



## PREDIKTÍV ÜTEMEZÉSI STRATÉGIA ÉS TÖBBCÉLÚ ÚJRAÜTEMEZÉSI MÓDSZER KOMBINÁLT ALKALMAZÁSA DISZKRÉT GYÁRTÁSI FOLYAMATOK IRÁNYÍTÁSÁRA

KULCSÁRNÉ FORRAI MÓNICA

Miskolci Egyetem,  
Informatikai Intézet

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

KULCSÁR GYULA

Miskolci Egyetem,  
Informatikai Intézet

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

**Absztrakt:** A cikk bemutat egy kombinált ütemezési koncepciót, amely a prediktív elven működő tervezési módszert és a keresési algoritmusokra alapozott újraütemezési módszert együttesen alkalmazza. A koncepció alkalmazhatósága egy kiterjesztett rugalmas többutas gyártórendszer példáján keresztül kerül bemutatásra. A javasolt megoldási módszer hatékonyságát szimulációs modell igazolja.

**Kulcsszavak:** ütemezés, újraütemezés, keresőalgoritmus, szimuláció, többcélú optimalizálás, gyártórendszer

### 1. Bevezetés

A diszkrét termelési folyamatok irányításában fontos szerepet játszik az ütemezés. A termelési tervezési és -irányítási feladatok megoldása nehéz feladat, mivel sokféle korlátfeltételt, nagyszámú döntési változót és egyidejűleg több kitűzött optimalizálási célt kell figyelembe venni. A konkrét vevői igények és az előzetes kalkuláción alapuló feltételezett igények kiszolgálása egyre összetettebb ütemezési feladatokat generál.

Az ütemezési modellek és módszerek fejlesztésére irányuló kutatások elméleti és gyakorlati szempontból egyaránt nagyon fontosak. Az ütemezési feladatok alapvető osztályozása megtalálható az [1] könyvben. A témához kapcsolódó optimalizálási feladatok sokféle kutatási terület problémáival is szoros kapcsolatban állnak.

Ilyenek például a gyártási, logisztikai, erőforrás-tervezési és üzleti folyamatokkal kapcsolatos optimalizálási problémák [2], [3].

A gyártási rendszerekben rendelkezésre álló erőforrások hatékony kihasználása érdekében precízen kidolgozott gyártási ütemtervekre és finoman hangolt tevékenységprogramozásra van szükség. Az ezekhez szükséges alapinformációkat az Ipar 4.0 kulcsszó hatáskörébe tartozó digitalizációs és infokommunikációs technikák, technológiák és konkrét rendszerek képesek biztosítani. Így a termelési rendszerekből kinyerhető információk feldolgozásával kellően kifinomult ütemezési modellek hozhatók létre és használhatók.

A korábbiaknál részletesebb és pontosabb információk feldolgozásához továbbfejlesztett döntéstámogató modellekre is szükség van. A döntések következményének elemzéséhez és kiértékeléséhez gyakran szimulációs modelleket alkalmazunk. Ezek eredményei alapján a termelési rendszerek irányítási hatékonysága tovább fokozható és részben automatizálható. Az új módszerek hatására a termelési struktúrák mellett az irányítási filozófiák is korrekcióra, finomításra vagy nagyobb átalakításra szorulnak.

Az újraütemezési modellekkel szemben támasztott fontos követelmény, hogy a beavatkozási döntések eredményei az új feltételrendszernek megfeleljenek és az új célrendszert maximálisan támogassák. Az újraütemezési koncepciók legfontosabb jellemzői megtalálhatók például a [4], [5] és [6] publikációkban.

## **2. A vizsgált feladat bemutatása**

### **2.1. Előzmények és a feladat jellemzői**

A kutatómunkánk motivációját egy valós gyártási rendszer újraütemezési feladat típusának modellezése és számítógépes megoldása adta. A [7] cikkben bemutatunk egy gyártórendszert, amelyben négy gyártási fázis végrehajtásával készülnek el a termékek. Figyelembe véve az erőforrásokból kialakított csoportokat, a gyártórendszer az EFFS-modellel leírható [8].

