



KORLÁTOZOTT KAPACITÁSÚ MŰVELETKÖZI TÁROLÓ HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA DISZKRÉT GYÁRTÁSI FOLYAMATOK ÜTEMEZÉSEKOR

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 egy összetett termelésütemezési feladat megoldását mutatja be. A vizsgált probléma jellegzetessége, hogy alkatrészgyártási és termékszerelési folyamatokat kell időben összekapcsolni megvalósítható ütemtervek készítésével. A feladatot szigorú technológiai és logisztikai erőforráskorlátok között kell megoldani. A cikk bemutatja a vizsgált feladat megoldási koncepcióját, ismerteti a modell legfontosabb elemeit, és szemlélteti a kifejlesztett megoldási módszer hatékony működését egy példán keresztül. Kiemelt hangsúlyt kap a műveletközi tároló hatásának vizsgálata.

Kulcsszavak: Ütemezés, szimuláció, többcélú optimalizálás, gyártórendszer, műveletközi tároló.

1. Bevezetés

Napjainkban a gyártórendszerek irányításában egyre fontosabb szerepet játszanak a termelésinformatikai modellek és módszerek. A diszkrét termelési folyamatok megfelelő ütemezése nagyon fontos és nagyon összetett optimalizálási feladat.

Az ipari gyakorlatban az ütemezési problémák szoftveres megoldásához szükség van az adott termelési folyamat kellően részletes modellezésére. Az elsődleges elvárás, hogy olyan ütemezési modellek álljanak rendelkezésre, amelyek a szigorú gyártási feltételek között is megvalósítható és optimum közeli megoldásokat szolgáltatnak.

A termelési rendszerek működésének egyik fontos tervezési folyamata a termelési terv elkészítése. A kapcsolódó vezetői döntések a piaci igények kielégítését veszik alapul és ennek érdekében gyártási rendeléseket generálnak. Ezek teljesítéséhez általában helyben gyártandó munkadarabokra és összetett beépülő részegységekre, valamint vásárolt egyéb komponensekre van szükség. A gyártási folyamatok hatékony megvalósítását célszoftverek alkalmazásával lehet biztosítani. Ide tartoznak az ütemező szoftverek is, melyek nagymértékben javíthatják a teljes rendszer működési hatékonyságát.

Az ütemezés célja az, hogy az aktuális időhorizontra előírt gyártási rendelések teljesüljenek. Ennek érdekében részletes ütemterv kidolgozására van szükség. Ez az optimalizálási folyamat több részfeladatot foglal magába. A szükséges

műveletek elvégzése érdekében alkalmas erőforrásokat kell lefoglalni és hozzárendelni a tevékenységekhez. Ezen túlmenően a műveletek indítási időpontját is ki kell jelölni az aktuális korlátfeltételek betartása mellett. Az ütemezés optimalizálási szempontjait a mindenkori menedzsment elvárásainak megfelelően kell beállítani.

Az egyik kulcskérdés az, hogy a valós rendszer korlátfeltételeit milyen mértékben tudja kezelni az ütemező szoftver. Ide tartoznak például a gyártási és a logisztikai rendszerelemek működési jellemzői, valamint a gyártási és egyéb kapcsolódó műveletek végrehajtási jellemzői és feltételei is.

Cikkünkben bemutatunk egy olyan modellt, amelyet alkatrészgyártási és végtermék-összeszerelési folyamatok integrált ütemezésére fejlesztettünk ki.

2. A feladat bemutatása

A vizsgált diszkrét termelési rendszerben több párhuzamosan működő szerelősoron készülnek el a végtermékek. Egy késztermékbe többféle komponens épül be. Az egyik alapvető beépülő komponens típus helyben kerül legyártásra alkatrészgyártó munkahelyeken.

A rendszerben két kiemelt fázist vizsgáltunk meg. Az egyik fázis az alkatrészgyártás, amely alkatrészgyártó gépeken valósul meg. A másik fázis a végtermék-összeszerelés, amely szerelősorokon valósul meg. A két fázis között egy közös használatú műveletközi tároló helyezkedik el. A két fázis végrehajtási sorrendje kötött, mert az alkatrészgyártásnak (1. fázis) meg kell előznie a szerelést (2. fázis).

Adott a termelési rendszerben előállítható végtermékek halmaza. Egy adott végtermékbe a vizsgált helyben gyártott alkatrészből pontosan egy darab épül be. Adott a terméktípusokhoz szükséges megfelelő alkatrésztípusok halmaza.

A gyártórendszerben nem minden munkahely (gép) alkalmas minden művelet elvégzésére. Adottak a technológiai korlátozások, melyek definiálják, hogy az alkatrészgyártási és szerelési műveletek elvégzésére mely munkahelyek (gépek) alkalmasak. Nem minden alkatrész gyártható minden gépen, és nem minden termék szerelhető minden szerelősoron.

