Ferenczi Balázs

Műhelyrendszerű termelés logisztikai kiszolgálásának optimalizálása

Doktori értekezés

Témavezetők:

Dr. Lilik Ferenc, Széchenyi István Egyetem

Dr. Németh Péter, Széchenyi István Egyetem

Széchenyi István Egyetem

Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola

Tartalom

1. Bevezetés-motiváció 5

2. A Logisztika fogalma és területei 9

2.1. A logisztika definíciója 9

2.1.1. Termelési logisztika 10

3. Az egyes termelési rendszerek összehasonlítása 11

3.1. Termékelvű rendszer 11

3.2. Gépelvű rendszer 12

3.3. Csoportrendszer 13

4. A Műhelyrendszerű termelés logisztikájának jellegzetességei 15

4.1 Termeléstervezés és irányítás 15

4.2 Raktározás 17

4.2 Szállítás, termelésellátás 18

4.2.1 A műhelyek közötti szállítás 19

4.2.2. Termelés kiszolgálása 19

4.3 A termelés kiszolgálásának jellemzése 19

4.3.1 A készletek és a feladat határidejének összefüggése 19

4.3.2. Az anyagmozgatási feladat végrehajtása 23

4.3.3. Az egyes gépek eltérő gazdasági jelentősége 24

4.3.4. Az anyagmozgatási feladatok felmerülése 24

4.3.5. Az operatív anyagmozgatási feladatok elvégzője 25

4.3.6. A műhelyrendszerű termelés logisztikai kiszolgálásának összefoglalása: 27

4.3.7. Kutatás célja: 27

5. A vizsgált probléma szakirodalmi leírása 28

5.1. Az optimalizáció és az operációkutatás 28

5.1.1. Az operációkutatási folyamat lépései 29

5.1.2 Optimumkeresési módszerek 32

5.2. A műhelyrendszerű termelésben történő anyagmozgatás operatív irányításának szakirodalmi áttekintése. ... 41

5.2.1. Anyagmozgatás irányítása a hagyományos irányítású termelési rendszerekben ... 42

5.2.2. Ipar 4.0 megoldások ... 43

5.3. Következtetések a szakirodalmi elemzéséből ... 50

6. A műhelyrendszerű termelésben történő anyagmozgatás ütemezési problémájának elméleti modellje ... 52

6.1 Modell célja és működési környezete ... 52

6.2. A modell paraméterei ... 54

6.3 A probléma ábrázolása gráffal: ... 55

6.4 A meghozandó döntés ... 57

6.5 A modellben alkalmazandó logikai feltételek: ... 58

7. A műhelyrendszerű termelés logisztikai kiszolgálás optimalizálásnak MILP modellje. ... 59

7.1. A MILP modell ... 59

7.2. Numerikus példa ... 63

7.3 Összefoglalás és gyakorlati alkalmazhatóság ... 67

7.4 Első tézis ... 69

7. Fuzzy szignatúra alapú priorizáció a műhelyrendszerű termelés logisztikájának irányításában. ... 71

7.1. A MILP-el végzett optimalizáció előnyei és hátrányai. ... 71

7.3 A fuzzy szignatúra alapú algoritmus. ... 73

7.4 Numerikus példa logisztikai feladatok fuzzy szignatúra alapú priorizálására. ... 78

7.5 Az algoritmus hatékonyságának elemzése. ... 81

7.6 A fuzzy szignatúra alapú algoritmussal végzett optimalizáció előnyei ... 84

7.7 Második tézis ... 85

8. Üzemi állapot meghatározása ... 87

8.1 A problémát jellemző állapot mérőszám meghatározása. ... 87

8.2 Az egyes módszerek hatékonyságának elemzése az állapot függvényében ... 92

8.3 Harmadik tézis 93

9. Műhelyrendszerű termelés logisztikai feladatainak üzemállapothoz alkalmazkodó priorizációja 95

9.1. Az anyagmozgatási feladatcsoport állapotától függő fuzzy szignatúra 95

9.2 Az alkalmazott súlyok megállapítása (állapotfüggő súlyozás) 98

9.3 Az egyes optimalizációs módszerek hatékonyságának összehasonlítása. 102

9.4 Negyedik tézis 105

10. Összefoglalás 106

Hivatkozások 112

Saját publikációk 119

Mellékletek: 121

1. Bevezetés-motiváció

A műhelyrendszerű, vagy másnéven gépelvű termelési rendszer elsősorban kis és középvállalkozások (KKV) között elterjedt, tradicionális termelésszervezési módszer. A gyártóberendezéseket a technológiájuk szerint csoportosítják műhelyekbe, és a munkadarabokat a technológiai sorrendnek megfelelően szállítják az egyes gyártóberendezések között. Ez a termelési rendszer kis- és középméretű sorozatok rugalmas gyártására egyaránt alkalmas, relatíve alacsony beruházási igénye van, rugalmasan bővíthető, átalakítható, illetve bizonyos technológiák szinte csak ebben a struktúrában működtethetők racionálisan. Másik oldalról szervezésük, irányításuk rendkívül összetett feladat, amit jellemzően helyi szakértők működtetnek. A korszerű információgyűjtésen, feldolgozáson és megosztáson alapuló ipar 4.0 megoldások ebben a termelési rendszerben a termelési rendszer összetettsége, a gépparkok változatossága, és a konzervatív (hely szakértőkön alapuló) irányítási struktúrák miatt nehezebben integrálhatók. Továbbá a KKV-k is nehezebben tudják az ehhez szükséges szakértelmet és forrást biztosítani. Ezért az ilyen rendszerben működő vállalatok esetében jelentős gazdasági potenciált jelenthet a korszerű irányítási módszerek kidolgozása és bevezetése, ugyanakkor ezek illesztése a meglévő struktúrához jelentős kihívást is jelent [Demeter, et-al 2019].

A gépek műhelyekbe csoportosítása miatt az egyes munkadarabok a technológai sorrendnek megfelelően keresik fel az egyes műhelyeket, ezért a szükséges anyagmozgatási teljesítmény igénye nagyobb, szervezése összetettebb feladat, mint más termelési rendszerek esetében [Kumar,Suresh, 2006]. Nem kizárólag a teljesítményigény magasabb, hanem a szállítások, gépkiszolgálások időbeli ütemezése is szorosabb kapcsolatban van a termelési rendszerrel. Az anyagmozgatási tevékenységet jellemzően egy erre specializált szervezeti egység, általában a logisztikai szervezet (a továbbiakban logisztika) látja el. Az ezen szervezethez tartozó dolgozók feladata, hogy a hogy a gépkiszolgálás megfelelő időben történjen meg. Az üzem egyszerre számos különböző terméket gyárthat, akár ugyanazon termelő berendezésen is rövid időn belül váltva egymást. Ennek hatásaként, a logisztikai kiszolgálási tevékenység időablaka, gyakorisága gépenként, de akár termékenként is eltérő lehet. Emiatt gyakorlatilag minden pillanatban egyedi feladatösszetétel áll fenn, aminek a hatékony kezelése is minden esetben egyedi, a helyzethez igazodó döntéseket igényel a kiszolgálást végző logisztikai dolgozóktól. A döntésekhez szükséges információk jellemzően a termelőterületen ismertek, ezért a helyben tartózkodó irányító, esetleg maga a targoncavezető hozza meg ezeket. A döntési helyzetek olyan összetettek és helyzetfüggők is lehetnek, hogy átfogó, minden esetre alkalmazható

végrehajtási utasítás (a továbbiakban munkautasítás) elkészítése csak korlátozottan és csak nagyon általános tartalommal lehetséges, így az anyagmozgató eszközöket kezelőkre kerül minden döntési felelősség. Ezt a helyzetet tovább bonyolíthatja, hogy a kiszámíthatatlan igények miatt az anyagmozgató eszközök terhelése is hektikus. Ennek hatására gyakran állhatnak elő átmeneti kapacitáshiányok, amikor a feladatok a rendelkezésre álló eszközökkel a rendelkezésre álló időben nem oldhatók meg maradéktalanul, tehát bizonyos mértékű gépállás és ezzel együtt termelési veszteség elkerülhetetlen. A cél, hogy ez a többletvárakozási idő a lehető legkisebb káros hatást (azaz veszteséget) okozza a vállalatnak, tehát a logisztikai kiszolgálás a lehető legmagasabb színvonalon valósuljon meg.

