



HATÁRIDŐK BETARTÁSÁT TÁMOGATÓ ÜTEMEZÉSI CÉLFÜGGVÉNYEK

KULCSÁRNÉ FORRAI MÓNICA

Miskolci Egyetem

Informatikai Intézet

monika.kulcsarne@uni-miskolc.hu

KULCSÁR GYULA

Miskolci Egyetem

Informatikai Intézet

gyula.kulcsar@uni-miskolc.hu

Absztrakt. A cikk bemutat egy optimalizálási célfüggvény-rendszert, amely több összetevő együttes alkalmazásával hatékonyan támogatja a határidős feladatok ütemezését. A célfüggvények sokféle ütemezési feladattípus megoldását támogatják a feladat erőforrásaitól és az ütemezendő munkák végrehajtási jellemzőitől függetlenül. Keresési algoritmusok és szimulációs módszerek kombinált alkalmazása lehetővé teszi a célfüggvények egyszerű alkalmazását. A javasolt módszer hatékonyságát egy valós ipari alkalmazás igazolja.

Kulcsszavak: *ütemezés, határidő, célfüggvény, többcélú optimalizálás, szimuláció, gyártásirányítás, készletgazdálkodás*

1. Bevezetés

A gyártórendszerek hatékony irányításának egyik meghatározó feladata az ütemezés. Az ipari ütemezési problémák általában nagyon nehéz optimalizálási feladatokat rejtenek magukban. Ennek alapvetően több oka van. Nagyon sokféle korlátfeltételt, nagyszámú döntési változót és egyidejűleg több optimalizálási célt kell figyelembe venni.

Ebben a cikkben a szigorú határidős munkákat tartalmazó ütemezési feladatok megoldásával foglalkozunk. Az ilyen feladatok fontos jellemzője, hogy a konkrét vevői igények kiszolgálásának előre rögzített, rendre egyedi határideje van. A gyakorlatban nagyon sokszor találkozunk ilyen ütemezési feladattal.

Az ütemezési feladatok alapvető osztályozása megtalálható az [1] könyvben. A témához kapcsolódó optimalizálási feladatok sokféle kutatási terület problémáival is szoros kapcsolatban állnak [2], [3], [4], [5], [6], [7]. Ezek közül az egyik kategória

az előidejű gyártásütemezés, melyben a rendelkezésre álló erőforrások korlátainak betartása mellett a gyártási rendelések határidőre teljesítése érdekében pontosan kidolgozott végrehajtási ütemtervekre van szükség.

A digitalizáció fejlődése ma már lehetővé teszi, hogy az ütemezéshez szükséges információkat kinyerjük a gyártórendszerből. A rendelkezésre álló információk hatékony felhasználásához korszerű döntéstámogató modellekre van szükség. Az irányítási döntések következményének elemzéséhez és kiértékeléséhez jól használhatók a számítógépes szimulációs modellek. A szimulált rendszerekbe beépített új teljesítménymutatók (KPI) tovább fokozhatják a gyártórendszerek hatékonyságát.

A piaci környezet arra készíti a gyártó vállalatokat, hogy folyamatosan fejlesszék versenyképességüket. A növekvő vevői igények és az egyre rövidebb határidők megkövetelik a gyártási hatékonyság és a szállítókészség fokozását. Ezzel párhuzamosan a készletek alacsony szinten tartására, az erőforrások magas fokú kihasználására és a járulékos költségek csökkentésére is figyelni kell.

Az ilyen összetett célokat kielégítő részletes ütemtervek készítésekor a döntéshozatalnak ki kell terjednie a gyártás főfolyamatain túl a kapcsolódó mellék- és segédfolyamatokra is. Idetartoznak például a logisztikai és készletgazdálkodási feladatok is.

Cikkünkben bemutatunk olyan célfüggvényeket, amelyek felhasználásával új integrált gyártásütemezési és készletgazdálkodási modellek hozhatók létre, amelyek a mindenkori konkrét ipari gyártórendszerek speciális elvárásait is ki tudják szolgálni.

