejlesztések terén. Ide tartoznak a gyártásirányítási és a technológiai folyamattervezési feladatok integrációs problémái is. A cikk bemutatja a termelési finomprogramozás kiterjesztett koncepcióját, amely előnyösen alkalmazható a rugalmas gyártásirányítás és a robusztus technológiai folyamattervezés integrálásának támogatására. Egy illusztratív példán keresztül kerül bemutatásra az integrációt támogató ütemezési módszer.

**Kulcsszavak:** Technológiai folyamattervezés, gyártásirányítás, ütemezés, szimuláció, többcélú optimalizálás, kereső algoritmus.

### 1. Bevezetés

A termelési folyamatok irányításában a kiber-fizikai rendszer (Cyber-Physical Systems, CPS) paradigma egyre fontosabb szerepet játszik. A CPS paradigma szerint a korszerű termelési rendszereket és folyamatokat a fizikai anyagfeldolgozás és az információfeldolgozás mély, közvetlen és valós idejű integrálása jellemzi. Ennek fő oka az egyre átfogóbb automatizálás, valamint az összes mérnöki és irányítási funkciót átfogó informatikai integráció.

A diszkrét gyártás területén a hatékony és jövedelmező termelés mellett nagy jelentőséggel bír a vevői igények kiszolgálási színvonala [1]. Az agilis gyártási stratégia alkalmazása azokra a gyártókra jellemző, akik gyorsan akarnak reagálni az ügyfelek igényeire és a piaci változásokra. Az agilis gyártóknak figyelembe kell venniük, hogy a vállalati teljesítmény mérésének legfontosabb eleme a magas szintű szállítókészség, ami a vevői megrendelések megbízható és pontos teljesítését jelenti [2].

Az összetett és bonyolult folyamatok hatékony irányításához a gyakorlatban főként hierarchikus architektúrákat és visszacsatolós szabályzókat alkalmaznak. A visszacsatolás meghatározott mennyiségek fizikai folyamatokon alapuló mérését teszi szükségessé a termelés végrehajtásának szintjén. Ezen túlmenően a különböző irányítási szinteken általánosan származtatott (pl. aggregált, átlagolt, kumulált stb.) mutatókra van szükség a termelési folyamatok absztrakt „teljesítményének” számszerűsítéséhez [3]. Az ipari tapasztalatok azt mutatják, hogy ezek a

kulcsteljesítménymutatók (Key Performance Indicator, KPI) egyre jelentősebb szerepet játszhatnak a stabil és sikeres termelés biztosításában, valamint a termelés hatékonyságának javításában mind helyi (műhelyi), mind globális (vállalati) szinten [1] [4].

Az ütemezési modellek szintén nagy mértékben befolyásolják a termelési folyamatok rugalmasságát, hatékonyságát és költségét. A technológiai folyamattervek készítése és a termelési ütemtervek generálása erősen összefonódnak. A folyamattervek alapvetően korlátokat és alternatívákat szolgáltatnak az ütemező számára, míg a termelésirányítás időről-időre változó igényeket fogalmaz meg a technológiai folyamattervezés felé. A termelési ütemtervek elkészítésének módja és annak minősége alapvetően meghatározza a termelés teljesítménymutatóinak alakulását.

## 2. A technológiai folyamattervezés és a gyártásirányítás integrációs lehetőségei

A technológiai folyamattervezési (Computer Aided Process Planning, CAPP) és gyártásirányítási (Manufacturing Execution System, MES) funkciók erősen befolyásolják a gyártás hatékonyságát, gazdaságosságát, az erőforrások kihasználását és a termékek kiszállítási idejét. Sok kutató foglalkozik a folyamattervezési és ütemezési (Integrated Process Planning and Scheduling, IPPS) funkciók integrálásának szükségességével a rugalmasság elősegítése és a gyártási folyamatok javítása érdekében. Különböző integrációs megközelítési javaslatokat fogalmaztak meg a folyamattervezési és ütemezési komponensek közötti információcsere fokozására és a termelés globális optimalizálásának elérésére [5], [6].

A következő alfejezetekben néhány alapvető integrációs megközelítést mutatunk be azok előnyeivel és hátrányaival együtt. A szakirodalomban publikált főbb kategóriák a következők: (1) nemlineáris megközelítés, (2) zárt ciklusú megközelítés, (3) elosztott megközelítés és (4) egyéb megközelítések, ahol az utolsó kategória a különböző speciális és kombinált megközelítések heterogén gyűjtőcsoportja.