A vizsgált diszkrét gyártórendszerben végrehajtandó folyamatok ütemezése során feltételezzük, hogy adott a gyártórendszer aktuális állapota és az érvényes korlátozások halmaza. Idetartoznak például az elsődleges technológiai és egyéb erőforrások, azok korlátozott képességei és kapacitásai, a rendelkezésre állások időintervallumai, a műveletek sorrendjének definíciói és további speciális feltételek. Az alap prediktív ütemezési feladatban a végrehajtásra kiadott belső rendelések (production order) teljesítéséhez gyártási munkákat (job) és műveleteket (operation) kell definiálni, továbbá ezek elvégzéséhez alkalmas erőforrásokat (resource) kell hozzárendelni. Minden gyártási eseményhez indítási és befejezési időpontokat kell hozzárendelni úgy, hogy a korlátozások betartásával a gyártási folyamat teljesítményét mérő mutatók (key performance indicators, KPI) kvázi-optimálisak legyenek. A KPI-mutatók fejezik ki ebben az optimalizálási feladatban a menedzsment megfogalmazott céljait. Az alkalmazott teljesítménymutatók optimalizálási célfüggvények formájában jelennek meg a modellben.

Ebben a cikkben a következő célfüggvényeket használjuk:

- A határidő után teljesített megrendelések száma legyen minimális ( $f_1$ ).
- A határidő után befejeződő munkák száma legyen minimális ( $f_2$ ).
- A munkák csúszási idejének összege legyen minimális ( $f_3$ ).
- A legnagyobb csúszás ideje legyen minimális ( $f_4$ ).
- A gépek átállításának száma legyen minimális ( $f_5$ ).
- Az utolsóként befejeződő művelet időpontja legyen a lehető legkorábbi ( $f_6$ ).

A prediktív ütemterv önmagában nem garantálja az ütemezett időszakban a gyártási folyamat optimális végrehajtását, mivel a belső gyártási környezet és a külső üzleti környezet elkerülhetetlen bizonytalan viselkedése miatt szükséges a gyártás valós idejű folyamatos irányítása. Váratlan események lehetnek például a gépek meghibásodásai, a műveletvégzési képességek változása, az alapanyag érkezési időpontjának változása, a határidők módosulása stb. A fellépő váratlan események káros hatásának csökkentése érdekében számos korrekciós beavatkozási döntést kell meghozni és végrehajtani. Az ilyen beavatkozást igénylő szituációk megkövetelik a végrehajtás alatt álló, előzetesen jól megtervezett ütemterv felülvizsgálatát és módosítását, ezáltal a folyamatok és műveletek újraütemezését [8].

Az újraütemezés az elindított és végrehajtás alatt álló gyártási ütemterv aktualizálása, korrigálása és újratervezése, amely az irányítórendszer egyik beavatkozási funkciója.

## 2.2. Egy illusztratív példa váratlan események hatásának szemléltetésére

Az újraütemezési feladat demonstrálása érdekében elkészítettük egy gyártási rendszer szimulációs modelljét. A rendszerben 121 gép dolgozik 10 gépcsoportba rendezve. A végtermék előállításához négy egymást követő technológiai műveletsort kell elvégezni. Az aktuális időszakban 400 megrendelést kell teljesíteni, melyek összesen 4102 munkát tartalmaznak. A megrendelések 8-féle kategóriába sorolhatók az igényelt műveletsorok alapján. A gépek átállítási alaptípusait 4 kategóriába soroltuk. A gépek átállítási időtartamai nem szimmetrikusak és gépenként egyediek. A gépek egyedi műveletvégzési jellemzőkkel és műszakbeosztásokkal rendelkeznek. Nem minden gép dolgozhat mindegyik megrendelésen és a gépek műveletvégzési képességei is egyediek, ezáltal a műveletek végrehajtási ideje függ a konkrét géptől és a konkrét megrendeléstől.

Az általunk fejlesztett újraütemező rendszer rendelkezik egy olyan felülettel, amely továbbfejlesztett Gantt-diagramok formájában képes megjeleníteni a váratlan események hatását.



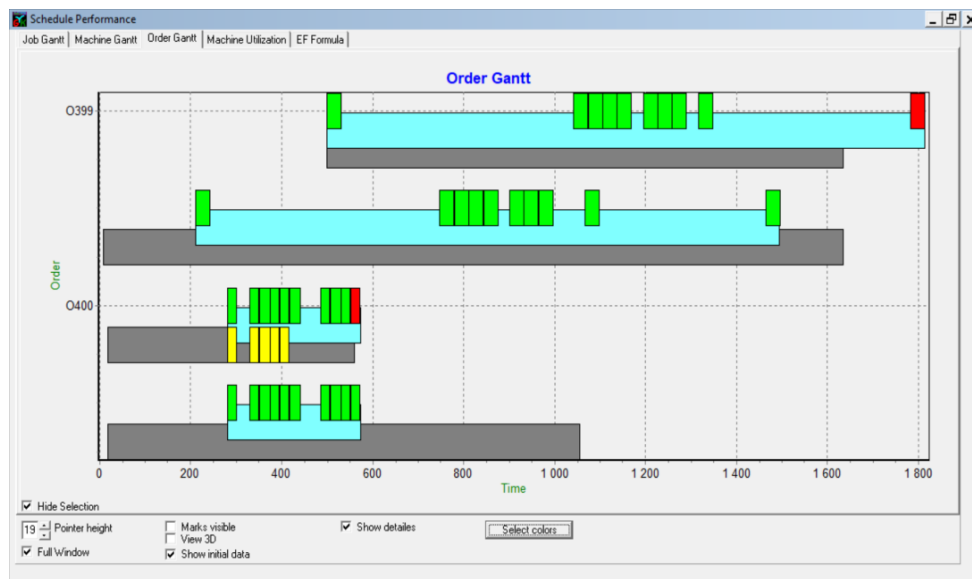
**1. ábra.** Gépek műveletvégzési képességeinek váratlan megváltozásai