2. A vizsgált ütemezési feladat

A fejlesztés motivációját egy valós járműipari alkatrészgyártó-rendszer ütemezési feladata adta. A vizsgált gyártórendszerben járműipari alkatrészeket készítenek különböző márkájú és típusú személyautókhoz. A vevők által generált, adott terméktípusra és darabszámra vonatkozó rendeléseket szoros határidőre kell teljesíteni.

A rendszer a végtermékek előállítását megfelelően kialakított gyártópályákon valósítja meg. Adott terméktípus általában több pályán is gyártható. Ismert a gyártási folyamat technológiai feltételrendszere. Ennek részleteire itt nem térünk ki, mivel a cikk a teljesítménymutatók számítására koncentrálna.

A gyártásirányítás szempontjából az alapvető döntési változó az, hogy melyik pályán mikor mit gyártsanak. A pályák kialakítása különböző, ezáltal az egy műszakban megtehető teljes ciklusok száma is eltérő.

A vázolt gyártási folyamat ütemezése során a cél az, hogy a szigorú korlátozások betartása mellett a menedzsment kritériumai szerint a lehető legjobb teljesítményt érjük el. A feladat megoldásával kapcsolatban a legfontosabb elvárások a következők:

- A gyártási rendelések teljesítése csúszások nélkül határidőre valósuljon meg.
- A gyártás a lehető legkevesebb átállással valósuljon meg.
- El kell kerülni a túl nagy készletek felhalmozását.
- Biztosítani kell a terméktípusonként egyedileg előírt minimális készletszintet.
- A gyártósorok (pályák) kihasználtságát maximalizálni kell.

A vizsgált feladat nem sorolható be egyik ismert ütemezési feladatkategóriába sem. Ennek egyik oka az, hogy a klasszikus munka- (job) fogalom ebben az ütemezési feladatban nem jelenik meg. Ehelyett adott típusú termék gyártási intenzitását kell beállítani adott erőforráson és a gyártási időhorizont kijelölésével kell szabályozni a gyártási volument. Ezen túlmenően a kitűzött célok összetettsége miatt a termelésütemezés és a készletgazdálkodás egy kombinált problémáját kell megoldani.

3. A javasolt megoldási módszer

A szakirodalomban nagyon sok szakcikk foglalkozik ütemezési feladatok megoldásával. Például az [1] könyv, a [2], [4], [5] és [6] publikációk, valamint a [9], [10] doktori (PhD-) értekezések jó áttekintést adnak az ütemezési feladatokról és megoldási módszerekről. A vizsgált probléma sajátosságaihoz pontosan illeszkedő módszert a nagyszámú publikáció ellenére sem találtunk.

A vizsgált integrált ütemezési feladat megoldása során az ismert gyártási rendelesek teljesítését kell biztosítani. Ehhez a termékek gyártására alkalmas pályák és minden egyéb szükséges gyártási erőforrás lekötését és az elvégzendő tevékenységek konkrét kezdési időpontját kell úgy megtervezni, hogy a szigorú korlátozások megsértése nélkül a megfogalmazott célok megvalósuljanak.

A konkrét probléma egy lehetséges megoldását a termelési finomprogram adja meg, amely definiálja, hogy melyik gyártósoron, melyik pozícióban, melyik műszakban, mikor, milyen erőforrás-konfigurációval mit kell gyártani (milyen műveletet kell elvégezni).