A termékek szerelése sorozatokban valósul meg. A sorozat nagysága gyártási rendelésenként egyedileg előzetesen rögzített. Ennek megfelelően a szükséges alkatrészek gyártását is sorozatban kell megvalósítani a rendelésekhez tartozó darabszámokkal.

Az alkatrészgyártó gépekről egy adott munkadarab-sorozat már elkészült elemei kisebb egységekben továbbíthatók. Ezáltal ugyanannak a sorozatnak különböző munkadarabjai különböző helyeken (gépeken vagy tárolóban) lehetnek. Az anyagmozgatási idők ismertek.

A gépek (munkahelyek) a műveletvégzést eltérő sebességgel valósíthatják meg. Adottak a műveleti idők gép és terméktípus bontásban. Adott alkatrésztípus általában egyidejűleg több gépen is gyártható, de az azonos megrendeléshez tartozó alkatrészeket ugyanazon a gépen kell elkészíteni. Vannak speciális típusok is, amelyekre ez nem érvényes (pl. csak egy adott alkatrészgyártó gépen gyárthatók).

A gépeket különböző típusok gyártása között át kell állítani, melynek időigénye van. Az átállítási idők függenek a terméksorrendtől és a konkrét géptől. Az átállítási idők általában nem szimmetrikusak.

Adott az ütemezési időhorizont. Egyedileg adottak a szerelősorok tervezett műszakjai. Adott továbbá minden egyes szerelősor esetében a rendelések

végrehajtási sorrendje és kezdési időpontja. Ezek az adatok rögzítettek, ezektől eltérni nem lehet. Az ütemezés során ezeket a döntéseket nem változtathatjuk meg. Előzetesen ismertek a szerelési sorozatokat indukáló aktuális belső rendelések adatai (terméktípus, darabszám, szerelősor-azonosító, szerelési sorozat indítási időpontja).

Az ütemezés lényege az, hogy a rögzített szerelési sorozatok kiszolgálása érdekében készítsünk alkatrészgyártási ütemtervet, amely meghatározza, hogy a szükséges alkatrésztípusból a szükséges mennyiséget melyik alkatrészgyártó gépen és mikortól kezdve kell legyártani. Az alkatrészgyártó gépek működése a szerelősorokhoz hasonlóan műszakbeosztáshoz kötött, de ezeknél a gépeknél az aktív műszakok kijelölése az ütemező döntési hatáskörébe tartozik, így az ütemezés szempontjából az aktív műszakok beosztása is döntési változó.

A műveletközi tároló kapacitása korlátos. Mivel az alkatrészek befoglaló méretei között jelentős különbségek vannak, így a tároló kapacitása terméktípusonként eltérő. Több gép egyszerre végez betárolást és kitárolást különböző intenzitással és különböző típusú alkatrészekkel. Ha a tároló megtelik, akkor a betárolást végző gépeket blokkolja, így azok leállnak. Bizonyos idő eltelte után újra indulhatnak ezek a gépek, ha ismét lesz szabad tárolókapacitás. Ütemezés során különös figyelmet kell fordítani arra, hogy az ilyen blokkolódásokat elkerüljük. Ez azért fontos, mert az újraindításnak jelentős időszükséglete, költségvonzata és magas selejtkockázata van.

Az ütemezési időhorizont kezdeti szakaszának tervezésekor azt is figyelembe kell venni, hogy a gépek a még be nem fejezett korábbi feladatokkal terheltek lehetnek.

3. A javasolt megoldási módszer

A vizsgált ütemezési feladat nagymértékben különbözik a hagyományos ütemezési feladatoktól. A sajátos jellemzők miatt továbbfejlesztett modellre és módszerre van szükség.

A szakirodalomban nagyon sok szerző foglalkozik az ütemezési problémák megoldásával. Egyre több új modell és módszer jelenik meg. Az általunk vizsgált feladat a rugalmas többgépes és hibrid párhuzamos gépes kategóriákba tartozik. Az ilyen problémákról és a javasolt megoldási módszerekről részletes áttekintést adnak például az [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12] munkák.

Az erőforrásonkénti változó feltételrendszerek és döntési változók az általunk vizsgált ütemezési feladat esetében nagyon speciálisak, így jelentősen továbbfejlesztett és kiterjesztett modellre volt szükségünk. A probléma megoldása érdekében kidolgoztunk egy olyan optimalizálási modellt, amely a hagyományos ütemezés mellett integráltan kezeli a műszakbeosztási feladatot is. Emellett támogatja az erőforrások egyedi működési jellemzőinek figyelembevételét, ideértve a korlátozott kapacitású műveletközi tárolót is.

A megoldási módszer alapelve az, hogy az összes döntési változó értékét egyetlen kereső algoritmussal állítjuk be egyidejűleg. A megoldás minőségét szimulációs algoritmussal értékeljük ki. A kiértékelés során több teljesítménymutatót használunk egyidejűleg.