Az 1. ábra szemléltet egy géporientált Gantt-diagramot. A 105 és a 106 gép van megjelenítve. Egy adott géphez két ütemezési sor tartozik. A felső sor az aktuális állapotot és a jövőben várható tényleges állapotok sorozatát mutatja. Az alsó sor az eredetileg tervezett állapotváltozásokat mutatja. Ebben a példában két géppel kapcsolatos váratlan eseményt szimuláltunk. Az M\_105 azonosítójú gép műveletvégzési intenzitását a kezdeti érték felére csökkentettük (10 egységről 5 egységre). Ennek következtében a munkák műveleti idejei az eredeti értékek duplájára növekedtek. A szürke színű téglalapok a gépek rendelkezésre állási időintervallumait (műszakjait) reprezentálják. A színes kisebb téglalapok az elvégzendő műveletek (operációk) időtartamát szimbolizálják. Jól látható, hogy az eredetileg 3,5 műszakot megtöltő terhelés a váratlan intenzitáscsökkenési esemény hatására már 7 műszakot töltene ki. A lassulás következtében az eredetileg időben befejeződő műveletek túllépnek a megengedett határidőket. A diagramon ezt jelzik a piros színre változott téglalapok. A zöld színű téglalap időben történő befejezést jelöl, míg a piros szín határidő túllépést. A narancssárga színű téglalapok a gépek átállítási műveleteit jelölik.

Az M\_106 gép esetében egy olyan hibát szimuláltunk, amely a második műszak elején lép fel és annak elhárítása miatt a gép a második műszakban nem használható. Ennek következtében a tervezett műveletek időben jobbra tolódnak.

A 2. ábra egy továbbfejlesztett megrendelésorientált Gantt-diagramot ábrázol. Két váratlan eseményt állítottunk be. Az O\_399 rendelés teljesítésének indítási időkorlátját az eredeti 8 egységről jóval nagyobbra, 500-ra állítottuk. Ez azt fejezi ki, hogy valamely alapanyag előkészítése vagy beszállítása késni fog az eredetileg tervezetthez képest. A diagramon a szürke téglalap a rendelés teljesítésének korlátozott

időablakát szimbolizálja. A világoskék téglalap az indítás és a befejezés közötti időtartamot jelképezi. A színes kis téglalapok a megrendeléshez tartozó részfeladatok végrehajtását reprezentálják. Ezek a részfeladatok a megrendelt végtermék gyártásának kisebb sorozatait jelentik. Például egy nagyobb megrendelés több kisebb sorozattal teljesíthető. A szimuláció egyértelműen mutatja, hogy a váratlan esemény következtében a tervezett végrehajtás túllépné az elvárt befejezési határidőt.



**2. ábra.** Megrendelések indítási és befejezési korlátainak váratlan megváltozásai

Az O\_400 rendeléssel kapcsolatban pedig egy olyan váratlan eseményt szimuláltunk, amely az eredeti határidejét jelentősen lecsökkentette 1058 időegységről 560 időegységre. Ez az esemény például az üzleti folyamatban bekövetkezett külső hatást reprezentálja. A változás hatására az eredeti ütemezés szerinti végrehajtás csúszást idézne elő. Ezt jelzi az utolsó részfolyamatot szimbolizáló téglalap színének pirosra változása.

A szimuláció eredménye a váratlan események kedvezőtlen hatását a célfüggvényértékekben is jelzi, melyek alapvetően az újraszámolt kezdési és befejezési időpontok változásainak mértékétől függenek. Az 1. táblázat foglalja össze a célfüggvények eredeti ütemezés szerinti értékeit és a váratlan események hatására módosult értékeit. A váratlan események bekövetkezése miatt az eredeti ütemterv szerinti munkavégzés 13 megrendelést és annak 62 munkáját határidő után fejezné be, miközben az eredeti ütemterv szerint mindegyik határidőre befejeződött volna. Az átállások száma ( $f_5$ ) nem változott, mert a meghibásodott gép megjavítása után a korábbi beállítással működik tovább.