A vizsgált gyártórendszer terméktípusonkénti termelési intenzitása viszonylag lassan módosítható a gyártástechnológiai korlátozások miatt. Ezt figyelembe véve a változatos megrendelések kiszolgálása igen komoly feladatot jelent. A beérkezett vevői rendelések alapján a finomprogram jellemzően egy-két hétre előre készíthető el. A gyártórendszer működése viszonylag lassan változtatható. Nem lehet sok pozícióban egyidejűleg terméket váltani a szükséges előkészületek miatt, így a rendszer viszonylag lomhán követi a változásokat. Ennek kompenzálására érdemes fenntartani egyedileg kalibrált készletszinteket a különböző terméktípusokból. Ezek a készlettartalékok segítik a sürgős rendelések kiszolgálását az átmeneti időszakokban. Az adott terméktípusra vonatkozó mindenkor kívánt optimális készletszintet egy alsó és egy felső határérték definiálásával célszerű előírni.

A bemutatott összetett optimalizálási feladat NP-nehéz, ezért a kutatás-fejlesztés során alapvetően heurisztikus algoritmusokra és keresési metaheurisztikákra koncentráltunk. Korábban más ütemezési feladatokra sikeresen alkalmazott modelljeinkből indultunk ki [8], [9] [10].

A vizsgált feladat döntési változóinak értékét – melyeket a termelési finomprogram tartalmaz – egy többoperátoros és többcélú keresőalgoritmus állítja be. Ez iteratív módon módosítja a választott bázismegoldást. Konzisztens változtatásokkal új megoldásváltozatokat készít és a legjobbat bázisnak tekintve tovább módosítja lépésről lépésre haladva.

A keresőalgorithmusban többféle módosító operátort alkalmazunk, melyek a gyártósorok pozícióiban az adott időhorizonton aktívan használt erőforrás-konfigurációkra vonatkozó döntési változókat módosítják.

A módosítás célja, hogy a hiánnyal rendelkező terméktípus gyártását elősegítse és az esetleg többlettel rendelkező terméktípus gyártását csökkentse. Adott gyártósoron egy kiválasztott termék gyártásának beütemezése azt jelenti, hogy kiválasztásra kerül egy olyan műszak, amelyben az előzetesen ismert átállítási korlát megsértése nélkül egy új átállással kedvező hatást eredményező gyártás végrehajtható.

Az adott megoldásváltozathoz tartozó gyártott termékmennyiségek és készletek időbeli alakulásának számítását egy szimulációs eljárás végzi el. Ez az algoritmus figyelembe veszi a rendszer összes meghatározó működési jellemzőjét és korlátozását. A szimuláció virtuálisan leköveti a rendszer összes szükséges állapotváltozását, beleértve a készletnövelési és készletfelhasználási eseményeket is.

A szimuláció által szolgáltatott értékek felhasználásával egy értékelő komponens kiszámítja a konkrét megoldáshoz (termelési finomprogramhoz) társuló teljesítménymutató-értékeket (KPI). A kutatómunkánk során kidolgoztunk egy célfüggvény-rendszert, amely a gyártásirányítás által támasztott igényeket ki tudja fejezni az optimalizálási modellben. A következő fejezetben ennek a célfüggvény-rendszernek a részleteit mutatjuk be.

4. A kidolgozott ütemezési célfüggvények

A javasolt új célfüggvény-rendszer a következő célfüggvények együttes kompromisszumos minimalizálását fejezi ki:

- f_1 : Maximális termékhiány [db].
- f_2 : A termékhiány összege [db].
- f_3 : A csúszó gyártási megrendelések száma.
- f_4 : Az átállítások száma.
- f_5 : Az átállások maximális száma egy műszakban.
- f_6 : A többlettel záró terméktípusok száma.
- f_7 : A terméktöbbletek összege [db].
- f_8 : A maximális termékhiány az ütemezett időszak végén [db].
- f_9 : A termékhiány összege az időszak végén [db].
- f_{10} : A csúszó rendelések prioritásainak összege.
- f_{11} : A csúszó rendelések maximális prioritása.
- f_{12} : A csúszó terméktípusok száma.
- f_{13} : A maximális termékhiány nullához viszonyítva [db].
- f_{14} : A termékhiány összege nullához viszonyítva [db].
- f_{15} : A maximális csúszás [műszak].