### 2.1. Nemlineáris megközelítés

A nemlineáris megközelítésben (Non-Linear Approach, NLA) a lehetséges folyamattervek többféle, rugalmas vagy alternatív formában készülnek minden egyes alkatrészhez és minden termékhez a gyártás/összeszerelés előtt. A CAPP figyelembe veszi a gyártórendszer működését, az elvégzendő műveletek sorrendi kötöttségeit és a végrehajtás rugalmasságát. A nemlineáris folyamattervek (NLPP-k) generálása azon alapul, hogy egy adott műveletet általában különböző gépeken lehet végrehajtani, a szükséges gyártási műveletek sorrendje felcserélhető, valamint ugyanazon objektum sokszor különböző műveletekkel is előállítható. Általában az NLA megközelítés irányított egyirányú információáramlást használ a folyamattervezéstől a termelés ütemezéséig. Ezáltal az ütemezés eredeti problématerét kibővítik az NLPP-k. A probléma megoldására számos kutató dolgozott ki és javasolt különböző döntéshozatali megközelítéseket. Néhány példa ezek közül a következő:

- mesterséges neurális hálózatra és szimulációra alapozott módszer [7],
- szimuláción alapuló genetikusan algoritmus [8],
- fejlett prediktív ütemezési módszerre alapozott módszer [9],
- ágens-alapú hangyatelep-optimalizáló algoritmusra alapozott módszer [10],
- aktív tanulású genetikusan algoritmusra alapozott módszer [11],

- korlátozásprogramozási eljárásra alapozott módszer [12].

## 2.2. Zárt ciklusú megközelítés

A zárt ciklusú megközelítésben (Closed-Loop Approach, CLA) a folyamattervezés megkísérli figyelembe venni a dinamikus erőforrás-elérhetőséget és a műhelyállapot-információkat. A CLA-t valós idejű vagy dinamikus folyamattervezésnek is nevezik, mivel a folyamattervek a gyártásütemezési vagy gyártásirányítási modulok dinamikus visszacsatolása alapján készülnek.

Az egyik CLA kategória a kétfázisú (vagy réteges) integrációs architektúra. Jellemzően statikus (off-line) tervezési és dinamikus (on-line) tervezési fázisokat különböztetnek meg. Az első fázis alternatív makroszintű terveket és előrejelző ütemezéseket generál. A második fázisban a rendszer figyelembe veszi a termelési feltételek változásait (az erőforrások tényleges kihasználtságát és rendelkezésre állását), és módosítja vagy újragenerálja az alternatív folyamatterveket és üzemi ütemterveket [13] [14].

Különböző javasolt konkrét architektúrák is találhatók a szakirodalomban, amelyek visszacsatolt szabályzókörök segítségével integrálják a folyamattervezési és ütemezési funkciókat. A zárt ciklusú megoldás termelési korlátokat és célfüggvényeket tartalmaz, amelyek az on-line ütemező modultól az off-line folyamattervező modulhoz érkeznek visszajelzésként, hogy megkönnyítsék a meglévő megoldások tervezését vagy újratervezését.

Ügynök-alapú (Agent-Based) és tárgyalási protokollon alapuló holonikus megközelítéseket is kidolgoztak az IPPS-hez [15].

## 2.3. Elosztott megközelítés

Az elosztott megközelítés (Distributed Approach, DA) csökkenti a CLA összetettségét azáltal, hogy az integrált folyamattervezési és termelésütemezési döntéseket több döntési fázisra osztja fel.

A folyamattervezési és ütemezési feladatokat gyakran két szakaszra osztják: az előtervezésre és a végső tervezésre. Az előtervezési szakasz a gyártási munkák (job) terméktípusait elemzi. Felismeri a termékjellemzőket és azok összefüggéseit, meghatározza a megfelelő gyártási folyamatokat és megbecsüli a szükséges gépi képességeket. Az utolsó tervezési szakasz a műveleteket hozzárendeli a rendelkezésre álló erőforrásokhoz, és meghatározza a munkavégzés konkrét jellemzőit. A folyamattervezés és az ütemezés közötti kölcsönhatások mindkét fázisban érvényesülnek.