Tekintve, hogy a gyártóberendezések jellemzően nem azonos fontossággal, gazdasági súllyal bírnak, egységnyi állásidejük nem azonos mértékű anyagi veszteséggel jár. Az anyagmozgatási feladatok végrehajtási sorrendjének meghatározásakor ezt is figyelembe kell venni, ami tovább növeli a probléma komplexitását.

A hagyományos irányítás keretei között a szükséges döntéseket jellemzően a targonca vezetője, esetleg a műszakvezető hozza meg a rendelkezésre álló információk alapján, ami számos esetben vitatható eredményt ad és jelentős stresszt ró mind a döntést meghozóra, mind a kiszolgálásra várakozóra. Ez a gyakorlatban úgy jelentkezik, hogy a targonca vezetője egyszerre számos feladatot kap, aki a tapasztalata, motiváltsága, illetve egyéb külső tényezők alapján egyszeri sorrendet felállítva végrehajtja azokat, majd ő és a termelési terület is „elszenvedi” a következményeket. Amennyiben a targoncavezető tapasztalt, jelentős helyismerettel rendelkezik, jól ismeri a termelési területet és a logisztikai folyamatokat, nagyobb valószínűséggel hoz jobb döntéseket, de munkájának objektív értékelése még ezzel együtt is nehezen lehetséges, ami az egyik oka lehet a targoncavezetők esetén jelentkező nagyarányú fluktuációnak. Tekintve, hogy a helyismeret megszerzése időigényes, az új dolgozók tapasztalatlansága tovább generálja a fent leírt problémákat.

A logisztikai kiszolgálás egyik jó mérőszáma a kiszolgálás hiányából fakadó termeléskiesés, ami egyes kutatások szerint akár a termelési veszteségek 25%-át is elérheti [Groover, 2002], így a vállalat ezen költségtényezője egyben jó mérőszám a logisztikai szervezet számára is. Az ilyen költségeket az ütemezési szakirodalom büntetésköltségként (az angol nyelvű szakirodalomban penalty) is szokta emlegetni [Smith, et al., 1997]. Az elérhető minimumköltség megközelítése több egyedi végrehajtási idővel, határidővel és büntetésköltséggel rendelkező feladat esetében egy komplex döntés. Ez megfeleltethető a gyártásütemezésben alkalmazott súlyozott késés problémának (Job Shop Scheduling With

Weighted Tardines), ami ismerten NP-nehéz feladat [Hall, Posner, 1991]. Míg a gyártásütemezési feladatokat jellemzően szakképzett, tapasztalt, számítógépes programokat használó szakemberek hozzák meg, a műhely-rendszerű termelésben az üzemi tevékenységet mindennaposan érintő, hasonlóan nehéz döntések, jellemzően alacsony képzettségű, és folyamatos stressznek kitett targoncavezetőkre hárulnak. Ezen dolgozók az adott szituációban nem feltétlenül a lehető legjobb döntést hozzák meg, ami jelentős veszteséget és szükségtelen stresszt okoz a szervezetnek.

Tekintve hogy a vállalatok a kiélezett versenyhelyzet miatt állandó nyomás alatt vannak, a költségek csökkentésének vagy elkerülésének minden lehetősége vizsgálandó.

A humán oldal szempontjából pedig a 21. századi vállalatok sem gazdasági, sem humánpolitikai oldalról nem engedhetik meg maguknak, hogy a dolgozókat eldobható erőforrásként kezelve tartósan stressznek tegyék ki. Ilyen esetben mind a magas fluktuáció, mind a megmaradó dolgozók kiégéséből fakadó hátrányos gazdasági és PR következmények negatívan befolyásolják a vállalatok végső versenyképességét.

Célom a műhelyrendszerű termelés sajátosságainak feltárása, és ezek alapján olyan operatív anyagmozgatási feladatütemező rendszer kialakítása, ami igazodik a sajátos körülményekhez. A rövidtávú, 30–120 percre előre történő feladatütemezés célja, hogy az anyagmozgatási feladatok olyan végrehajtási sorrendjét határozza meg, ami biztosítja, hogy a gyártóberendezések állásából fakadó veszteség a lehető legkisebb legyen. Fontos, hogy a rendszer objektív adatok alapján, a vállalati célt leginkább megvalósító módon működjön. Tekintve, hogy az ember által hozott komplex döntések ritkán következetesek, egy ilyen rendszer egyik leghasznosabb tulajdonságának azt látom, hogy az általa meghozott döntések az emberi tényező káros hatásaitól mentesek. Célravezetőnek látom, ha az infromációk gyűjtését és az összetett problémák megoldását az ipar 4.0 jegyében számítógép végzi el, az ember pedig csak ott avatkozik be, ahol kreativitásra, rugalmasságra van szükség.

Értekezésemben a műhelyrendszerű termelés logisztikai kiszolgálásában használható újszerű eljárások alkalmazására teszek javaslatot. Mivel a műhelyrendszerű termelést végző ipari vállaltok esetében az önjáró anyagmozgató eszközök (automated guided vehicle, AGV) teljeskörű alkalmazásának gyakolrati lehetősége korlátozott, azok használatának vizsgálata nem célom. Javaslataimban az ember, mint az anyagmozgató eszköz kezelője továbbra is szerves része a folyamatnak, a feladatütemező rendszer pedig támogatja őt a munkája során és leveszi a válláról a komplex döntések felelősségét. Kutatásom során fontosnak tartottam, hogy a javaslataim a gyakorlati életben, elsősorban a kis és középvállalati szektorban

megvalósíthatók legyenek és ezzel növelhető legyen az azokat alkalmazó vállalatok versenyképessége.

2. A Logisztika fogalma és területei

2.1. A logisztika definíciója

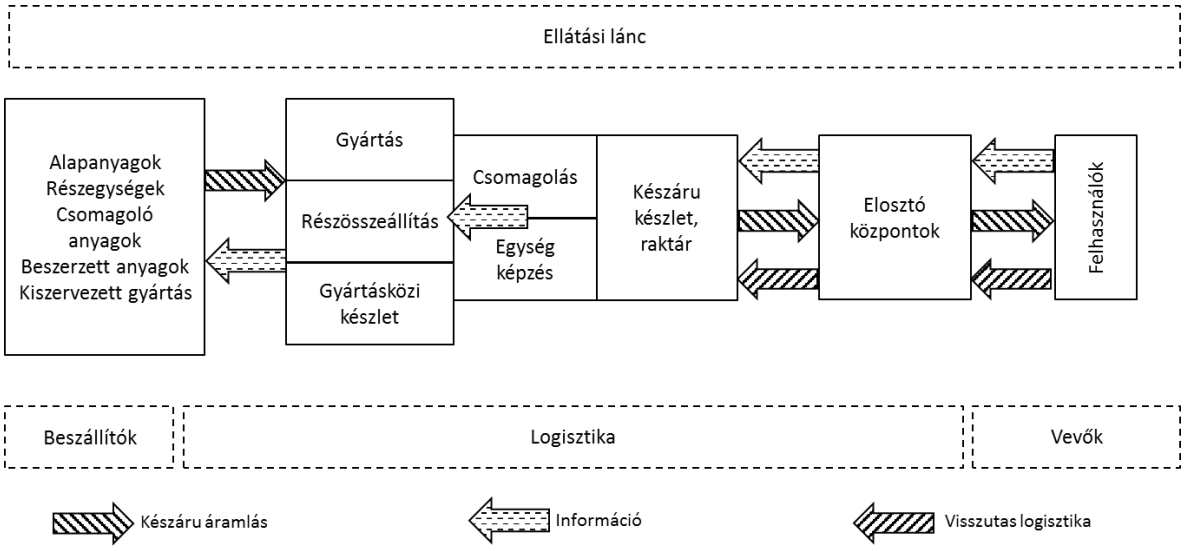
„A logisztika az ellátási lánc részeként a nyersanyagok, félkész termékek ,késztermékek, hulladékok és a hozzájuk kapcsolódó információk – hatékony áramlásának tervezését, megvalósítását és ellenőrzését szolgáló tevékenységek integrációja a vevői elvárásoknak megfelelően.”[Taylor 2008]