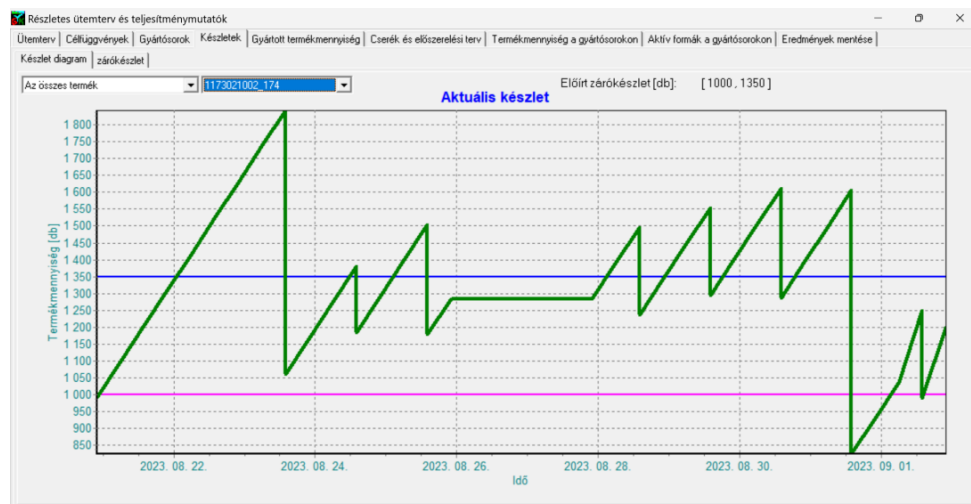
- f_{16} : A csúszások összege [műszak].
- f_{17} : A konfiguráció-előkészítések száma.
- f_{18} : Nem használt pályakapacitás [termékgyártási alapegység].

A kifejlesztett célfüggvény-rendszerre alapozott termelésütemezési és -irányítási modell lényeges új elemei közé tartozik, hogy egyidejűleg több menedzsmentelvárást támogató. A célfüggvények tervezésekor a következő négy célkategóriát különböztettük meg:

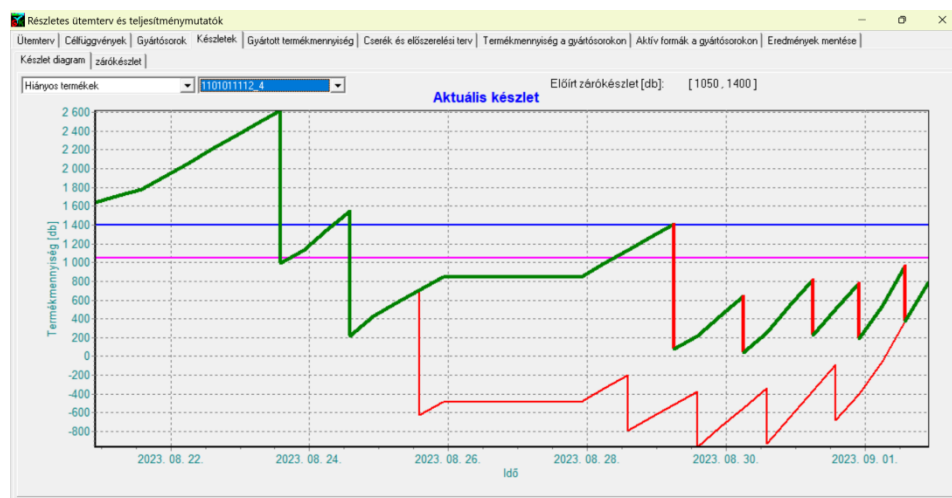
- I. A rendelések teljesítése az előírt határidőkre:
 $f_1, f_2, f_3, f_{10}, f_{11}, f_{12}, f_{15}, f_{16}$
- II. A beavatkozások és átállások mértékének minimalizálása:
 f_4, f_5, f_{17}
- III. Az előírt készlet szintek fenntartása:
 $f_6, f_7, f_8, f_9, f_{13}, f_{14}$
- IV. A gyártási erőforrások kapacitáskihasználtságának maximalizálása a kihasználatlanság minimalizálásával:
 f_{18}