**1. táblázat***Váratlan események hatása a célfüggvények értékeire*

| Célfüggvény | Korábbi tervezett érték | Megváltozott érték |
|-------------|-------------------------|--------------------|
| $f_1$       | 0                       | 13                 |
| $f_2$       | 0                       | 62                 |
| $f_3$       | 0                       | 14400              |
| $f_4$       | 0                       | 1002               |
| $f_5$       | 358                     | 358                |
| $f_6$       | 1953                    | 3164               |

A szimuláció eredményei egyértelműen mutatják, hogy a példában megjelenő négy váratlan esemény nagyon kedvezőtlenül befolyásolja az adott időhorizonton a gyártórendszer teljesítőképességét.

### 3. Továbbfejlesztett újraütemezési módszer

#### 3.1. Szimulációra és többcélú keresőalgoritmusra alapozott megközelítés

Az általunk kidolgozott újraütemezési módszer lényege az, hogy a szimulációra és keresési algoritmusokra alapozott ütemezési módszerek alkalmas kiterjesztésével a speciális újraütemezési követelményeket támaztó optimalizálási feladatok is hatékonyan megoldhatók. Ezt a kiterjesztést egyrészt új korlátfeltételek megfogalmazásával, másrészt új célfüggvények bevezetésével valósítottuk meg.

Az újraütemezési feladatban bemeneti adatként adott egy aktuális gyártási ütemterv. Ez reprezentálja a gyártási folyamatok tervezett végrehajtását. Adottnak tekintjük az aktuális ütemtervhez tartozó tervezett teljesítménymutató-értékeket is. Ezek együtt kezdeti állapotleírásként jelennek meg. Ez az információhalmaz válik a kiindulási bázissá és ez lesz a módosítások összehasonlítási alapja is. További bemenő alapinformációként adottnak feltételezzük az aktuális állapotot pontosan leíró ütemtervet. Ez reprezentálja a ténylegesen bekövetkezett eseményeket és az azokból eredő állapotváltozásokat. Mindezek valós időadatokkal együtt elérhetők.

Alapvető korlátozásként bevezettük, hogy az újraütemezés hatására kialakult új ütemtervjelölteknek kötelezően meg kell őrizniük az eredeti ütemtervnek az újraütemezés időpontjáig elvégzett részeit. Ugyanez a módosítási tilalom vonatkozik az eredeti ütemterv már elkezdett, de még be nem fejezett elemi részeire is. Elemi résznek tekintendő minden olyan művelet, amely nem szakítható meg.

Ezen túlmenően definiáltunk egy további időintervallumot is, amely az újraütemezés pillanatától egy adott későbbi időpontig tart, és ennek tartalmára szintén vonatkozik a változtatási tilalom. Ezt reagálási időszaknak neveztük el és ezzel azt fe-

jezzük ki a modellben, hogy az újraütemezés elkezdésének időpontja és az új ütemterv élesítésének időpontja közötti időszakban a rendszer még az eredeti ütemterv szerint fog működni. Azok a gyártási műveletek, munkák és belső megrendelések, amelyek a reagálási időszak végéig elkezdődnek, azok közvetlen hatást fognak gyakorolni az új ütemtervre is. Ilyen például az a szituáció, amikor egy adott terméktípus egy számára eredetileg kiválasztott gyártási útvonalon már elindult, akkor a reagálási időszak után még meg nem kezdett gyártási műveletei már csak a kezdeti erőforrás-alternatívák egy részalmazára irányíthatók át a függőségek miatt. Az ehhez hasonló esetekben egyre csökkennek a beavatkozási lehetőségek az idő előrehaladásának függvényében. Ez azt jelenti, hogy minél hosszabb a reagálási időszak, annál nagyobb esélye van a függőségek növekedésének.

Az újraütemezési beavatkozás során a módosított ütemterv értékelésének szempontjai közé beillesztettünk új célfüggvényeket. Ezek olyan új teljesítménymutató (KPI) elemek, amelyek azt fejezik ki, hogy az eredeti ütemtervhez képest a módosítások milyen mértékűek. Ezeket az új KPI-mutatószámokat minimalizálandó alakban definiáltuk. Ezek bevezetésével teljesíthető az a korábban megfogalmazott igény, hogy minél kisebb mértékű változtatással maximális javulást érjen el az újraütemezési funkció. Így stabil, átlátható és lekövethető tervezéssel nagyobb kilengések és rángatások nélküli gyártás valósítható meg.