Taylor definícója alapján a logisztika az anyagáramlás megvalósítása, ugyanakkor a szerző is elismeri, hogy nehezen választható el a többi ellátási lánc többi funkciójától, úgymint a beszerzés, készlettervezés, termeléstervezés és ütemezés, csomagolás, szett összeállítás, illetve a vevői kapcsolattartás.

Egy másik meghatározás szerint a modern logisztika:

„Az az egyetlen logika, amely irányítja a fizikai elosztás, a gyártási támogatás és a beszerzési műveletek pénzügyi és emberi erőforrásainak tervezési, elosztási és ellenőrzési folyamatát” [Bowersox, et al, 1986]

Az 1. ábra napi fogyasztási cikke (FMCG) logisztikájának vázlatát ábrázolja.



1. ábra. Az ellátás-termelés-elosztás kapcsolatrendszere. (Saját szerkesztés [Rushton et al, 2017] alapján)

Látható, hogy nehéz a logisztika fogalmát, pontos határait megfogalmazni, de talán úgy határozható meg, hogy míg a gyártás a termék fizikai átalakításával teremt értéket, a logisztika a termékek hely- és időértékét előállító tevékenység. Így gyakorlatilag minden olyan tevékenység logisztikához kapcsolódónak tekinthető, ami hozzájárul, hogy a termék fizikai átalakítása megtörténhessen és a felhasználó rendelkezésére álljon.

A logisztika, mint funkció, számos, ha nem az összes vállalati funkcióval szorosabb, vagy lazább kapcsolatban van, és ezekkel kölcsönösen hatnak egymásra. Ezek a termékelőállítási folyamatban betöltött szerepük alapján felosztva a következők lehetnek:

- Ellátási logisztika
- Termelési logisztika
- Elosztási logisztika

Kutatásom szempontjából a termelési logisztika kap hangsúlyt.

2.1.1. Termelési logisztika

A termelési logisztika az ellátási és az elosztási logisztika között helyezkedik el, másképpen a termelő üzem „belső vagy másnéven intra" logisztikáját jelenti. Míg a raktározás, az anyagmozgatás, és az ezekkel összefüggő adminisztratív funkciók, illetve a termékek fizikai transzformáció nélküli kezelése (például csomagolása, szettképzés) egyértelműen hozzárendelhető a termelési logisztikához, a termelésirányítást számos esetben már külön területként kezelik. Ez feltehetőleg amiatt van, hogy rendkívül széles ismeretanyag tartozik hozzá, beleértve a gyártási rendszerek tervezését, létrehozását, az időalap- és kapacitásszámítás módjait, de legfőképpen az optimalizációs eljárásokat alkalmazó hosszú-, közép- és rövidtávú termeléstervezési módszereket és az ezekből származtatott anyagigény információkat [Kumar,Suresh, 2006].

Az anyagmozgatás és a raktározási tevékenység operatív irányításának fő feladata a fizikai anyagáramlás és a hozzá kötődő nyilvántartási feladatok megvalósítása. A raktározási tevékenység során a beérkező alapanyagok átvétele, tárolása, nyilvántartása majd a termelési tevékenységhez történő előkészítése történik meg.

Az anyagmozgatás és raktározás egyik legfontosabb eredménye a megvalósuló fizikai helyváltoztatás mellett a hely- és státuszváltozás vállalatirányítási rendszerben történő dokumentálása. Tekintve, hogy a vállalatirányítási rendszer készlet- és tranzakcióadatait számtalan egyéb terület használja, azok pontossága és valósidejűsége kiemelt fontosságú. Az ipari gyakorlatban ennek számtalan eszközét alkalmazzák a kézi adatrögzítéstől kezdve a vonalkódos vagy RFID-t használó rendszerekig, de akár már a korszerű képfelismerésen alapuló technológiák is ide sorolhatók [Li, et al 2010]. A termelési rendszer meghatározza a hozzá kapcsolódó logisztikai folyamatokat, a logisztikai rendszert tehát a termelési rendszerhez szükséges illeszteni annak érdekében, hogy annak tevékenységét minél hatékonyabban támogassa.

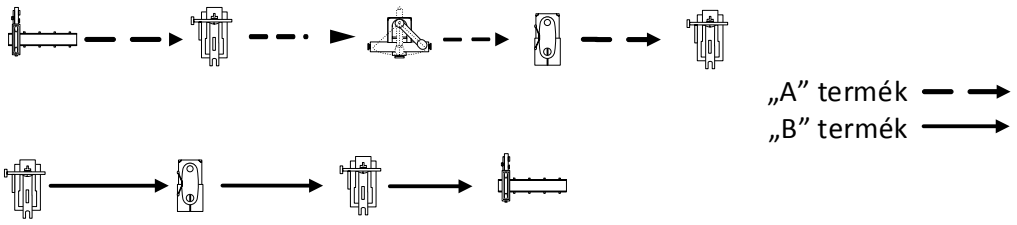
3. Az egyes termelési rendszerek összehasonlítása

A különböző gyártási rendszereket elsősorban a gyártási hatékonyság igénye, az elvárt rugalmasság és a gyártási techonlógiák sajátosságai indokolják. A szakirodalom alapvetően két nagy típust, a termékelvű és a gépelvű (műhely rendszerű) rendszereket különbözteti meg, de a gyakorlatban egy vállalaton belül ennek a két rendszernek a kombinációi is gyakran előfordulnak [Kumar, Suresh, 2006], [Russel Taylor, 2009].

3.1. Termékelvű rendszer

Termékelvű rendszerről beszélünk, amikor a gyártási rendszert a termék előállítását célzó technológia alkalmazási sorrendjének megfelelően telepítik és a termék ennek megfelelően a legrövidebb útvonalon, folyamatosan halad az egyes berendezések között, melyeket gyakran a termelési rendszerbe integrált szállító berendezés (pl. szalag) köt össze. Ez akkor lehetséges, ha a gyártott termékek tömegszerűek, egymástól egyáltalán nem, vagy csak kismértékben különböznek és az egyes gyártó egységek műveletei kiegyenlítettek, tehát nem keletkeznek készletek az egyes műveletek között. Tipikusan ide tartoznak az összeszerelősorok vagy a nagykapacitású, célgépekből felállított, magasan automatizált gyártórendszerek, illetve a folyamatüzem berendezései. Tekintve, hogy telepítési költségük magas, és a későbbiekben a tervezéskor alapul vett terméktől nehéz nagymértékben eltérni, az ilyen rendszerek meglehetősen rugalmatlanok és a beruházáis igényük is jelentős.