Ebben a cikkben elsősorban a határidők betartását támogató célfüggvényekkel foglalkozunk (I.). Egy kombinált megközelítést alkalmaztunk. Egyrészt felhasználtuk a klasszikus csúszás (tardiness) orientált szemléletet, másrészt a modellben több új készletre vonatkozó teljesítménymutatót használunk célfüggvényként. Ez utóbbiak számításának lényege az, hogy a gyártott mennyiségeket és a kiszállított mennyiségeket az idő függvényében összevonva kezeljük, így bármely időpontban számszerűsíthető az aktuális készlet szintérték minden egyes terméktípus esetében. Az 1. ábra egy példán keresztül mutatja be egy kiválasztott terméktípus készlet-idő diagramját. Az aktuális készletértékek felhasználásával az adott referencia alsó és felső határokhoz viszonyított hiány vagy többlet egyszerűen számítható. Az 1. ábrán rózsaszínű vízszintes vonal jelöli az előírt készletsáv alsó értékét és kék színű vonal jelzi a felső értékét. Az ütemezési időszak végén a célfüggvények számszerűsítik a terméktípusok mindegyikére vetítve az előírt sávtól való eltérést.

A készletorientált koncepciót alkalmazva a rendelések teljesítésének csúszása szintén egyszerűen számítható a készlet-idő diagram alapján. Az előírt határidő pillanatában az aktuális készlet szint és a rendelt mennyiség különbségeként adódó előjeles érték mutatja a hiányt (negatív érték) vagy a többletet (pozitív érték). Az 1. ábra függőleges vonalai jelzik a rendelések teljesítésekor a rendszerből kikerült termék-mennyiségek hatását a készlet-idő diagramon. A vázolt esetben minden megrendelés időben teljesült. Ezt zöld színű függőleges vonalak jelzik.



1. ábra. Egy kiválasztott termék készlet szintjének változása az ütemezési időhorizonton



2. ábra. Csúszó rendelések megjelenése a készlet-idő diagramon

A 2. ábra olyan szituációt mutat, amelyben adott terméktípus esetében a rendelések késve teljesülnek. A rendelés csúszása azt az időtartamot jelenti, amely az előírt határidő és az azt követő tényleges teljesítés között eltelik. A 2. ábra azt is kifejezi, hogy a vékony piros vonallal jelölt készlet szint tartozna a határidők szerinti kiszállításhoz, de ez nem valósítható meg, mert nincs elég készlet és így az értékek negatív tartományba esnének. A vastag piros függőleges vonalak jelzik a tényleges rendelésteljesítést (kiszállítást). A függőleges vonalakat összekötő zöld vonalak mutat-

ják a termékelőállítás intenzitását. Ahol a zöld vonal vízszintes, abban az időintervallumban a terméket nem gyártják, ahol a zöld vonal emelkedik, ott az előállítás mértéke arányos a vonal meredekségével. A páronként összetartozó vékony és vastag piros vonalak távolsága adja meg a csúszás mértékét. A kiszállításkor figyelembe veszi a szimuláció, hogy addig nem lehet kiszállítani egy későbbi megrendelésnek megfelelő anyagmennyiséget, amíg a korábban rendelt ugyanolyan típusú termékek kiszállításra nem kerültek. A 2. ábra erre is példát mutat. Látható, hogy a 2023. 08. 25-én (pénteken) esedékes kiszállítás csak 2023. 08. 28-én (hétfőn) teljesül és az utána következő rendelések mindegyike egy munkanapot csúszik. Ez a csúszássorozat 2023. 09. 01-én (pénteken) fejeződik be. Az elvárt fiktív és a valós készletérték itt találkozik újra. A felsorolt célfüggvények az ilyen és az ezekhez hasonló nem kívánt eseményeket és azok hatását minimalizálják.