Az elsődleges cél az, hogy az alkatrészgyártás ütemezése során a szerelősorokra előírt sorozatok (gyártási rendelések) teljesítését kell biztosítani az igényelt alkatrészek előállításával. Ennek érdekében alkalmas gépeket kell kijelölni a szükséges munkák elvégzésére, és az elvégzendő műveletek indítási időpontját rendre úgy kell megtervezni, hogy az alkatrészek fennakadás nélkül időben

eljussanak a kijelölt szerelősorokra. Ezek együtt adják meg az alkatrészgyártás ütemtervét, amely előírja, hogy (1) melyik gépen, (2) mikor kell az átállítást elkezdni, (3) milyen alkatrészfajtából, (4) mikortól kezdve, (5) mennyit kell legyártani.

Az alkatrészgyártási igényeket a szerelősorok ismert termelési menetrendjéből számítjuk ki. Ebből adódnak az igényelt alkatrésztípusok és darabszámok, az előírt célállomások (szerelősorok) és a megkövetelt határidők. Egy adott szerelési sorozathoz szükséges alkatrésztípusra vonatkozó igényt nevezünk egy munkának (job). Egy munka minden egyes munkadarabjának határidejét egyedileg számítjuk ki. A sorozat első elemének határidejét az érintett szerelési sorozat szerelősoron való indításának ismert időpontja adja meg. Az egyes munkadarabok egyedi határidejét a szerelősor adott típusra vonatkozó ciklusidejéből és az aktuális műszakbeosztásából számítjuk ki. Ez kifejezi azt az időpontot, amikor a konkrét munkadarab a szerelési menetrend alapján várhatóan felhasználásra kerül. Az igényelt alkatrészek pontos határidejének számítására egy olyan algoritmust készítettünk, amely a szerelősorok működését úgy szimulálja, mintha a szükséges összes alkatrész időben rendelkezésre állna. A koncepcióban az alkatrész helyett egy termelési vagy logisztikai egység is használható, amely az alkatrész egy paraméterben adott egész számú többszörösét jelenti.

A munka fogalmát tehát ebben a modellben úgy definiáltuk, hogy adott számú egyforma munkadarabon két művelet végrehajtását jelenti. A szerelésre vonatkozó belső rendeléseket nem bonthatjuk meg a technológiai korlát miatt, de az azonos típusra vonatkozó rendeléseket összevonhatónak tekintjük. Ennek következtében az ütemezés alapegységének a belső rendeltést tekintjük.

Egy lehetséges megoldás reprezentációját két fő döntési változócsoporthal adjuk meg. Ezek a következők:

- Munkasorrend a gépeken: Minden egyes munka első (alkatrészgyártó) műveletét alkalmas géphez rendeljük, valamint minden érintett gépen előírjuk a munkák végrehajtási sorrendjét.
- Meghatározzuk az alkatrészgyártó gépek egyedi műszakbeosztását: Az ütemezési időhorizonton rendelkezésre álló műszakok közül kiválasztjuk azokat, amelyekben dolgozhat a gép.

A felsorolt döntési változók az alkatrészgyártásra vonatkoznak. A pontos műveletkezdesi időpontokat a fenti két döntési változócsoporthat értékei alapján a szimuláció számítja ki. A szerelősorok termelési terve bemenő adatként rögzített. A két fázis ütemtervét közös ütemtervbe illesztjük mivel a termelési folyamat együttesen határozzák meg. Az ütemezési folyamat eredményeképpen elkészül egy lehetséges termelési ütemterv.

A döntési változók értékének beállítása után lefut a teljes termelési folyamat szimulációja. Az ütemterv végrehajtását jellemző időpontok és időtartamok számítását egy szimulációs eljárás végzi el.

A szimuláció tervezésekor figyelembe vettük, hogy adott munkának különböző munkadarabjain különböző műveletek is végrehajthatók egyidejűleg. Az anyagmozgatást kisebb logisztikai egységek formájában szimulálja az algoritmus. Adott munka (munkadarab-sorozat) adott gépen nem szakítható meg más munkával, de a műveletvégzés indokolt esetben szünetelhet azonos sorozat két munkadarabja között. A szimuláció kezeli a korlátozott méretű műveletközi tárolót is. Az anyagmozgatási egységek továbbítása során, ha megtelik a tároló, akkor az algoritmus leállítja az alkatrészgyártó gépeket. A szerelősorok működése tovább folytatódik mindaddig amíg van megfelelő alkatrész. Ha a tároló újra használhatóvá válik, akkor a szimulációs algoritmus elindítja az alkatrészgyártó gépeket. Amennyiben az ütemezés következtében a szerelősorok is megakadnak alkatrészhiány miatt, akkor a holtponthelyzetet jelzi a szimuláció és az éppen

vizsgált ütemtervet megvalósíthatatlannak tekinti az ütemező rendszer és elveti.

A megoldási módszer várhatóan egy iteratív keresési algoritmus biztosítja, melybe beágyazva fut a szimuláció a jelölt ütemtervek kiértékelése érdekében. Az iteratív keresés során a lokális keresés, a tabu keresés és a változó szomszédságú keresés elvét kombináltuk.