A specializáltan és tervszerűen összerakott termékelvű termelési rendszer előnye viszont, hogy rendkívül hatékony termelést tesz lehetővé, alacsonyabb készletszinttel és áttekinthető, kontrollálható anyagáramlással., Ezt a kiegyenlített, folyamatos anyagáramlás teszi lehetővé, amivel jól előrejelezhető alapanyag felhasználás és kibocsájtás, erre alapul az autóiparban elterjedt húzó elvű (pull) ellátás is. A termékelvű termelés elrendezési vázlatát a 2. ábra mutatja be.



2. ábra. Termékelvű elhelyezés sematikus ábrája. A különböző gyártóberendezések technológia szerinti sorrendben kerülnek elhelyezésre. (Saját szerkesztés)

3.2. Gépelvű rendszer

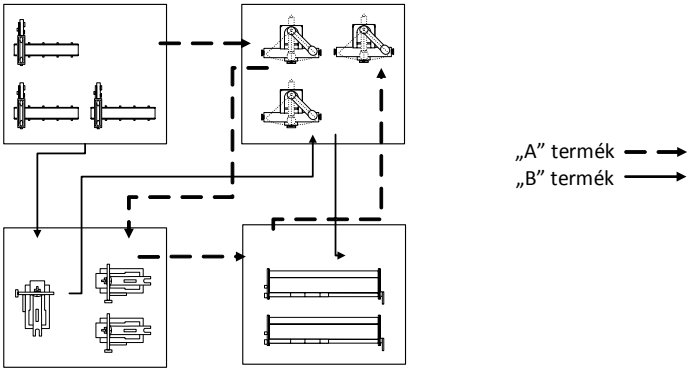
A gépelvű gyártási rendszer esetében a gépeket a technológiának megfelelő csoportokban helyezik el és a munkadarabokat a termékelőállítási folyamat lépései szerint szállítják az egyes berendezések között, tehát a gépek jelentik a csoportosítás alapját. Amennyiben több azonos funkciójú gépet együtt, műhelyekben helyeznek el, beszélhetünk műhely rendszerű termelésről. Emiatt az egyes techológiákhoz kötődő szaktudás koncentrálódik az egyes műhelyekben, és a termelés közvetlen irányítása is általában magában az üzemben valósul meg a helyi vezető és az üzemben dolgozó szakértők által, akik sok esetben maguk tervezik meg a gyártás lépéseit az előállítandó termék műszaki rajza és tervei alapján. Ez a rendszer rendkívül rugalmasan tud reagálni a műhely termelési technológiájához és a gépparkhoz igazodó vevői igényekre.

A szállítás jellemzően univerzális szállítóeszközökkel, például villástargoncákkal valósul meg, így a gyár vagy üzem létrehozási költségei alacsonyabbak, mintha speciális szállító pályát is kellene telepíteni. A telepítés is rugalmasabb, mert a gyártóberendezéseket gyakorlatilag bárhova lehet telepíteni, viszont a megközelíthetőséget biztosító utak fenntartása miatt a fajlagos helykihasználás rosszabb lehet.

Hátránya ennek a termelési rendszernek, hogy az eltérő kapacitású és működési jellegű berendezések miatt jelentős készletek alakulnak ki a rendszerben, ezek áttekintése és követése sokszor bonyolult, a tevékenység ütemezése pedig nagymértékben összetett, szakértői tapasztalatot igényel.

Gépelvű elhelyezést abban az esetben választandó, ha az egyszeri gyártási sorozatnagyság nem túl magas, és/vagy a lehetséges termékelőállítási sorrend-variációk száma magas, tehát nem lehet előre optimális gépelrendezési sorrendet meghatározni. Természetesen még magas termékvariancia esetén is van egy általános termékelőállítási sorrend (például, vágás, marás, szerelés, festés), ami figyelembe veendő. A műhelyeket általában az anyagmozgatás minimalizálása érdekében ennek megfelelően helyezik el a telephelyen, bár ez változatos termékmix esetében összetett döntési folyamat is lehet. [Ojaghi, Y et al., 2016], [Kovács, Kot, 2017]. A műhelyrendszerű termelés rendszer sokszor fellehető kis és közép válllatoknál, mert

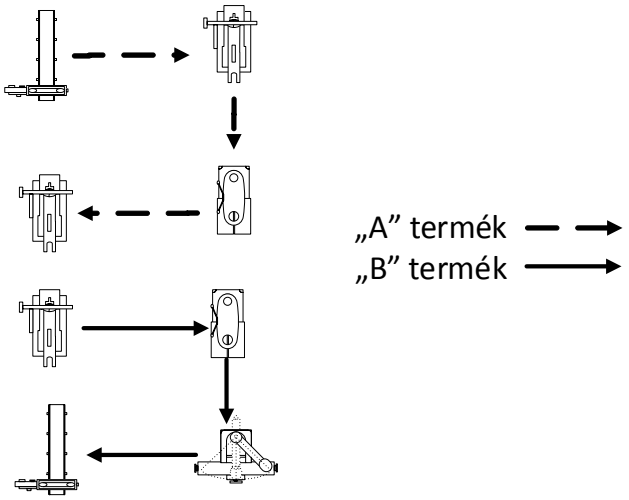
jobban lehetővé teszi az igényeknek megfelelő folyamatos adaptálődást. A gépelvű termelés elrendezési vázlatát az 3. ábra mutatja be.



3. ábra. Gépelvű (műhelyrendszerű) gyártáselrendezés: a különböző gyártóberendezések műhelyekbe csoportosítva kerülnek elhelyezésre, és a munkadarabok a technológiai sorrendben mozognak. (Saját szerkesztés)

3.3. Csoportrendszer

A csoportrendszerű termelés a termékelvű és a gépelvű módszer keverékének tekinthető. Ebben a rendszerben a gyártóberendezések azonos gyártási technológiát igénylő termékcsoportok szerint kerülnek csoportosításra. Az egyes gépcsoportok az összes, előállításához szükséges berendezést tartalmazzák, ezek kapacitása tervezetten összehangolásra kerül annak érdekében, hogy a cellán belül ne keletkezzenek gyártásközi készletek. A termeléstervezése és kontrollja az egyes csoportok szintjén ugyan úgy történik, mint termékelvű gyártás esetén, de az egyes csoportok egymástól függetlenül működnek. A csoportos termelés elrendezési vázlatát az 4. ábra mutatja be.



4. ábra. A csoportos termelési rendszer vázlata. (Saját szerkesztés)

Dolgozatomban a műhelyrendszerű termelés keretei között végrehajtandó operatív anyagmozgatás optimalizálási lehetőségeit vizsgálom, de a benne szereplő megállapítások sok esetben alkalmazhatók a csoportrendszerre is, mert ott is fennáll, hogy az egyes csoportok önállóan működnek, ezért az alapanyag ellátás szempontjából ugyan azok a problémák érvényesek lehetnek rájuk is, mint az egymástól függetlenül dolgozó gépekre.

A logisztikai kiszolgálás szempontjából legfőbb különbség a termékelvű és a gépelvű rendszer között, hogy míg az elsőnek a működése jól előrejelezhető, tervezhető, a második esetében az egymástól függetlenül működő termelő berendezések gyakorlatilag folyamatosan egyedi anygamozgatási feladatstruktúrát eredményeznek.

4. A Műhelyrendszerű termelés logisztikájának jellegzetességei

A vállalti termelési logisztikai funciókat jellemzően három kategóriába lehet sorolni: termeléstervezés, raktározás, anyagmozgatás. A következőkben áttekintem ezek jellegzetességeit a műhelyrendszerű termelés körülményei között, tekintve, hogy az anyagmozgatás minden logisztikai folyamat hatásaiban érintett. Az általam leírt állapot a hagyományos, ipar 4.0 előtti struktúrát mutatja be, tehát azt, amivel a jelenleg a KKV szektorban működő vállalatok nagyrésze még mindig kénytelen együtt élni. Az ipar 4.0 megoldások logisztikára gyakorolt hatásáról az Irodalomkutatás fejezetben írok.