A szakirodalomban vannak olyan megközelítések is, amelyekben az integrált folyamattervezési és ütemezési feladatokat három szintre vagy fázisra osztják. Például Huang et al. a [17] publikációban az integrációs problémát a következő három fázisra bontják:

- előtervezés,
- párosítási tervezés és
- végső tervezés.

Az előtervezés a termék műszaki gyártási elemzése a megmunkálási követelmények és korlátok azonosítására. Ezt a feladatot korai szakaszban hajtják végre, amint a terméktervezés elkészült. A párosítás tervezése a szükséges munkaműveleteket a rendelkezésre álló termelési erőforrások működési képességeivel egyezteteti. Ez a módszer akkor kerül végrehajtásra, amikor a gyártási rendelést aktiválják. A végső tervezés elkészíti a termék részletes gyártási terveit a kiválasztott berendezéshez. Ez a tervezési fázis közvetlenül a gyártás megkezdése előtt hajtódik végre. További megközelítésekről ad jó áttekintést a [16] publikáció.

### 3. A CAPP-MES integráció támogatása

A számítógépes integráció jelentős sikereket ért el a konstrukciós tervezés, a termék élettartam menedzsment, a technológiai folyamattervezés (CAD-PLM-CAPP), valamint a vállalatirányítás, ügyfélkapcsolat menedzsment, beszállítói hálózat menedzsment, és a gyártási erőforrások tervezése (ERP-CRM-SCM-MRP) funkciók területén. A folyamatközele (MES) funkciók integrációjában azonban még mindig sok a megoldatlan probléma.

A számítógépes integráció nagyon hatékonynak bizonyul, mert növeli a technológiai folyamattervezés robusztusságát, és lehetővé teszi új megközelítések bevezetését a műveletek optimalizálására. Egy ilyen integráció megvalósítása a funkcionális komponensek algoritmusaira, szolgáltatásaira reagál, és új, magas követelményeket támaszt. Ilyen követelmények például a következők:

- összeszerelési komponensek alternatíváinak generálása;
- előgyártási terv-alternatívák előállítás;
- alternatív új útvonalak létrehozása;
- rugalmas és robusztus műveletek tervezése és alkalmazása;
- többcélú megmunkáló központok és szerszámrendszerek használata;
- sorozatnagyságok dinamikus generálása a munkatervezésben;
- több célhoz egyidejűleg alkalmazkodni képes alternatív ütemtervek kidolgozása;
- adaptív átütemezési funkciók használata;
- folyamatfigyelésen és KPI-ken alapuló valós idejű döntéstámogatás.

Ez a cikk a CAPP-MES integráció egyetlen aspektusával foglalkozik, nevezetesen egy kiterjesztett műhelyszintű ütemezési modell bemutatására, amely támogatja a technológiai folyamat-terv-alternatívák felhasználását.

## 4. Egy kiterjesztett ütemezési modell CAPP-MES integráció támogatására

### 4.1. Technológiai alternatívák kezelését támogató ütemezési modell

A MES szintű műhelyütemezéskor kiemelt fontosságú céllá válik a megfelelő készletszint és a folyamatban lévő munkák számának (WIP) minimalizálása, továbbá az erőforrások harmonikus kihasználása (stabil folyamat és kiegyensúlyozott terhelés) és a magas fokú szállítókészség (határidők betartásának) biztosítása. Kutatómunkánk során egy olyan ütemezési rendszert fejlesztettünk ki, amely megnövelt képességekkel támogatja a CAPP-MES integrációt. Ezt az integrált, szimuláción alapuló finomprogramozási megközelítést a cikk ezen része foglalja össze.

A zökkenőmentes működés szempontjából alapvetően fontos, hogy egy adott gyártási rendelés minden adata (azonosító, prioritás, terméktípus, termékmennyiség, határidő stb.) elérhető és letölthető legyen az ERP rendszer adatbázisából. Másrészt a termékekre, technológiára és erőforrásokra vonatkozó összes információ (anyagjegyzékek, alternatív technológiai folyamat-tervek, beállítási idők, megmunkálási és műveletvégzési intenzitások stb.) elérhető legyenek a MES adatbázisában vagy a vállalat adatközpontjában.