A modell kidolgozásakor azt is figyelembe vettük, hogy a termelés-menedzsment által megfogalmazott célok fontossága időről időre változhat a piaci és a belső folyamatok változásai miatt. Ezért a modellben a célfüggvényeknek saját aktuális prioritásértéke van. Ezeket a prioritásértékeket a felhasználó állíthatja be, ezáltal kifejezheti a célfüggvények aktuális fontosságát az ütemezés előtt.

Az ütemezési folyamatban a 18 összetevőből álló célfüggvény-rendszerünk kezelésére a korábban kidolgozott matematikai modellt használtuk [8]. A módszer lényege az, hogy két kiválasztott megoldás összehasonlításakor a második megoldásnak az első megoldáshoz viszonyított relatív minőségét számítjuk ki. A kapott előjeles valós számérték alapján döntjük el, hogy melyik megoldás a kedvezőbb megoldás az aktuális szituációban. Ez az összehasonlítás teszi lehetővé, hogy a kereső-algoritmusokban a szükséges megoldáskomparátor-funkciót sok célfüggvény esetében is egyszerűen meg tudjuk valósítani.

5. Egy alkalmazási példa és néhány futási eredmény

Ebben a részben bemutatunk egy valós ipari alkalmazási példát, amelyből egy kiválasztott feladatinstanciát részletezünk. A gyártórendszer járművekhez készít üléselelmeket. A gyártási folyamatban gyártópályák működnek, melyeknek csatlakozási pontjaik vannak. Ezekhez a pozíciókhoz formahordozóra szerelt formákat kell csatlakoztatni. A pálya bejárása után a formákban elkészül a terméktípus. Technológiai szabályok definiálják, hogy melyik pályán, melyik pozícióban, milyen formákkal és formahordozókkal, milyen terméktípus gyártható. A formahordozók és formák darabszáma korlátos. A formahordozókból és formákból összeállított konfigurációkat előzetesen kell előkészíteni a gyártás megkezdése előtt. A pályák pozícióiban elvégzett konfigurációk cseréjével szabályozható a rendszerben gyártott terméktípusok aktuális halmaza és gyártási intenzitása.

A kiválasztott feladat legfontosabb jellemző méretei a következők:

- Az ütemezési időhorizont hossza: 2 hét
- A műszakok időtartama: 8 óra
- A gyártósorok (pályák) száma: 4

- A csatlakozási pozíciók száma: 88
- A formahordozók száma: 144
- A formák száma: 418
- A terméktípusok száma: 182
- A termékcsoportok száma: 129
- A megrendelések száma: 856

A kiválasztott ütemezési feladat megoldása érdekében egy saját fejlesztésű keresési módszert használtunk. A módszer tabukeresési elvet használ a lokális optimumból való kijutáshoz. Emellett változó szomszédsági operátorokat használ a továbblépésre esélyes megoldások előállítására. A vizsgálat során a keresési paramétereket rögzítettük, és csupán a célfüggvények prioritásait változtattuk meg a különböző futtatások előtt. Ezáltal kizárólag csak a célfüggvények szerepére összpontosítottuk a vizsgálatainkat.

Cikkünkben öt kiemelt prioritási beállítást (sémát) hasonlítottunk össze. A beállított prioritási értékek az $f_1|f_2|\dots|f_{18}$ célfüggvényekre vonatkozóan az egyes sémák esetében a következők voltak:

- PO: 40|40|40|10|10|0|0|0|0|2|2|1|1|1|50|50|6|48|
- PO_S: 42|44|44|2|2|3|2|12|8|1|1|1|1|1|50|50|1|40|
- Tsum: 0|0|0|0|0|0|0|0|0|0|0|0|0|0|50|0|0|
- Usum: 0|0|50|0|0|0|0|0|0|0|0|0|0|0|0|0|0|0|
- Tsum_Usum_Tmax: 0|0|50|0|0|0|0|0|0|0|0|0|0|0|50|50|0|0|