4.1 Termeléstervezés és irányítás

A termékelvű gyártórendszer esetében a gyártósor egyenletes haladási sebessége megbízható támpontja az ütemezésnek. Erre alapozva ismert a késztermék elkészülésének üteme, ebből és a beépülés mennyiségéből meghatározható az alapanyagigény. A gyártósor melletti készletek tudatosan tervezhetők, azok fogyási üteme jól előre jelezhető, ezáltal a teljes logisztika menetrendszerűen szervezhető. A gyártósor tehát egy termékfajta hatékony, kiszámítható, de korlátozott rugalmasságú termelését biztosítja.

A műhelyrendszerű termelés ezzel szemben a technológiai korlátok között maradva rugalmas működést tesz lehetővé, változatos termékportfolióval, kis és nagy sorozatokkal, a vevői igények változásaira való gyors reagálás lehetőségével. Ugyanakkor gazdaságos ütemezése és irányítása az ipar 4.0 koncepció teljes megvalósulásáig (és valószínűleg utána is) az iparág egyik legnagyobb kihívása lesz, melynek oka a rendszer és az összefüggések összetettsége, a lehetséges megoládsok nagy száma [Ripson, et al, 2007], [Méndez et al, 2006].

A stratégiai szintű üzleti tervezést nem számítva a termeléstervezés jellemzően kettő szinten valósul meg: a vevői igények befogadhatóságát vizsgáló taktika szinten, 12-52 hétre előre és a megvalósítást biztosító operatív szinten 1-20 nap időtávon.

A taktikai szintű tervezés során (melyet jellemzően a vevői igények kezelésért felelős szervezet, általában a logisztika végez), a tervezett forgalomból a technológiai normákat figyelembe véve számolható az egyes gépek terhelése. Az erőforrások terhelési igényét általában munkaórára vagy műszakra összesítve (aggregálva) érdemes kimutatni, amiket a rendelkezésre álló időalapokkal összevetve megmutatja a kihasználatlan vagy túlterhelt erőforrásokat. Goldratt szűk keresztmetszetek elmélete alapján (Theory OF Constraints, TOC) a korlátozó tényezők azonosítása kiemelt fontosságú, ami az erőforrásterhelés ismeretében könnyen elvégezhető, de kimutathatók a ki nem használt kapacitások is [Goldratt, 1990]. A szűk keresztmetszetek

megadják a rendszer átbocsátóképességét, tehát az elvállalható feladatok listáját és a vevői igények visszaigazolhatóságát. Ezen tevékenység során az anyagmozgatási kapacitás

igény is meghatározható, jellemezhető [Munisamy, 2010].

A taktikai szinttel ellentétben az operatív szint tervezése során a valóságot sokkal részletesebben szükséges modellezni.

A termékelőállítási folyamatot műveleti lépésekből áll, melyeket gépekhez rendelnek. Előfordulhat, hogy egy gyártási műveletet több gyártóberendezésen is el lehet végezni, de nem azonos hatékonysággal, ez időnyomás esetén komoly dilemma elé állíthatja a gyártás szervezőit, mely gépeken mely műveletek kerüljenek elvégzésre, [Yalaoui, Chu, 2002].

A gyártási folyamat egyes lépéseinek kötött sorrendben kell követniük egymást, bár egyes lépések sorrendje akár fel is cserélhető. Emiatt a lehetséges végrehajtási sorrendek száma megnő, melyek ugyan rugalmassági lehetőséget jelentenek, de másik oldalon tovább növelik a probléma összetettségét.

Az egyes gépeken a különböző termékek között általában átállási időszükséglet van, ami a befejező- és a kezdőtermék kombinációnként eltérő is lehet. Az átállási idő alatti termeléskiesés veszteséget jelent a vállalat számára, ami a gyártásindítás fix költségeként jelentkezik, tehát kiszámítható egy minimális gazdaságos sorozatnagyság (economic production quantity, EPQ), ami viszont befolyásolja (általában rontja) a termelés rugalmasságát, ennek tudományos meghatározása a tömeggyártás egyik jelentős kérdése [Harris, 1913]. Ugyanakkor az üzemben egyszerre számos gyártási rendelés is lehet, eltérő fontosságokkal és befejezési határidőkkel, ami arra késztetheti a gyártás szervezőit, hogy a gazdaságos sorozatnagyságot feláldozva nagyobb rugalmasságot érjenek el, vagy éppen fordítva, a mutatószámok célértékének megvalósulása érdekében feláldozzák a határidőket.

További probléma, hogy bizonyos megrendelések kielégítéséhez szükséges alapanyag csak meghatározott időben, vagy bizonytalanul áll rendelkezésre (például mert egy másik műhely fogja átadni). Az ütemezés során ezt is figyelembe kell venni.

A megmunkáló berendezések váratlan meghibásodásai tovább bonyolítják az egyes műhelyek ütemezőinek feladatait.

Az egyes dolgozók kompetenciái szintén fontos komponense a gyártási finomprogram tervezésének és megvalósulásának. Lehetnek berendezések, termékek, technológiák, amiket

nem tud mindegyik dolgozó kezelni, így az ő rendelkezésre állásuk fontos paramétere a gyártási finomprogramnak, nem beszélve a nem tervezett távollétek kezeléséről.

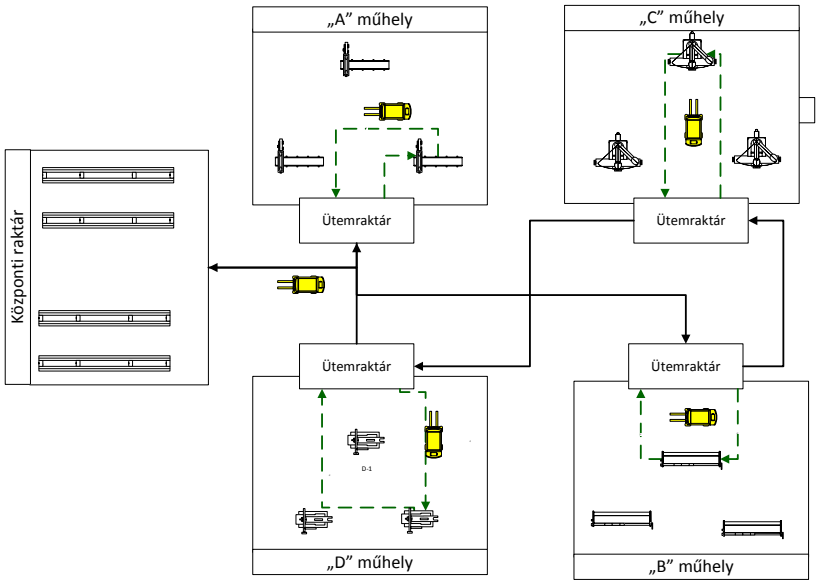
A készletek kezelése, raktározása ugyan nem tartozik az ütemezés feladatai közé, viszont minden ütemezési tevékenység támaszkodik a készlet információkra. A termelés felkövetése, a készletek mozgatásának adminisztrációja ezért fontos feladat, amennyiben ennek információ nem valósidőben vagy hibásan állnak rendelkezésre, a termeléstervezés bizonytalansági faktora, illetve időigénye jelentősen megnő.