Az általunk javasolt finomprogramozási megközelítés egyetlen rétegben egyesíti a modellépítést, a döntéshozatalt, a szimulációt és az értékelési folyamatokat. Egy visszacsatolási hurok kapcsolja zárt ciklusba a funkcionális komponenseket,

amelynek célja az ütemezési eredmény javítása. Ugyanakkor az interaktív emberi beavatkozás lehetősége szintén biztosítva van. A szakértői tudás bevihető a rendszerbe a paraméterek és működési módok megadásával, valamint a kézi szerkesztési eszköztár szolgáltatásain keresztül az ütemtervek konzisztens változtatásával.

A lehetséges finomprogramok (részletes termelési ütemtervek) keresési terét determinisztikus adatmodellek és gyors végrehajtás-vezérelt szimuláció alapján vizsgáljuk, hogy közel optimálisan megvalósítható finom ütemezéseket állítsunk elő. Ebben a megközelítésben nincs külön fázis elkülönítve az optimum közeli szűkebb tartomány kezelésére. Az erőforrások részletes korlátainak és képességeinek figyelembevételével, valamint az előre kidolgozott gyártástechnológiai alternatívák kihasználásával közel optimálisan megvalósítható ütemezések létrehozására helyezzük a hangsúlyt. A különböző bizonytalanságokra és előre nem látható eseményekre az újraütemezési funkció ad hatékony válaszokat.

Ezen túlmenően az integrált ütemező rendszerben az igények teljesítésének értékelési szempontjait is figyelembe vesszük a jelölt megoldások vizsgált halmazán. Ez azt jelenti, hogy a lehetséges technológiai alternatívák miatt a keresési tér jelentősen kibővül az alternatívák nélküli változathoz viszonyítva.

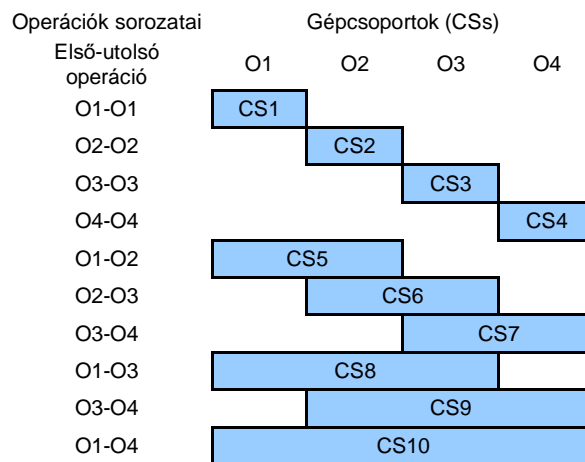
A javasolt integrált, szimuláció-alapú modell több termelési cél és követelmény egyidejű rugalmas alkalmazását támogatja. A kidolgozott megközelítés segít megoldani a MES szintű műhelyütemezés összetett, döntéshozatali problémáját összességében, annak szétbontása nélkül. Ily módon az összes olyan kérdés, mint a folyamat- és művelettervek kiválasztása, sorozatképzés, hozzárendelés, sorrend és időzítés, egyszerre, sokkal rövidebb idő alatt megválaszolásra kerül. Sőt, a szimuláció könnyen vezethet több termelési teljesítményindex kiértékeléséhez, még a gyártás végrehajtása előtt. Ez szolgálhat időbeni korrekciókra vagy kompenzációkra MES-en vagy akár ERP-szinten, azonnali eredménnyel mind az általános, mind a specifikus termelési teljesítmény tekintetében.

Az ütemező-motor algoritmus a végrehajtás-vezérelt gyors szimuláción, általánosított összehasonlító (relációs) operátorokon és változó szomszédságú többféle módosító operátorral egyszerre működő keresési stratégián alapul. A megvalósított ütemező motor magja iteratív módon tárja fel a megvalósítható megoldási teret, és szomszédos lehetséges megoldásokat hoz létre a munkák (munkadarabsorozatok) tényleges folyamat- és műveletterveinek, erőforrás-allokációinak, feladatsorrendjének és egyéb döntési változóinak módosításával. A jelölt ütemezésekre vonatkozó célfüggvényeket termelési szimulációval értékeljük, amely a valós környezetet reprezentálja kapacitás- és technológiai korlátokkal. A tételek, alkatrészek, egységek és feladatok passzív elemek a végrehajtás-vezérelt szimulációban, és aktív rendszererőforrások, például gépek, anyagmozgató eszközök, emberi munkások és műveletközi tárolók dolgozzák fel, mozgatják és tárolják őket. A termékegységek numerikus követése a gyártási lépések időadatait szolgáltatja. A szimulációs folyamat az előre meghatározott ütemezést finom ütemezéssé bővíti az időadatok kiszámításával és hozzárendelésével. A szimulációs algoritmus a kiválasztott végrehajtásitervek, a műveletek végrehajtására kijelölt gépek és a műveletek technológiai paraméterei alapján kiszámítja a várható megmunkálási és műveleti időket. Következésképpen a szimuláció az időzítési részprobléma megoldásával képes az eredeti keresési teret redukált térré alakítani. A megközelítés ezen része magában foglalja a valós ütemezési problémák függőségét. A megközelítés sikeres adaptálását a gyakorlatba nagymértékben befolyásolja a szimulációs algoritmus hatékonysága.