A PO rövidítéssel azonosított prioritási séma célja az volt, hogy a rendszerben csak annyi átállítás legyen beütemezve, amennyivel a rendelések csúszás nélkül teljesíthetők. A PO_S-séma esetében azt fejeztük ki, hogy a rendszerben a rendelések teljesítésén túlmenően az elvárt zárókészletek is az előírt sávba kerüljenek. Ezt a két általunk kifejlesztett célfüggvény-prioritási sémát hasonlítottuk össze további három klasszikus megközelítést reprezentáló sémával. A Tsum-séma a csúszások összegét használja egyedüli célfüggvényként. Az Usum-séma a csúszó rendelések számát használja egyedüli célfüggvényként. A Tsum_Usum_Tmax-séma az előző kettőt együtt használja és még kiegészíti a legnagyobb csúszás minimalizálásával.

Az elért eredményeket az 1. táblázat foglalja össze. Az eredmények mutatják, hogy az általunk javasolt PO- és PO_S-sémákkal megoldható a gyártásütemezési feladat csúszás nélkül. Ezáltal mind a 856 rendelés határidőre teljesíthető. A klasztrikus megközelítések egyikével sem sikerült csúszásmentesen kiszolgálni a rendeléseket. Tsum esetén 3, Usum esetén 7, míg Tsum_Usum_Tmax esetén 2 rendeltet nem sikerült határidőre teljesíteni (f_3).

Az is megfigyelhető, hogy míg a PO-séma csupán 46 átállítással oldotta meg csúszás nélkül a feladatot, addig a klasszikus megközelítések ennél több (56, 79, 48)

átállítást eredményeztek (f_4) és még így is maradtak csúszások a rendszerben.

1. táblázat
A célfüggvények értékei különböző prioritási sémák alkalmazása során

Célfüggvény	PO	PO, S	Tsum	Usum	Tsum_Usum_Tmax
f_1	0	0	672	966	708
f_2	0	0	968	3983	978
f_3	0	0	3	7	2
f_4	46	99	56	79	48
f_5	3	6	4	6	3
f_6	81	64	89	86	87
f_7	64517	45370	62012	61813	54116
f_8	875	164	940	960	1006
f_9	10587	861	9348	11649	8753
f_{10}	0	0	3	7	2
f_{11}	0	0	1	1	1
f_{12}	0	0	2	2	1
f_{13}	0	0	566	569	602
f_{14}	0	0	566	569	602
f_{15}	0	0	42	42	42
f_{16}	0	0	44	112	45
f_{17}	22	50	27	37	24
f_{18}	2	2	19	15	0

A PO_S-séma használatával a rendelések kiszolgálása mellett a készletszintek irányítása is nagyon kedvezően alakult. Az előírt minimális készletszintnél csupán 861 db termékkel kevesebb került legyártásra, míg a többi séma esetében ugyanez a számérték nagyobb vagy egyenlő, mint 8753 (f_9). Ez több mint tízszerese a PO_S-sémával elért értéknek. A maximális hiány PO_S esetében 164, míg a többinél nagyobb vagy egyenlő, mint 940 (f_8). Ez is nagyon jelentős eltérés. A zárókészletek alakulásából pedig az látszik, hogy míg az általunk javasolt célfüggvényekkel egyáltalán nincs hiány, addig a klasszikus megközelítést reprezentáló sémák esetében rendre van termékhiány a nulla készlethez képest is (f_{13} , f_{14}). Ez azt jelenti, hogy míg a klasszikus megközelítésekkel marad a rendszerben ki nem szolgált rendelés az időhorizont végén is, addig az általunk javasolt új célfüggvényekkel a rendelések hiánytalanul és határidőre teljesíthetők.