Ezekből következik, hogy a műhelyrendszerű termelés tervezése és irányítása nagyban támaszkodik a műhely mindennapjaival teljes mértékben tisztában lévő szakértők hely, termék és folyamat ismeretére, ezért az operatív termeléstervezést is jellemzően ők végzik. Emiatt az egyes műhelyek általában önálló vezetésű egységként jelennek meg, beszállítói és vevő is egymásnak, illetve a központi raktárnak. Az operatív szintet ezért a pillanatnyi állapotnak megfelelő helyi döntések jellemzik, ahol az anyagmozgatás kulcsfontosságú a megvalósítás szempontjából.

4.2 Raktározás

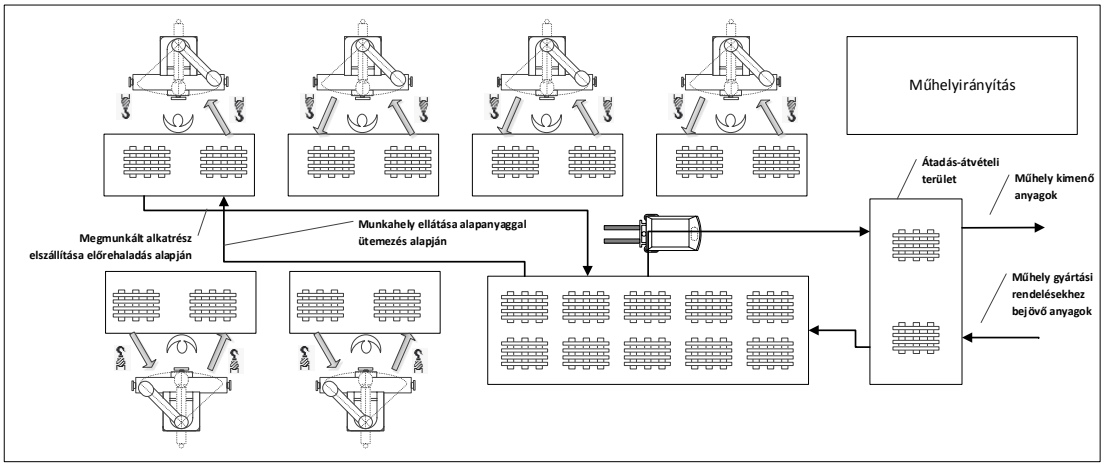
A raktározás szerepe az anyagok keletkezési és felhasználási ütemkülönbségének kiegyenlítése.

A beszállítóktól érkező alapanyagok a legritkább esetben kerülnek azonnal felhasználásra és az elkészült késztermékeket sem lehet azonnal a vevőnek továbbítani, így a központi alapanyag és késztermék raktárak minden vállalatnál megtalálhatók. A műhelyrendszerű termelés jellegzetessége, hogy az önálló termelési egységként működő műhelyek eltérő ütemben gyártják és használják fel a munkadarabokat, így jelentős a gyártásközi készlet mértéke. Ezek jellemzően az egyes műhelyek saját ütemraktárában kerülnek elhelyezésre ahonnan a gyártó berendezések ellátása történik, és ahol a késztermékek továbbadás előtti elszámolása is megvalósul. Emiatt kettős raktárrendszer alakulhat ki, központi raktárral és műhelyekhez tartozó ütemraktárakkal. Az 5 és 6. ábrán ilyen struktúra látható.



5. ábra Üzem anyagmozgatási rendszerének vázlata központi raktárral és műhelyenkénti ütemraktárakkal

(Saját szerkesztés)



6.ábra. Egy önálló műhely elrendezési vázlata, tároló területtel és átadás-átvételi területtel

(Saját szerkesztés)

4.2 Szállítás, termelésellátás

A műhelyrendszerű termelés esetén az anyagmozgatás a rugalmassági igényekhez igazodva jellemzően univerzális anyagmozgató eszközökkel valósul meg, melyek kialakítása igazodik az üzem által előállított termékek méreteihez és az egységrakatok tömegéhez. Az anyagmozgatás szempontjából két jellemző feladat csoport határozható meg, a műhelyek közötti szállítás és a termelési tevékenység kiszolgálása.

4.2.1 A műhelyek közötti szállítás

Az egyes műhelyek álltalában önálló egységként működnek, így saját ütemraktárral is rendelkeznek, melyek a készletelszámolás és könyvelés helyeként is funkcionálnak, így az ütemraktár tölti be a műhely be és kilépési pontját. Ezért a műhelyek közötti szállítás az ütemraktárak között, vagy a központi raktár között valósul meg, A logisztikai rendszer egyik feladata, hogy az üzemek közötti gazdaságos szállítást biztosítsa. Az ütemraktárak adta rugalmasság lehetővé teszi menetrendszerű, tervezett működést, ezért nagyobb egységek szállítása is lehetővé válik, például targonca helyett tehergépkocsival, vagy több tároló egység egyidejű szállítását lehetővé tevő vontatóval. Az üzemek közötti szállítási feladatokat a dolgozat további részében nem vizsgálom, feltételezem, hogy az ehhez szükséges kapacitás rendelkezésre áll és ez a tevékenység nem befolyásolja a termelés kiszolgálását.

4.2.2. Termelés kiszolgálása

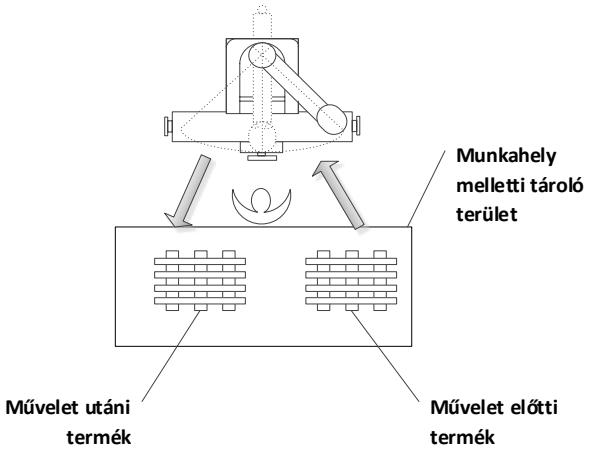
A termelés kiszolgálását elsősorban a munkahelyek alapanyaggal történő ellátását és a késztermék elszállítását jelenti, amik műhely ütemraktára és a gyártóberendezés között valósulnak meg. Ez a tevékenység alapvető fontosságú a termelés működése szempontjából, szolgáltatás, ahol a vevő a termelés, a cél a termelés működésének biztosítása, kiszolgálása, Az anyagmozgatást végzők szolgáltatási színvonalának legfőbb mérőszáma, hogy a termelés milyen mértékben képes megvalósítani a (nehezen) meghatározott tervet. A termelés kiszolgálás jellemzően a műhelyen belül, az ütemraktár és a gyártó berendezések között valósul meg, így a mozgatási távolságok nem jelentősek, ezért a legfőbb cél nem a gazdaságos szállítás, hanem a kiszolgálási színvonal.

4.3 A termelés kiszolgálásának jellemzése

4.3.1 A készletek és a feladat határidejének összefüggése

A termelés kiszolgálás megvalósulásának helye a gyártó berendezés melletti tárolóhely, ahova a munkadarabokat tartalmazó szállító egységet elhelyezve lehetővé válik az egyes munkadarabok mozgatása, vagy ahova a megmunkált munkadarabot elhelyezik, amikor kiveszik a berendezésből.

A gyártóberendezés és a munkahely melletti tárolóterület kapcsolatának vázlatát mutatja a 7 ábra. A dolgozó a szállító egységből (láda, raklap) kiveszi a munkadarabot, behelyezi a gyártó berendezésbe, a készterméket pedig egy másik ládába helyezi el.