Az elkészített termelési finomprogram teljesítményelemzése elvégezhető az alkalmazott célfüggvények kiszámításával a modell alapegységeinek, munkáinak, gyártási rendeléseinek, gépeinek és egyéb objektumainak adatai alapján.

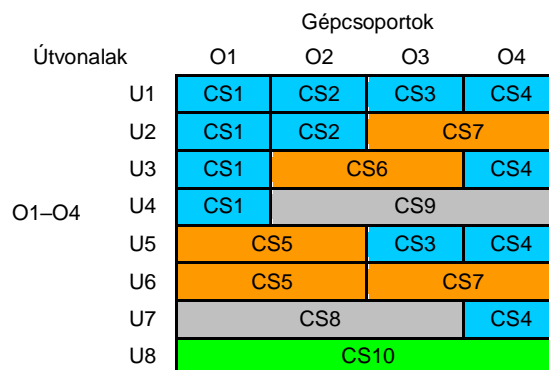
**4.2. Egy illusztratív példa technológiai alternatívák kezelésére**

Ebben az alfejezetben bemutatunk egy esettanulmányt gyártástechnológiai alternatívákkal kibővített gyártásütemezési feladat demonstrálására. A vizsgált gyártórendszerben 4 műveletet kell elvégezni a végtermékek előállítása érdekében. A műveleteket gépcsoportokba szervezett gépek végzik el. A műveletek integrált megvalósítása is megengedett. Ez azt jelenti, hogy a közvetlenül egymás után következő technológiai műveleteket egyesítve is el lehet végezni alkalmas gépeken. Így összesen 10 féle géptípus különböztethető meg (1. ábra).



**1. ábra:** Integrált operációsorozatra alapozott géptípus-alternatívák

A géptípusok alapján gépcsoportok alakíthatók ki. A végtermékek előállításához a munkadarabokat a megfelelő gépcsoportokon kell végigáramoltatni. A bejárési útvonalak eltérőek lehetnek. A lehetséges technológiai útvonalak alternatíváit a 2. ábra szemlélteti. Például a négy szükséges művelet külön-külön is végre lehet hajtani négy gépcsoport érintésével (U1 útvonal) négy konkrét gépen. Ugyanakkor egyetlen gépcsoport felkeresésével is elvégezhető a feladat, ha az olyan gépekből áll, amely mind a négy műveletet integráltan el tudják végezni (U8 útvonal).



**2. ábra:** Gépcsoportokra alapozott technológiai útvonal-alternatívák

A modellünkben a megrendelésekhez egyedileg definiáljuk a számításba vehető gépcsoportokat és gépcsoportokon belül a használható konkrét gépeket. A gépcsoportokon belül a gépek paraméterei eltérőek lehetnek, így például a műveleti idők és az átállítási idők jelentősen eltérhetnek egymástól. Ezeket figyelembe véve, az ütemező döntési hatáskörébe helyeztük a konkrét útvonal kiválasztását. Ez azt jelenti, hogy minden gyártási sorozat esetében a klasszikus ütemezési döntéseken túlmenően a technológiai alternatívák közötti választással kapcsolatos döntéseket is meg kell hozni. Ide tartozik az útvonal típus kiválasztása és a kiválasztott útvonaltípus által érintett gépcsoportok gépei közötti választás is.