Az iteratív javítás egy közbenső lépése során egy bázismegoldásból kiindulva egy paraméterben megadott számú szomszédos ütemtervet készít az aktuálisan kiválasztott szomszédsági operátor alkalmazásával. A szomszédsági operátorok a döntési változók értékeit módosítják. Ezek működési algoritmusai csak az alkatrészgyártó gépekre vonatkozó ütemtervrészeket változtatják meg, miközben a szerelősorokét változatlanul hagyják.

A következő módosító operátorokat fejlesztettük ki:

- N1 operátor: egy véletlenszerűen kiválasztott munkát kiemeli az ütemtervből és máshová illeszti be véletlenszerűen választott gép és pozíció szerint.
- N2 operátor: a belső határidőt túllépő munkák közül véletlenszerűen kiemeli egyet az ütemtervből és máshová illeszti be.
- N3 operátor: egy véletlenszerűen választott gépen megváltoztatja a munkák végrehajtási sorrendjét úgy, hogy egy véletlen hosszúságú permutációciklust alkalmaz a sorrenden. Kijelöl néhány pozíciót és az azokban lévő munkákat rendre a következő kijelölt pozícióba lépteti. Az utolsó kijelölt pozícióból a munkát az első kijelölt pozícióba viszi át.
- N4 operátor: egy véletlenszerűen választott gépen felcseréli két véletlenszerűen választott szomszédos munka sorrendjét.
- N5 operátor: a belső határidőt túllépő munkák közül véletlenszerűen kiválaszt egyet és egygel előre lépteti a végrehajtási sorrendben.
- N6 operátor: egy véletlenszerűen választott gépen bekapcsol egy véletlenszerűen választott kikapcsolt műszakot.
- N7 operátor: egy véletlenszerűen választott gépen kikapcsol egy véletlenszerűen választott bekapcsolt műszakot.
- N8 operátor: egy véletlenszerűen választott gépen bekapcsol egy véletlenszerűen választott kikapcsolt műszakot és a rákövetkező bekapcsolt műszakot kikapcsolja.

A kereső algoritmus működése közben a szomszédságképzést végző módosító operátorok kiválasztását egy fontossági sorrendet kijelölő prioritáslista és kvázi-véletlenszám generátor együtműködése határozza meg. A prioritáslista az operátorok kiválasztási valószínűségét írja le. A kiválasztás minden egyes szomszéd-generálás előtt újra végrehajtásra kerül.

A lokális optimumból való kijutás elősegítése érdekében tabulistát használunk. Ha a módosító operátorok által készített kiterjesztett ütemterv szerepel a tabulistán, akkor az algoritmus azt nem értékeli ki, ellenkező esetben felkerül a tabulistára. Ha a megengedett tabuelemek száma elérte a maximális értéket, akkor a legkorábban felvett listaelem törlődik. A tabulista azt a célt szolgálja, hogy a keresési folyamat ne ragadjon bele egy lokális optimumba, hanem át tudjon rajta haladni és a közeljövőben ne térhessen vissza oda.

A tabulistával megszürt szomszédos megoldások közül a legjobb szomszéd lesz a következő iterációban a bázismegoldás. A bázismegoldást nem tekintjük saját maga szomszédjának, így ha a szomszédok rendre rosszabbak mint a bázis, akkor is tovább lép az algoritmus a bázisról a legjobb szomszédra. Az iterációkban az

addig megtalált legjobb megoldást elmenti a rendszer és azt adja vissza végeredményül.

Az ütemezési modellünkben a generált megoldás-jelöltek értékelésére egyidejűleg nyolc célfüggvényt használunk. Ezek a következők:

- f_1 : minimális legyen a határidőt túllépő sorozatok száma,
- f_2 : minimális legyen a csúszások időösszege,
- f_3 : minimális legyen a legnagyobb határidő-túllépés (csúszás),
- f_4 : minimális legyen a gépátállítások száma,
- f_5 : minimális legyen a gépátállítások időösszege,
- f_6 : minimális legyen a gépek időkapacitásának átlagos kihasználatlansága, ezáltal maximális legyen a gépek átlagos kihasználtsága,
- f_7 : minimális legyen a sorozatok átlagos átfutási ideje,
- f_8 : minimális legyen a súlyozott műszakszám.

A súlyozott műszakszámot arra használjuk, hogy a bekapcsolt műszakok költségeit minimalizáljuk. A műszakokat kategóriákba soroljuk, és minden kategóriához hozzárendelünk egy relatív időegyenérték mutatót. A hétköznapi délelőtti műszak értéke a viszonyítási alap, amely 1,00 értéket kap. Ez a referenciaérték, és ehhez viszonyítva adható meg a további kategóriák értéke. Ezeket a felhasználó állíthatja be. Az adott ütemtervre vonatkozó súlyozott műszakszámot a bekapcsolt műszakok kategória szerinti relatív időegyenértékének összegzésével állítjuk elő.