7. ábra. Egy munkahely elrendezési vázlata a munkahely melletti tároló területtel. A tároló területen egy alapanyagot és egy készárut tartalmazó rakat található, így ez az elrendezési rendszer erősen kitett a logisztikai kiszolgálásnak. (Saját szerkesztés)

Hasonló, de korszerűbb kialakítás látható a 8. ábrán, ahol robot helyezi a gyártó berendezésbe a munkadarabot. Ezesetben különösen kritikus, hogy a munkadarabok olyan szabványosított egységtárolón legyenek elhelyezve, ami biztosítja, hogy a robot megfelelő pozícióban tudja megfogni őket.

8. ábra. Robot kiszolgálású gyártóberendezés. Az ábrán jól elkülöníthető a művelet előtti és a művelet utáni készlet. Belátható, hogyha ezek a tárolók kifogynak vagy megtelnek, a gyártóberendezés nem tud tovább működni, amíg a tárolók cseréje meg nem történik. Mivel egy-egy rakat található a robot által elérhető területen, erre ez esetben egy gyártási ciklusidő áll rendelkezésre. (forrás https://agilerobotics.com/)

A munkahely melletti tároló terület különös jelentőséggel bír:

- Itt kapcsolódik össze az anyagmozgatási és a gyártási tevékenység, realizálóik a logisztika által létrehozott hely és idő érték.
- A gépeken felhasználásra kerülő vagy elkészült tételek gyűjtőhelyei, így ezeken a pontokon biztosan a teljes (adott gépet érintő) anyagáram keresztülhalad.
- A gyártóberendezés csak ezeken keresztül kap munkadarabot és az elkészült munkadarab is csak ezeken keresztül hagyja el a munkahelyet
- Az anyagmozgatás egysége általában itt vált a diszkrét munkadarab és a rakategység között, tehát itt történik meg a belső csomagolás, vagy rakatba helyezés.
- A töltésük a gyártási program és az előrehaladás alapján történik, emiatt az ott jelentkező bizonytalanságok erre a tevékenységre is hatással vannak.
- A méretük korlátozott (extrém esetben egyetlen rakat), így a munkadarabok huzamosabb ideig és nagyobb mennyiségben ott nem tárolhatók. A tároló kiürülése vagy megtelése esetén a gyártóberendezés nem tud tovább üzemelni.

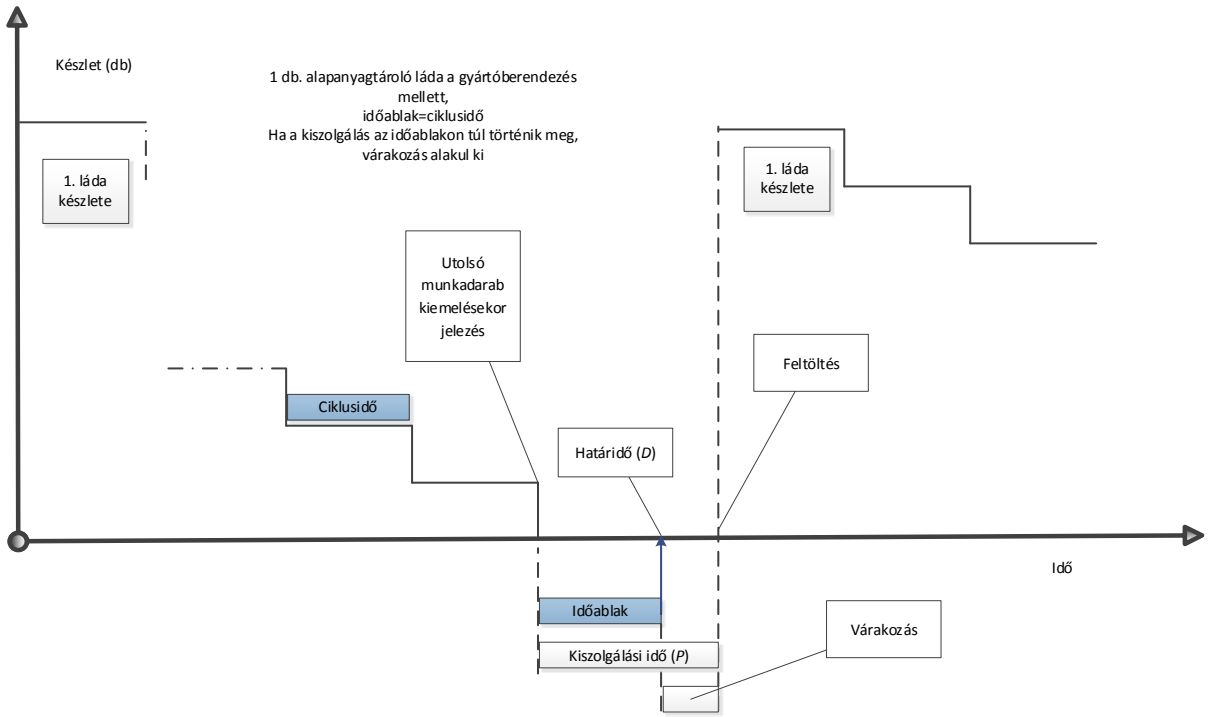
Ezekből következik, hogy a műhelyrendszerű gyártás anyagmozgatásának és kiszolgálásnak a gépek melletti tárolóterületek kulcsfontosságú pontjai. A gépek melletti tárolóterületek teszik lehetővé a kiszolgálás és a gyártás ütemkülönbségeinek kiegyenlítését, ugyanakkor a munkahely melletti tárolóterület jellemzően alacsony tárolókapacitással bír. Ennek két oka lehet:

- A gyártócsarnok mérete korlátozott. Gazdaságosabb ott gépeket elhelyezni, mint anyagot tárolni, ezért a műhelyrendszerű termelés sokszor meglehetősen zsúfolt képet mutat, ahol korlátozottan helyezhetők el készletek a gépek közvetlen közelében.
- A munkadarabok gépbe és gépből történő mozgatása bizonyos esetekben daruval történik. Egy géphez telepített daru hatósugara korlátozott, ezért a munkadarabok kizárólag a daru által elérhető területen belül helyezhetők el, de ugyanez a probléma akkor is, ha robot szolgálja ki a berendezést (lásd: 8. ábra).

A munkahely melletti tárolóhelyen található készletek alakulásának részletes vizsgálata rávilágít a kiszolgálás speciális jellemzőire.

A termelés igénye, hogy a gyártó berendezést működtető dolgozó számára a művelet befejezését követően mindig álljon rendelkezésre alapanyag. Amikor a dolgozó kiveszi az utolsó munkadarabot a ládából, szükséges az üres láda telire cserélése. Az üres láda elszállítása azután kezdhető meg, hogy az utolsó munkadarabot kiemelték belőle, és addig kell a cserét végrehajtani, amíg a gyártóberendezés az adott munkadarabon dolgozik, tehát egy ciklusidőn