Ezeket a kiterjesztéseket hozzáadva az eredeti ütemezési feladatokhoz, megkaptuk az újraütemezési problémák általános modelljét. A megoldás szoftveres megvalósításához a korábban kidolgozott többcélú keresési módszereinket vettük alapul [7], [8], [9], [10]. Ezek a szimulációt és többcélú optimalizálást támogató keresőalgoritmusok kellően rugalmasak voltak ahhoz, hogy megfelelő továbbfejlesztéssel az újraütemezés speciális elvárásait is teljesítsék a most bemutatott koncepció alkalmazásával.

Az új továbbfejlesztéseket a következőképpen foglaljuk össze:

- az aktuális állapot modellezése és az adatbetöltés megvalósítása;
- az adott időszakra kiadott aktuális ütemezés tárolása és betöltése;
- a szimulációs modell továbbfejlesztése;
- a célfüggvények halmazának kibővítése a változtatások mértékének csökkentése érdekében;
- zárolási technikák bevezetése a függőségekből eredő tiltások kezelésére a változtatások korlátozásának biztosítása érdekében;
- új keresőoperátorok fejlesztése a zárolások figyelembevétele érdekében és a kiterjesztett KPI-mutatók javítása érdekében.

A többcélú keresési módszer iteratívan futtat egy gyors szimulációra alapozott problémater-transzformációt. Ennek lényege úgy fogalmazható meg röviden, hogy a legjobb megoldás keresése során egy egyszerűsített ütemterv készül a döntési változók értékei alapján. Ez az egyszerűsített megoldásreprezentáció rögzíti a munkák tech-

nológiai útvonalát, a kiválasztott és lefoglalt erőforrásokat, és minden egyes erőforrás esetében a hozzárendelt műveletek (elemi tevékenységegységek) végrehajtási sorrendjét. Ezekből a döntési változókból kiindulva a teljes ütemterv végrehajtásának szoftveres szimulációja kiszámítja az egyes elemekhez tartozó indítási és befejezési időpontokat. Ez a szimulációalapú probléma-transzformációs módszer az újraütemezés során úgy működik, hogy a zárolási technikák adatait felhasználva egy szabálybázisra épített szimulációs algoritmus figyelembe veszi a múltbeli (a zárolási időintervallum vége előtti) gyártási események esetében a már rögzített időadatokat. Majd ezután csak a jövőbeli tervezett események még ismeretlen időadatait számítja ki.

A [8] dolgozatban bemutatott prediktív ütemezésre alkalmazott többcélú keresőmódszerünket felhasználtuk, és abba beillesztettük az újraütemezés új elemeit. A célfüggvények relatív változásainak súlyozott összegére alapozva egyértelműen meg tudtuk határozni, hogy két jelölt megoldás közül összességében melyik a kedvezőbb megoldás. Ezáltal sok jelölt megoldás közül is páronkénti összehasonlítással kiválasztható a legjobb megoldás.

Az újraütemezési változtatások mértékének minimalizálása érdekében a következő új célfüggvényeket definiáltuk:

- A módosított útvonalon teljesített munkák száma ( $g_1$ ).
- Az eredetitől eltérő gépre ütemezett munkák száma ( $g_2$ ).
- Az eredetileg tervezett befejezési státuszról eltérő státuszú munkák száma ( $g_3$ ).
- Az újraütemezés következtében csúszóvá váló munkák száma ( $g_4$ ).
- Az első pontban leírt feltételnek megfelelő munkával rendelkező megrendelések száma ( $g_5$ ).
- A második pontban leírt feltételnek megfelelő munkával rendelkező megrendelések száma ( $g_6$ ).
- Az eredetihez képest megváltoztatott befejezési státuszú megrendelések száma ( $g_7$ ).
- Az újraütemezés következtében csúszóvá váló megrendelések száma ( $g_8$ ).
- A megváltozott átállásokkal érintett gépek száma ( $g_9$ ).
- Az újraütemezés következtében új átállásokkal terhelt gépek száma ( $g_{10}$ ).

A változásokat kifejező célfüggvények ( $g_1 - g_{10}$ ) és a gyártási hatékonyságot számszerűsítő célfüggvények ( $f_1 - f_6$ ) együttesen alkotják a célfüggvény-rendszert, amely minősíti a módosított termelési ütemtervet. A különböző célfüggvények fontosságának kifejezésére olyan prioritásértékeket használunk, amelyek aktuális értékét a felhasználó állíthatja be. A keresőmotor a prioritások alapján a relatív változásra alapozott összehasonlító és eredményértékelő módszert alkalmazza [7].