Az általunk fejlesztett ütemező rendszer a technológiai alternatívák közötti választást úgy kezeli, hogy az ütemezés megkezdése előtt elemzi a választási lehetőségeket és ezeket egy indexelt adatrendszerbe transzformálja. A kereső algoritmus ezeket a megengedett lehetőségeket használja úgy, hogy a szomszédságképzésben a kiválasztást a módosító operátorok végzik el. Így az előállított megoldások mindig csak megvalósítható jelölteket jelentenek. Az előállított termelési finomprogram minden egyes döntési változónak pontosan definiálja az aktuális értékét. A szimuláció döntési kérdésekkel tehát nem foglalkozik, az csupán a végrehajtás numerikus szimulációját valósítja meg. A döntéseket egy önálló modul hozza meg és a szimuláció a teljes gyártási folyamat teljesítménymutatóinak számításához szükséges közbenső adatok számítását végzi.

A javasolt ütemezési módszer előnyei közé tartozik, hogy a technológiai alternatívák integrált alkalmazása jelentősen növeli a gyártásirányítás rugalmasságát. Az ütemezési célfüggvények prioritásainak hangolásával az ütemezés kiválóan szabályozható. A gyártási hatékonyság, a kihozatal és a költségek mértékét ki tudjuk egyensúlyozni olyan esetekben is, amelyekben az előírt teljesítési határidőkre csak költségesebb alternatívák alkalmazásával tudjuk legyártani a megrendelt termékeket a kívánt mennyiségben. A javasolt integrált ütemezési modell szoftveres megvalósítása rugalmasan használható a gyártásirányítás és a technológiai folyamattervezés integrációjának támogatására.

### **4.3. Egy prototípus ütemező motor implementálása és tesztelése**

A bemutatott ütemezési modellt egy prototípus szoftverben valósítottuk meg. A javasolt finomprogramozási rendszert C++ programozási nyelven implementáltuk. Ez az ütemező motor megnövelt képességekkel támogatja a CAPP-MES integrációt azáltal, hogy gyorsan és hatékonyan oldja meg a részletes ütemezési feladatokat.

A szükséges bemeneti input adatokat szöveges fájlkból olvassa be a rendszer, melyeket a kapcsolódó rendszerekből lehet exportálni. A megvalósított ütemező motor magába foglalja az integrált szimulációt és a célfüggvények számítását végző módszert is. Az ütemező motor grafikus felhasználói felülettel is rendelkezik, amelyet Windows XP/Vista/7/8/10/11 rendszereken teszteltük. Az ütemező szoftver átlagos PC hardver konfiguráción futtatható, nem igényel speciális erőforrást.

A bemutatott illusztratív példában szereplő 4 gyártási lépést és a kapcsolódó összes technológiai alternatívát használva tesztfeladat instanciákat generáltunk. Ezekben a feladatokban 100-150 gépet, 300-500 megrendelést és 3000-5000 munkát szimuláltunk. A rendszerben figyelembe vettük a munkák konkrét indítási időkorlátját, az előírt határidőket, a gépek munkasorrend-függő átállítási időadatait, a gépek konkrét műveletvégző képességeit, az erőforrások rendelkezésre állási időintervallumait, a gyártási sorozatnagyságok előírt minimális nagyságát. A klasszikus ütemezési feladatok jellemzőin túlmenően terméktípusokat vezettünk be, amelyekhez beállítottunk változó technológiai alternatívákat is.

A vázolt nagyméretű és összetett ütemezési feladatok megoldása során azt tapasztaltuk, hogy átlagos hardver/szoftver futtató környezetben (pl. Intel Core i3 CPU, 8 MB RAM, Windows 11 OS) az ütemező motor 1-2 perc alatt képes volt megoldani az integrált CAPP-MES ütemezési problémákat. Ez a futási teljesítmény alkalmassá teszi a rendszert a gyakorlati műhelyszintű igények kielégítésére műszak, nap vagy nagyobb ütemezési időhorizontok esetén. A prototípus implementáció igazolta a javasolt modell hatékonyságát.

## 5. Összefoglalás és következtetések

Ebben a cikkben összefoglaltuk a technológiai folyamattervezés és a gyártásirányítás integrációjának megközelítési lehetőségeit. Illusztratív példaként bemutattunk egy rugalmas diszkrét gyártórendszert, amelyben az alternatív technológiai útvonalak, gépcsoportok és konkrét gépek közötti választás kulcsszerepet játszik a műhelyszintű gyártásütemezésben.