A megfogalmazott célok fontossága időben változhat, ezért a célfüggvények aktuális fontosságát prioritásértékek megadásával fejezheti ki a felhasználó. A nyolc összetevőből álló célfüggvény-rendszer kezelésére egy korábban kidolgozott matematikai modellt használtunk [13], [14], [15]. A módszer alapelve az, hogy két megoldás összehasonlításakor az egyik megoldásnak a másikhoz viszonyított (relatív) jóságának számértéke alapján dönthető el, hogy melyik tekinthető jobb megoldásnak. A kereső algoritmusban így egyszerűen tudunk összehasonlítani két tetszőleges megoldást a célfüggvény-rendszer és az aktuális prioritások alapján.

4. Néhány futási eredmény

Illusztratív példaként bemutatunk egy kiválasztott gyakorlati esetet. A vizsgált gyártórendszer fagyasztóládákat állít elő. A gyártási folyamatban négy alkatrészgyártó gép (M1-M4) és két végszerelősor (M5 és M6) működik. Technológiai szabályok definiálják, hogy melyik gépen milyen típus gyártható.

A kiválasztott ütemezési feladat alapvető jellemzői a következők:

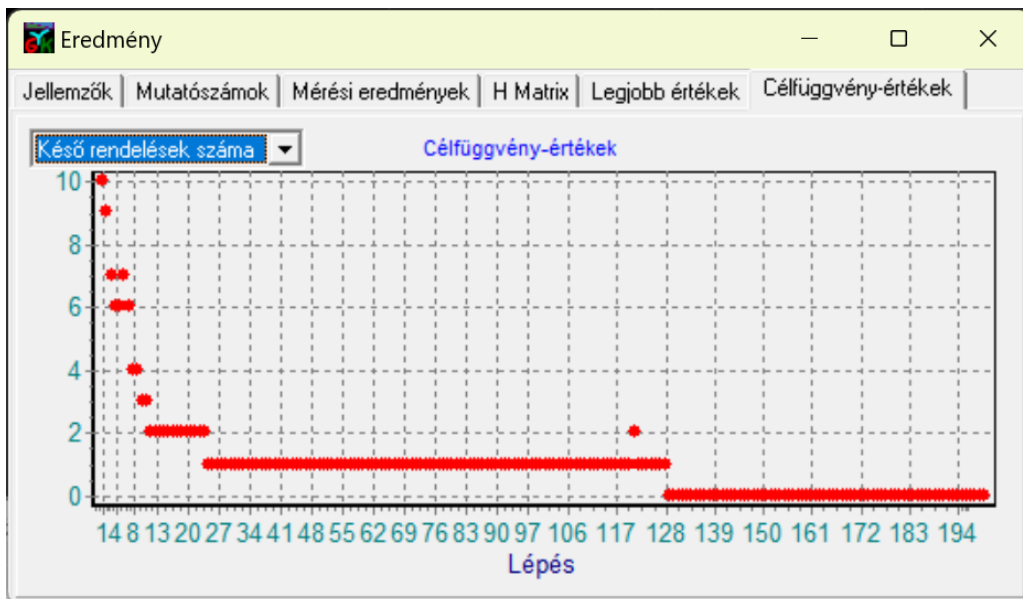
- Az ütemezési időhorizont hossza: 1 hét
- A műszakok időtartama: 8 óra
- A gépek száma: 6
- A gyártandó munkadarabok száma: 8300
- A gyártási rendelések (sorozatok) száma: 20

A kiválasztott ütemezési feladat megoldása érdekében a fentebb bemutatott saját fejlesztésű keresési módszert használtuk. A vizsgálat során a keresési paramétereket és a célfüggvények prioritásait rögzítettük. A műveletközi tároló kapacitásának számértékét megváltoztattuk a különböző futtatások előtt. Ezáltal kizárólag csak a műveletközi tároló szerepére összpontosítottuk a vizsgálatainkat.

A műveletközi tároló kapacitáskorlátját négy különböző értékre állítottuk be az ütemező rendszer futtatása során. Az alapértelmezett értéket úgy határoztuk meg, hogy átlagosan 1500 termék fér el a tárolóban. Ezt tekintettük 100 %-nak. A futtatások előtt rendre 90, 100, 110 és 120 %-ra állítottuk a tárolási kapacitás korlátját. Ezzel szimuláltuk azt, mintha a műveletközi tároló méretét módosítanánk a valóságban. A célfüggvények beállított prioritásait és az ütemezés során elért célfüggvény-értékeket az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat: A célfüggvények értékei különböző tárolási kapacitáskorlát alkalmazása során