Az újraütemezés az aktuális szituációt leíró ütemtervből indul ki, és elemi módosítások sorozatával alkotja meg az új ütemtervet. Így az előidejű ütemezésre



használt többcélú keresési technikák (tabukeresés, genetikus algoritmus stb.) az újraütemezési feladatok megoldására is használhatók. Újraütemezéskor azonban azt is figyelembe kell venni, hogy a kiindulási ütemtervnek a múltban bekövetkezett része, valamint az új ütemterv elkészítéséhez és indításához szükséges időintervallumba eső része nem módosítható. Az újraütemezés sebességének növelése érdekében a tiltott módosítások a keresés előtt elemzésre kerülnek. A megengedett alternatívák rendszerezett formában beépülnek a modell kapcsolatrendszerébe. Ezáltal a keresés közbeni döntési helyzetekben a választható alternatívák között csak az új feltételeket is maradéktalanul kielégítő lehetőségek jelennek meg. Az újraütemezési korlátozások ilyen irányú kibővítését zárolási technikák alkalmazásával valósítottuk meg. A zárolási szabályok egyaránt vonatkozhatnak munkákra, megrendelésekre és gépekre.

- Bármely munka esetében előírható, hogy mely operációjától kezdve engedélyezett a változtatás.
- Bármely gép esetében előírható, hogy a végrehajtási sorában mely művelettől kezdve lehet változtatást elvégezni.
- Bármely megrendelés esetében a hozzá tartozó zárolt munkák attribútumaiból egyértelműen következik a zárolás mértéke és formája. Ezek magukba foglalják az adott megrendelés esetében alkalmazható útvonalakat, az érintett gépcsoportokat és a gépcsoporton belül az alkalmazható konkrét gépek halmazát.

Az előidejű ütemezésre használt szomszédsági operátorokat továbbfejlesztettük annak érdekében, hogy a zárolásokat figyelembe vegyék. Ennek köszönhetően a többcélú heurisztikus keresőalgoritmus alkalmassá vált az újraütemezési feladatok megoldására.

### **3.2. Az illusztratív példában megjelenő váratlan események hatásának minimalizálása újraütemezéssel**

A bemutatott újraütemezési módszert alkalmaztuk a 2.2. részben vázolt újraütemezési helyzetben. A keresőalgoritmus tabukeresési elvet követ. Ebben a példában a tabulista méretét 150 megoldásra korlátoztuk. A keresési lépések maximális számát 2000-re állítottuk be. Egy adott lépésben 100 szomszédos megoldás megvizsgálását engedélyeztük. A zárolt időintervallum végét 200 időegységre állítottuk be. A gyártási hatékonyságot kifejező célfüggvények prioritását nem változtattuk meg az eredeti ütemezéshez képest. Az újraütemezési változtatásokat minimalizáló célfüggvények prioritását rendre 2-re állítottuk.

Az újraütemezés eredményét a 2. táblázat tartalmazza. Az újraütemezéssel teljes mértékben meg tudtuk szüntetni a fenyegető határidő-túllépéseket. A késéseket és csúszásokat számszerűsítő  $(f_1 - f_4)$  célfüggvények értéke rendre 0-ra csökkent. A munkák átütemezésével a gépatállások számát is tudtuk csökkenteni 358-ról 354-re. Ezen túlmenően a terhelt időszak utolsó műveletének befejezési időpontját is csökkentettük 3164-ről 2282-re.

**2. táblázat***Az újraütemezés hatása a célfüggvények értékeire*

| Célfüggvény | Újraütemezés előtti érték | Újraütemezés utáni érték |
|-------------|---------------------------|--------------------------|
| $f_1$       | 13                        | 0                        |
| $f_2$       | 62                        | 0                        |
| $f_3$       | 14400                     | 0                        |
| $f_4$       | 1002                      | 0                        |
| $f_5$       | 358                       | 354                      |
| $f_6$       | 3164                      | 2282                     |