A vázolt ütemezési modell végrehajtás-szimulációra alapozott problémátér-transzformációval és többcélú keresési algoritmussal hatékonyan kezeli a technológiai alternatívákat. A javasolt koncepció és módszer hozzájárul a CPS paradigma gyakorlati megvalósításához azáltal, hogy támogatja a CAPP–MES funkciók NLA alapú integrálását a diszkrét technológiai megmunkálásokon alapuló alkatrészgyártás széles területén.

## Irodalom

- [1] Askin, R. G., Standridge, C. R.: Modeling and Analysis of Manufacturing Systems, J. Wiley Inc., New York, 1993.,
- [2] Lee, H., Kim, S.: Integration of process planning and scheduling using simulation based genetic algorithms, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 18, 586–590, 2001., <https://doi.org/10.1007/s001700170035>
- [3] Tóth, T., Kulcsár, Gy., Erdélyi, F., Kulcsárné, F. 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, pp. 1381-1392, 2014.
- [4] Kulcsárné, F. M.: Kiterjesztett modellek és módszerek erőforrás-korlátos termelésütemezési feladatok megoldására, Doktori (PhD) értekezés, Miskolci Egyetem, Miskolc-Egyetemváros, 2017., <https://doi.org/10.14750/ME.2018.006>
- [5] Tan, W., Khoshnevis, B.: Integration of process planning and scheduling - a review, Journal of Intelligent Manufacturing, 11, pp. 51-63, 2000., <https://doi.org/10.1023/A:1008952024606>
- [6] Li, X., Gao, L., Zhang, C., Shao, X.: A review on integrated process planning and scheduling, International Journal of Manufacturing Research, 5 (2), pp. 161-180, 2010., <https://doi.org/10.1504/IJMR.2010.031630>
- [7] Joo, J., Park, S., Cho, H.: Adaptive and dynamic process planning using neural networks, International Journal of Production Research, 39 (13), pp. 2923–2946, 2001., <https://doi.org/10.1080/00207540110049034>
- [8] Lee, H., Kim, S.: Integration of process planning and scheduling using simulation based genetic algorithms, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 18, pp. 586–590, 2001., <https://doi.org/10.1007/s001700170035>
- [9] Rajkumar, M., Asokan, P., Page, T., Arunachalam, S.: A GRASP algorithm for the integration of process planning and scheduling in a flexible job-shop, International Journal of Manufacturing Research, 5 (2), pp. 230–251, 2010., <https://doi.org/10.1504/IJMR.2010.031633>



- 
- [10] Leung, C. W., Wong, T. N., Mak, K. L., Fung, R. Y. K.: Integrated process planning and scheduling by an agent-based ant colony optimization, *Computers and Industrial Engineering*, 59 (1), pp. 166–180, 2010., <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.09.003>
- [11] Li, X., Gao, L., Shao, X., An active learning genetic algorithm for integrated process planning and scheduling, *Expert Systems with Applications*, 39 (8), pp. 6683–6691, 2012., <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.11.074>
- [12] Zhang, L., Wong, T. N.: Solving integrated process planning and scheduling problem with constraint programming, *Proceedings of the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference 2012*, pp. 1525-1532, 2012.
- [13] Mamalis, A. G., Malagardis, I., Kanbouris, K., Online integration of process planning module with production scheduling, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 12 (5), pp. 330–338, 1996., <https://doi.org/10.1007/BF01179808>
- [14] Usher, J., Fernandes, K.: Dynamic process planning – the static phase, *Journal of Materials Processing Technology*, 61, pp. 53–58, 1996., [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(96\)02465-X](https://doi.org/10.1016/0924-0136(96)02465-X)
- [15] Zhao, F., Honga, Y., Yua, D., Yang, Y., Zhanga, Q.: A hybrid particle swarm optimisation algorithm and fuzzy logic for process planning and production scheduling integration in holonic manufacturing systems, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 23 (1), pp. 20–39, 2010., <https://doi.org/10.1080/09511920903207472>
- [16] Shen, W., Wang, L., Hao, Q.,: Agent-based distributed manufacturing process planning and scheduling: a state-of-the-art survey, *IEEE Transactions on Systems, Management and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 36 (4), pp. 563–577, 2006., <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2006.874022>
- [17] Wang, L., Shen, W.: DPP: an agent-based approach for distributed process planning, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 14 (5), pp. 429–439, 2003., <https://doi.org/10.1023/A:1025797124367>