A vizsgálat eredményei egyértelműen mutatják, hogy a példában szereplő ütemezési feladatot az új célfüggvény-rendszerrel sokkal hatékonyabban képes megoldani ugyanaz az ütemező motor, mint az új célfüggvényelemek nélkül. Az általunk javasolt hiányalapú és csúszásorientált célfüggvény-rendszer alkalmazása nagyon kedvezően befolyásolja az adott időhorizonton a gyártórendszer teljesítőképességét.

A javasolt célfüggvény-rendszert többféle feladatinstanciával és különböző prioritásbeállításokkal is teszteltük. A vizsgálatok eredményei igazolták a javasolt optimalizálási megközelítés rugalmasságát. A célfüggvények prioritásainak hangsúlyozásával hatékonyan szabályozható az ütemezés.

A javasolt célfüggvény-rendszer segíti a felhasználót abban, hogy a határidőorientált gyártási paradigmát és a készletorientált gyártási paradigmát hatékonyan kombinálja és a prioritások kalibrálásával összhangba állítsa a gyártási lehetőségeket és a piaci igényeket. Ezek az irányítási eszközök olyan szituációkban is nagyon hasznosak, amikor csak megfelelő készletek tartalékolásával biztosítható a határidők csúszásmentes betartása.

6. Összefoglalás és következtetések

A cikkben bemutatunk egy ütemezési modellt és egy új ütemezési célfüggvény-rendszert, amely alkalmas a diszkrét alkatrészgyártó rendszerek integrált ütemezési és termelésprogramozási feladatainak megoldására. A modell hatékonyan támogatja az igény szerinti rendelésorientált rugalmas gyártás előidejű ütemezését. Az ütemezési folyamat döntési változói magukban foglalják az elvégzendő munkafeladatok megfelelő erőforrásokhoz rendelését, az érintett osztott hozzáférésű erőforrások menedzselését, a végrehajtás ütemezését és a terméktípusok készletszintjének irányítását.

A célfüggvények hatékonyságát egy valós gyakorlati példán végzett elemzéssel mutattuk be. Az elvégzett tesztek igazolták, hogy a kidolgozott célfüggvény-rendszer használatával adott keresési módszer hatékonyabban oldja meg a vizsgált feladatokat, mint a célfüggvény-rendszer új elemei nélkül.

Irodalomjegyzék

- [1] Brucker, P. (2007). *Scheduling Algorithms*, Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-69516-5>
- [2] Allahverdi, A., Ng, C. T., Cheng, T. C. E., Kovalyov, M. Y. (2008). A survey of scheduling problems with setup times or costs. *European Journal of Operational Research*, 187 (3), pp. 985–1032. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.06.060>.
- [3] Gharbi, A., Haouari, M. (2005). Optimal parallel machines scheduling with availability constraints. *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 148, pp. 63–87.
<https://doi.org/10.1016/j.dam.2004.12.003>
- [4] Kaabi, J., Harrath, Y. (2014). A survey of parallel machine scheduling under availability constraints. *International Journal of Computer and Information Technology*, 3 (2), pp. 238–245.
- [5] Lei, D. (2009). Multi-objective production scheduling: a survey. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 43, Issue 9–10, pp. 926–938.
<https://doi.org/10.1007/s00170-008-1770-4>
- [6] Zheng, H., Gao, S., Liu, W., Wu, W., Du, D. Z., Hou, B. (2022). Approximation algorithm for the parallel-machine scheduling problem with release dates and

- submodular rejection penalties. *Journal of Combinatorial Optimization*, 44, pp. 343–353. <https://doi.org/10.1007/s10878-021-00842-x>
- [7] Tóth, N., Kulcsár, G. (2021). New models and algorithms to solve integrated problems of production planning and control taking into account worker skills in flexible manufacturing systems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 12 (4), pp. 381–400, <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2021.5.004>
- [8] 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>.
- [9] Kulcsár, Gy. (2007). *Ütemezési modell és heurisztikus módszerek az igény szerinti tömeg-gyártás finomprogramozásának támogatására*. Doktori (PhD-) értekezés, Miskolci Egyetem, Miskolc.
- [10] 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>