**3. táblázat***Az eredeti ütemterv módosításának mértékét számszerűsítő újraütemezési célfüggvények értékei*

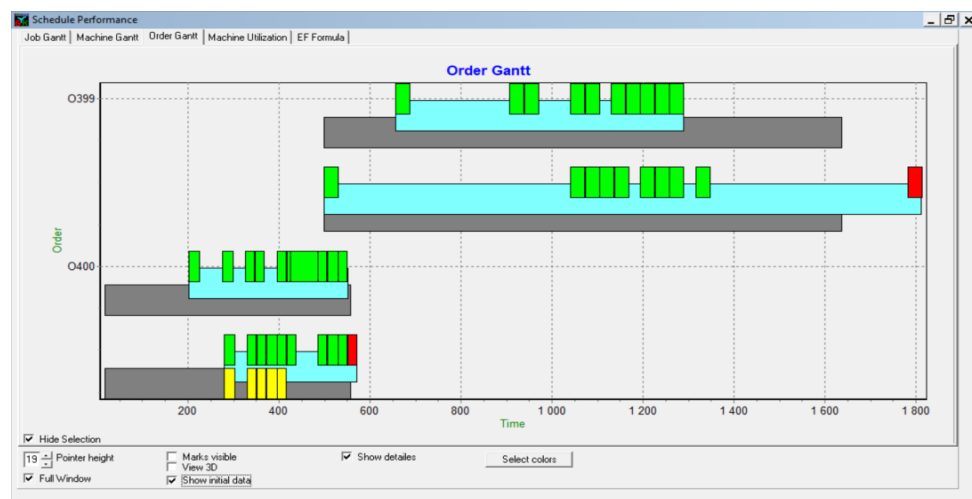
| Célfüggvény | Érték |
|-------------|-------|
| $g_1$       | 2     |
| $g_2$       | 111   |
| $g_3$       | 62    |
| $g_4$       | 0     |
| $g_5$       | 2     |
| $g_6$       | 17    |
| $g_7$       | 13    |
| $g_8$       | 0     |
| $g_9$       | 2     |
| $g_{10}$    | 1     |

A 3. táblázatban láthatók az eredeti ütemtervtől való eltérések számértékei. Az újraütemezés során csupán két megrendelés összesen két munkáját (munkadarab-sorozát) kellett módosított útvonalra irányítani. Csupán 17 megrendelés összesen 111 munkája került át az eredetileg tervezettől eltérő gépre és ezzel 62 munka csúszását szüntettük meg és az újraütemezés nem okozott csúszást a többi munka és rendelés esetében sem. Összesen csupán 2 gépet érintett az átállítások változása. Egy gépen 1-gyel csökkent és egy másik gépen 1-gyel nőtt az átállítások száma, így igazából összességében nem változott az átállítások száma. Mindez annak köszönhető, hogy a keresőalgorithmus olyan gépekre ütemezte át a csúszóvá vált munkákat, amelyek eredetileg is kaptak azonos beállítással végrehajtandó munkákat, és így azok közé be lehetett illeszteni az érintett munkákat.

A bemutatott újraütemezési módszer a továbbfejlesztett keresési módszernek, a zárolási technikáknak és az új célfüggvényeknek köszönhetően nagyon hatékonyan oldja meg az újraütemezési feladatokat.



2. ábra. Az újraütemezés hatása a gépek terhelésére



3. ábra. Az újraütemezés hatása a megrendelések teljesítésére

Az újraütemezés eredményét a 2. ábra és a 3. ábra is szemlélteti. Az M\_105 és az M\_106 gépeket érintő váratlan események eredeti ütemezésre gyakorolt hatásait (alsó sávok) össze lehet hasonlítani az újraütemezés eredményével (felső sávok).

Az újraütemező algoritmus csak azokat a munkákat hagyta az érintett gépeken, amelyek a megváltozott feltételek között is határidőre elkészülnek (2. ábra). A többi munkát áthelyezte alternatív gépekre. Az M\_105 gépen továbbra is megnövekedett műveleti idővel számol a tartós hiba miatt, míg az M\_106 gép esetében a kieső műszakkal nem terheli, de a többi műszakra teljes intenzitású munkavégzést tervez.

A 3. ábra azt ábrázolja, hogy az O\_399 és az O\_400 megrendelések határidőre teljesíthetők az újraütemezés eredményeképpen. A módosított ütemterv biztosítja, hogy az O\_399 rendelés teljesítéséhez szükséges alapanyagok ellátási csúszása ellenére is még teljesíthető a rendelés. Az O\_400 rendelés határidejének drasztikus csökkenése ellenére az újraütemező megfelelően meg tudja szervezni a határidőre teljesítést.