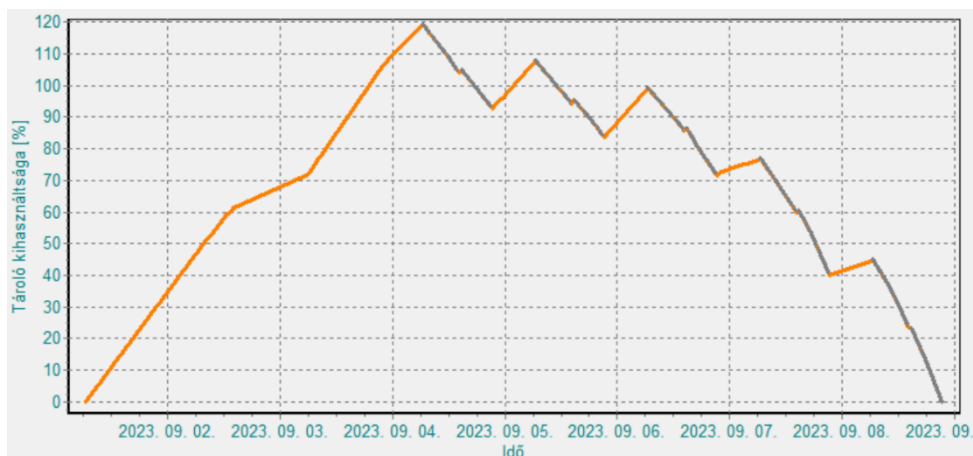
Célfüggvény	Beállított célfüggvény-prioritás	Tároló-kapacitás 90 [%] 1350 [db]	Tároló-kapacitás 100 [%] 1500 [db]	Tároló-kapacitás 110 [%] 1650 [db]	Tároló-kapacitás 120 [%] 1800 [db]
(f ₁) Késő rendelések száma	5	7	5	3	0
(f ₂) Csúszások összege [perc]	5	25932,07	15478,50	704,10	0
(f ₃) Legnagyobb csúszás [perc]	10	4375,37	3830,37	395,37	0
(f ₄) Átállások száma	5	19	20	20	19
(f ₅) Átállási összeitő [perc]	5	500	685	615,00	700
(f ₆) Átlagos gép-kihasználtság [%]	5	97,84	97,11	97,08	97,17
(f ₇) Átlagos átfut. idő [perc]	1	2551,73	2172,58	2408,73	2778,67
(f ₈) Súlyozott műszakszám	10	7550	7850	9575	9650



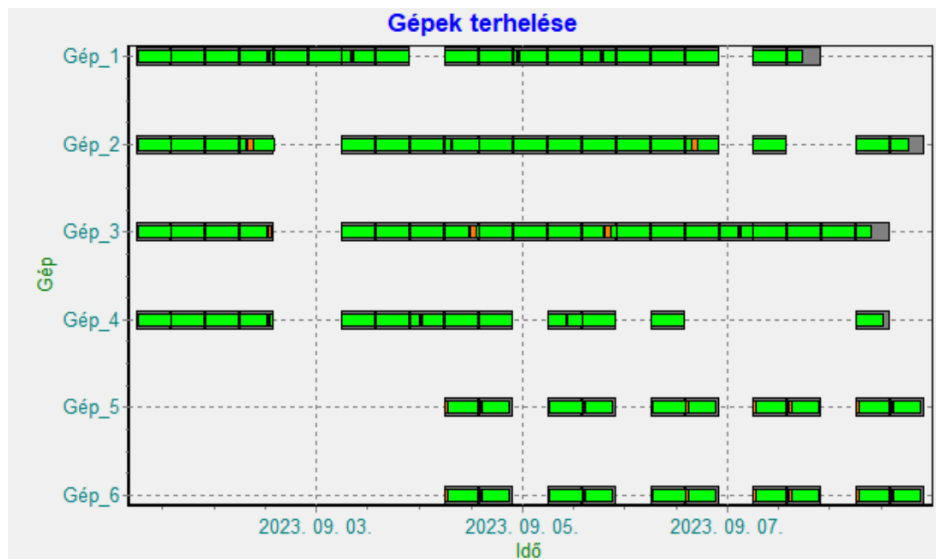
1. ábra: A késő belső rendelések számának változása a keresési lépések függvényében

Az 1. táblázatból kiolvasható, hogy ez első három kísérletben a tárolókapacitás nem tette lehetővé, hogy az ütemezési feladatot csúszás nélkül oldjuk meg. A tárolókapacitás növelésével a csúszások jelentős mértékben csökkentek. A negyedik kísérletben a tárolási kapacitás 120 %-os értékénél az ütemezési feladat megoldhatóvá vált csúszás nélkül. Az 1. ábrán látható a késő rendelések számának változása a keresési lépések függvényében.

Az 1. ábrán látható, hogy a 128-adik lépésben (iterációban) a keresési algoritmus talál olyan megoldást, amely teljes mértékben csúszásmentes munkavégzést biztosít. A keresés további szakaszában a csúszásoktól független többi célfüggvény értékét próbálja úgy javítani az algoritmus, hogy a késésekkel kapcsolatos első három célfüggvény értéke ne romoljon.