A javasolt újraütemezési módszert többféle feladatinstanciával és különböző beállításokkal is teszteltük. A vizsgálatok eredményei igazolták a módszer rugalmasságát. A célfüggvények prioritásainak hangolásával az újraütemezés hatékonyan szabályozható. Lehetővé válik a felhasználó számára, hogy a gyártási hatékonyság és a módosítások mértékét összhangba állítsa olyan szituációkban is, amikor például a határidők betartása csak jelentős átütemezéssel biztosítható. A javasolt újraütemezési módszer szoftveres implementációja rugalmasságának köszönhetően a gyártás-irányítás hatékony eszközeként használható. Gyors és egyszerűen használható támogatást nyújt a tervezők és az operatív irányítók számára egyaránt.

#### 4. Összefoglalás és következtetések

A cikk bemutatott egy rugalmas gyártórendszert, amelyben az alternatív gyártási útvonalak és technológiai berendezések kulcsszerepet játszanak. A gyártási folyamat hatékonyságának vizsgálatára létrehoztunk egy szimulációs modellt, amely C++ programozási nyelven készült és Windows operációs rendszer szolgáltatásait használó grafikus felhasználói felülettel rendelkezik az egyszerű kezelés érdekében. A diszkrét gyártási folyamatok teljesítőképességének javítására kidolgoztunk egy többcélú újraütemező módszert, amely a tevékenységek részletes ütemtervének iteratív javításával kvázi-optimális megoldásokat generál rövid idő alatt a gyártási és üzleti környezetben megjelenő váratlan események kedvezőtlen hatásainak minimalizálása érdekében.

A bemutatott újraütemezési koncepciót felhasználva hatékonyan kezelhetők mind az előidejű termelésütemezési, mind az újraütemezési feladatok. A javasolt módszer végrehajtás-szimulációra alapozott problémátér-transzformációra, zárolási technikákra és többcélú keresési algoritmusra támaszkodva működik. A kifejlesztett szoftver igazolta, hogy a vázolt modell hatékonyan támogatja a technológiai alternatívák kezelését, az erőforrások allokálását és a gyártási feladatok végrehajtásának időbeli ütemezését és újraütemezését.

#### Irodalomjegyzék

- [1] Brucker, P (2007). *Scheduling Algorithms*. Springer, Heidelberg.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-69516-5>

- 
- [2] Bányai, Á., Illés, B., Glistau, E., Machado, N., Isaias, C., Tamás, P., Manzoor, F., Bányai, T. (2019). Smart Cyber-Physical Manufacturing: Extended and Real-Time Optimization of Logistics Resources in Matrix Production. *Applied Sciences-Basel*, 9, 7, p. 1287. <https://doi.org/10.3390/app9071287>
- [3] Tóth N., Kulcsár Gy. (2020). Rugalmas gyártórendszer hatékonyságának növelése dolgozói képességek szimulációjára alapozott termelésstervezési módszerrel. *Multi-diszciplináris tudományok*, 10. kötet, 3. sz., pp. 130–142. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2020.3.17>
- [4] Aytug, H., Lawley, M., A., McKay, K., Mohan, S., Uzsoy, R. (2005). Executing Production Schedules in the Face of Uncertainties: A Review and some Future Directions. *European Journal of Operational Research*, Vol. 161, pp. 86–110. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.08.027>
- [5] Rangsaritratsamee, R., Ferrell, W., G., Kurz, M., B. (2004). Dynamic Rescheduling that Simultaneously Considers Efficiency and Stability. *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 46, No. 1, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2003.09.007>
- [6] Vieira, G., Hermann, J., Lin, E.: Rescheduling Manufacturing Systems: A Framework of Strategies, Policies and Methods, *Journal of Scheduling*, Vol. 6, No. 1, pp. 35–58, 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1022235519958>
- [7] Kulcsár, Gy., Erdélyi, F. (2007). A New Approach to Solve Multi-Objective Scheduling and Rescheduling Tasks. *International Journal of Computational Intelligence Research*, 3 (4), pp. 343–351. <https://doi.org/10.5019/j.ijcir.2007.115>
- [8] Kulcsár Gy. (2007). *Ütemezési modell és heurisztikus módszerek az igény szerinti tömeg-gyártás finomprogramozásának támogatására*. Doktori (PhD-) értekezés, Miskolci Egyetem, Miskolc.
- [9] Kulcsárné F. M. (2017). *Kiterjesztett modellek és módszerek erőforrás-korlátos termelésütemezési feladatok megoldására*. Doktori (PhD-) értekezés, Miskolci Egyetem, Miskolc. <https://doi.org/10.14750/ME.2018.006>
- [10] Kulcsár Gy., Kulcsárné F. M. (2014). Kiterjesztett termelésprogramozási modell erőforrás-korlátos ütemezési feladatok megoldására. *Multidiszciplináris tudományok*, 4, 1. sz., pp. 19–30.