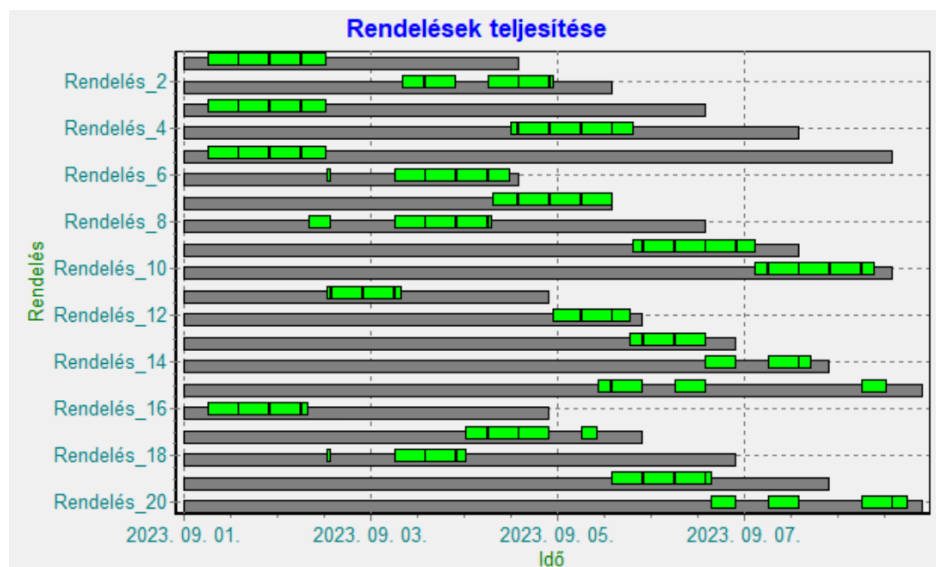


2. ábra: A műveletközi tároló készlet-ido diagramja



3. ábra: Az ütemterv gép-orientált Gantt diagramja

A 2., 3. és 4. ábrán a keresés során megtalált legjobb ütemterv néhány részlete látható. A 2. ábra jeleníti meg a műveletközi tároló készlet szintjének időbeli változását. A 3. ábrán az ütemterv gép-orientált Gantt-diagramja látható. A 4. ábra jeleníti meg az ütemterv rendelés-orientált Gantt-diagramját.



4. ábra: Az ütemterv rendelés-orientált Gantt-diagramja

Az ütemterv szimulációja az előző ütemezett időszak végétől indul. Az alkatrészgyártó gépek korábban elkezdik a sorozatok gyártását, mint ahogyan azok a szerelősorokra felkerülnének. Erre azért van szükség, mert a szerelés ciklusideje sokkal rövidebb, mint az alkatrészgyártás ciklusideje. Emiatt az alkatrészgyártás egyidejű indítással nem tudja kiszolgálni a szerelést. A készlet-idő diagram felfutó első része mutatja, hogy kezdetben az alkatrészgyártás intenzitása nagyobb, mint a szerelés intenzitása. A hétvégén a szerelősorok nem dolgoznak, míg az alkatrészgyártó gépek előre dolgoznak. Ekkor olyan sorozatokat gyártanak, amelyeket a következő hétköznapokon fognak felhasználni a szerelősorok. A 2.

ábrán látható, hogy 2023.09.04-én tetőződik a tároló készletszintje kb. 118 % értéknél. Ennél a futtatásnál a tároló kapacitáskorlátja 120 %-ra volt beállítva. A szerelősorok indulását követően a tároló készletszintje ingadozik. A gép-orientált diagramon látható, hogy míg a két szerelősor (G4, G5) hétköznapokon napi két műszakban dolgozik, addig a négy alkatrészgyártó gép (G1-G4) sok esetben napi három műszakban dolgozik azért, hogy folyamatosan biztosítsa az igényelt alkatrészeket. Ilyenkor a délelőtti és délutáni órákban a készletszint csökken a tárolóban a felhasználás dominanciája miatt, míg éjszaka növekszik a készletszint, mert akkor nem dolgoznak a szerelősorok.

A kísérletsorozat igazolta, hogy a műveletközi tároló kiemelt fontosságú szerepet játszik a gyártási folyamatok összehangolásában. Változatlan feladat esetében, változatlan ütemezési algoritmussal nagyon eltérő eredmények születnek a műveletközi tároló kapacitáskorlátjának függvényében. A műveletközi tároló figyelmen kívül hagyása, vagy nem megfelelő modellezése megvalósíthatatlan ütemtervek generálásához vezethet. A gyakorlat szempontjából fontos, hogy az ütemezési feladatok megoldására készített modellek magukba foglalják az érintett összes erőforrást és azok korlátait.

Az elvégzett tesztek igazolták, hogy a javasolt ütemezési modell és megoldási módszer rugalmasan kezeli a gyakorlati problémákban felmerülő kapacitáskorlátos helyzeteket. A vizsgált alkatrészgyártási és szerelési folyamatok teljesítőképességének fokozására kidolgozott többcélú ütemező rendszerünk a tevékenységek részletes ütemtervének iteratív javításával kvázi-optimális megoldásokat generál figyelembe véve a szigorú korlátfeltételeket és elvárásokat. A konkrét ütemezési problémák megoldásán túlmenően a beépített szimuláció segítségével a megoldhatatlan feladatok időben felismerhetők és lehetővé válik az előkészített szerelési menetrendek áttervezése, annak érdekében, hogy a kapacitáskorlátok mellett is fennakadások nélkül végrehajtható termelési finomprogramok készüljenek.

5. Összefoglalás és következtetések

Ebben a cikkben bemutattunk egy rugalmas gyártórendszert, amelyben az alkatrészgyártási és összeszerelési folyamatok ütemezése, valamint a kapcsolódó műszakok terhelésfüggő tervezése kulcsszerepet játszik. Ezen túlmenően a technológiai berendezések mellett a műveletközi tároló és egyéb logisztikai rendszerelemek korlátai és működési jellemzői szintén meghatározó tényezőként jelennek meg a feladatban. Az integrált ütemezési probléma megoldására egy többcélú optimalizálási modellt dolgoztunk ki.

Az összetett irányítási probléma döntési kérdéseinek megválaszolására egy hatékony többcélú ütemező módszert javasoltunk, amely a tevékenységek részletes ütemtervének iteratív javításával kvázi-optimális megoldásokat szolgáltat. A bemutatott módszer rugalmasan kezeli a gyártási és üzleti környezet változatos szituációit. A módszer a bemeneti adatok alapján az aktuális tervezési időhorizontra automatikusan elkészíti az alkatrészgyártó gépek műszakbeosztását, kiosztja az alkatrészgyártási feladatokat az erőforrásokra és megtervezi az események indítási időpontját. Ezáltal biztosítja az alkatrészgyártási és szerelési folyamatok zavartalan és összehangolt lefutását. Az elvégzett tesztek igazolták, hogy a bemutatott ütemezési modellel hatékonyan kezelhetők a gyakorlati feladatok.

Irodalom

- [1] Allaoui, H., Artiba, A.: Scheduling two-stage hybrid flow shop with availability constraints, *Computers and Operations Research*, Vol. 33, pp. 1399-1419, 2006., <https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.09.034>
- [2] Allahverdi, A., Ng, C. T., Cheng, T. C. E., Kovalyov, M. Y.: A survey of scheduling problems with setup times or costs, *European Journal of Operational Research*, 187, pp. 985-1032, 2008., <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.06.060>
- [3] Brucker, P.: *Scheduling Algorithms*, E5th ed, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007, ISBN 978-3-540-69515-8., <https://doi.org/10.1007/978-3-540-69516-5>
- [4] Gharbi, A., Haouari, M.: Optimal parallel machines scheduling with availability constraints, *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 148, pp. 63-87, 2005., <https://doi.org/10.1016/j.dam.2004.12.003>
- [5] Kaabi, J., Harrath, Y.: E A survey of parallel machine scheduling under availability constraints, *International Journal of Computer and Information Technology*, 3 (2), pp. 238-245, 2014.
- [6] Lei, D.: Multi-objective production scheduling: a survey, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 43, Issue 9-10, pp. 926-938, 2009., <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1770-4>
- [7] Linn, R., Zhang, W.: Hybrid flow shop scheduling: a survey, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 37, No. 1-2, pp. 57-61, 1999., [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(99\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(99)00023-6)
- [8] Ma, Y., Chu, C. B., Zuo, C. R.: A survey of scheduling with deterministic machine availability constraints, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 58, pp. 199-211, 2010., <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.04.014>
- [9] Pinedo, M. L.: *Planning and Scheduling in Manufacturing and Service*, 2nd ed., Springer-Verlag New York, 2009., <https://doi.org/10.2307/40802335>
- [10] Pinedo, M. L.: *Scheduling Theory, Algorithms, and Systems*, 3rd ed., Springer-Verlag New York, 2008., <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78935-4>
- [11] Quadt, D., Kuhn, H.: A taxonomy of flexible flow line scheduling procedures, *European Journal of Operational Research*, Vol. 178, pp. 686-698, 2007., <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.01.042>
- [12] Wang, W.: Flexible flow shop scheduling: optimum, heuristics, and artificial intelligence solutions, *Expert Systems*, Vol. 22, No. 2, pp. 78-85, 2005., <https://doi.org/10.1111/j.1468-0394.2005.00297.x>
- [13] Kulcsár, Gy., Erdélyi, F.: A New Approach to Solve Multi-Objective Scheduling and Rescheduling Tasks, *International Journal of Computational Intelligence Research*, 3 (4), 2007, pp. 343-351., <https://doi.org/10.5019/j.ijcir.2007.115>.
- [14] Kulcsár, Gy.: Ütemezési modell és heurisztikus módszerek az igény szerinti tömeggyártás finomprogramozásának támogatására, Doktori (PhD) értekezés, Miskolci Egyetem, Miskolc-Egyetemváros, 2007.
- [15] Kulcsárné, F. M.: Kiterjesztett modellek és módszerek erőforrás-korlátos termelésütemezési feladatok megoldására, Doktori (PhD) értekezés, Miskolci Egyetem, Miskolc-Egyetemváros, 2017.