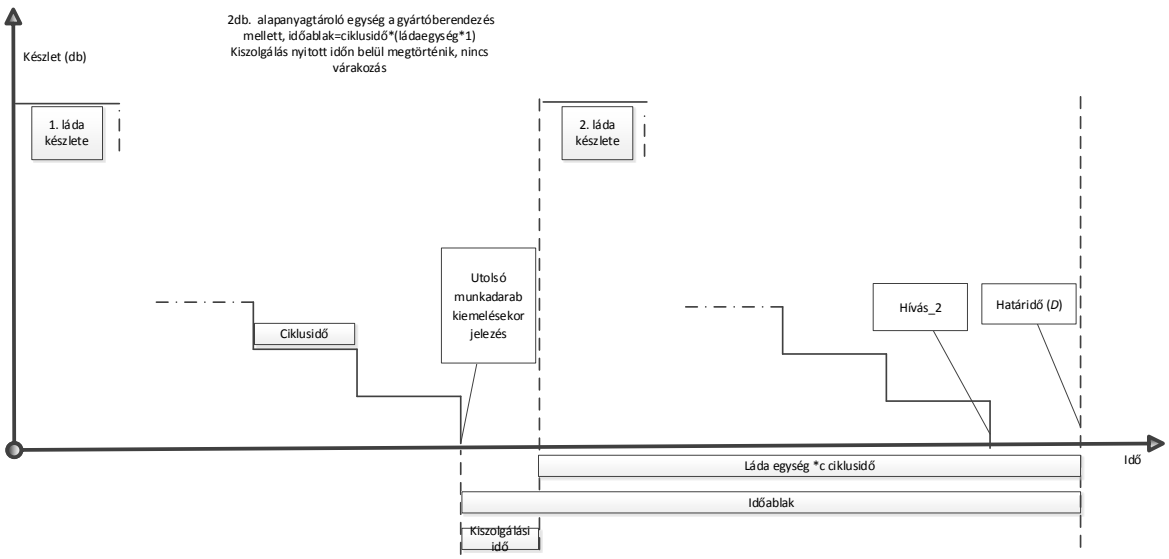
belül (amennyiben csak egyetlen láda elhelyezésére van lehetőség). Amennyiben ezen az időablakon belül nem valósul meg a csere, a gyártóberendezést nem lehet tovább alapanyaggal ellátni és emiatt megáll, ami az elveszett kapacitás miatt gazdasági veszteséggel jár. Fordítottan, de ugyan ez a jelenség valósul meg a késztermékeket tartalmazó láda esetében: az utolsó férőhelyre helyezett munkadarab belehelyezése után egyetlen ciklusidőn belül meg kell valósítani az üres ládára való cserét, különben az elkészült munkadarabot nem lehet hova elhelyezni. A munkahely melletti tároló területen található készlet és a kiszolgálási időablak összefüggései a 9. ábrán láthatók.



9. ábra. A munkahely melletti tárolóterület készletének alakulása egy tárolórakat esetében. A kiszolgálás akkor kezdhető meg, amikor az utolsó munkadarabot felvették a rakatról és egyetlen termelési ciklusidőn belül el kell végezni annak érdekében, hogy a várakozás elkerülhető legyen. Amennyiben a kiszolgálás időszükséglete magasabb, mint a határidő (P>D), a különbség a várakozási idő. (Saját szerkesztés)

Az ábrán látható, hogy az idő előrehaladtával az alapanyagot tartalmazó tároló készlete a termelési ciklusidő szerint fogy el. Amennyiben az utolsó munkadarab is kiemelésre került, a csere elvégezhető. A cserét a termelés folyamatosságának biztosítása érdekében addig kell elvégezni, amíg a következő munkadarabot nem kívánják kiemelni a ládából. Ha az anyagmozgatás addig nem teljesül, akkor a gyártóberendezés várakozásra kényszerül.

A 10. ábra azt mutatja, hogy hogyan változik az időablak, vagyis a határidő, ha a gép melletti tároló területen két láda elhelyezése is lehetséges.



10. ábra. A munkahely melletti tárolóterület készletének alakulása két tárolórakat esetében. A kiszolgálás akkor kezdhető meg, amikor az utolsó munkadarabot felvették az egyik rakatról, és a második rakat kiürüléséig van idő a csere elvégzésére. (Saját szerkesztés)

Az határidőt ebben az esetben az (1) egyenlet írja le.

$$D = T_c(1 + Q_l), \tag{1}$$

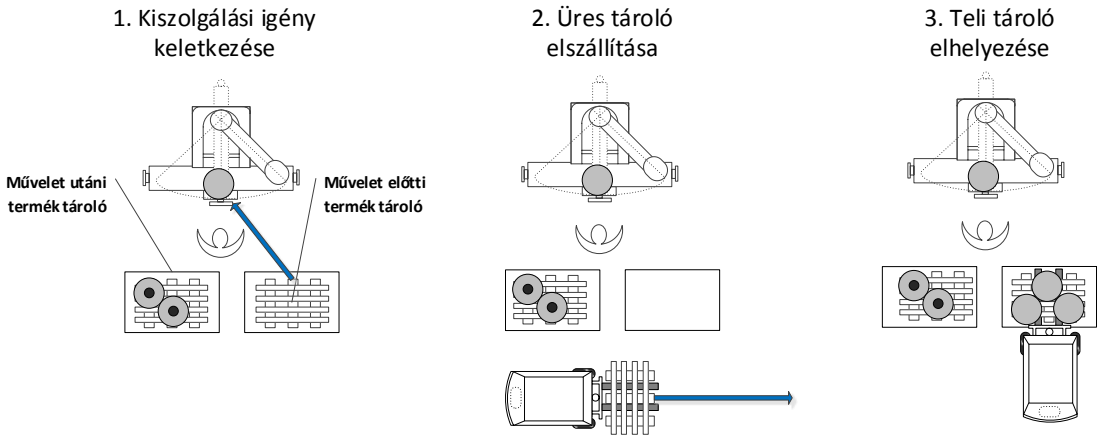
ahol, D a határidő, T_c a ciklusidő, Q_l pedig a ládában található munkadarabok kiinduló mennyisége.

A fentiekből következik, hogy a logisztikai kiszolgálás határideje (D) jelentősen kitolható, ha a gép melletti tároló terület mérete növelhető, ugyanakkor ez a rendelkezésre álló helytől függ.

Amennyiben az üzem nagyon zsúfolt, a logisztikai kiszolgálásra rendelkezésre álló időtartam rövid, ez pedig kihatással van a feladatok határidejére.

4.3.2. Az anyagmozgatási feladat végrehajtása

Az anyagmozgatási feladat határidején túl, az elvégzés folyamatára is hatással van a rendelkezésre álló terület korlátozottsága. Amennyiben az üzem területén máshol nem lehet árut tárolni, kizárólag az ütemraktár és a munkahely jöhet számításba mint tároló terület.. Ezért minden esetben először helyet kell felszabadítania a munkahely melletti tárolóterületen, majd utána tudja magát a mozgatást elvégezni, tehát nem tud „előkészülni” a cserére. A mozgatási igény regisztrálása után az anyagmozgató eszköz először felkeresi a munkahelyet, alapanyag esetén elszállítja az üres ládát a kijelölt tárolóhelyre, és az ütemraktárból egy teli ládát helyez az így felszabadult helyre, így a feladatot a munkahelyen fejezi be (11. ábra.). Késztermék esetén is ugyan ez a folyamat játszódik le.



11.. ábra. Gyártó berendezés kiszolgálásnak vázlata:

1. *A mozgatási igény az utolsó darab, művelet előtti termék gyártóberendezésbe helyezésével egyidőben keletkezik.*
2. *Az anyagmozgató eszköznek fel kell keresnie a munkahelyet, az üres tároló eltávolítása érdekében.*
3. *Az új, teli, művelet előtti terméket tartalmazó egység elhelyezésével a kiszolgálás befejeződik*

(Saját szerkesztés)

4.3.3. Az egyes gépek eltérő gazdasági jelentősége

A műhelyrendszerű termelés fontos jellegzetessége, hogy számtalan gyártó berendezés üzemel, melyek eltérő termékeket gyártanak, és különböző gazdasági súlyt képviselnek. Egy gyártó berendezés gazdasági jelentősége függhet a könyvszerinti értékétől, finanszírozásától, a rajta dolgozó munkások számától és szakképesítés igényétől, az éppen előállított termék által elérhető haszontól, vagy a gép által felhasznált időarányos energia mértékétől. Emiatt a gyártó berendezések kapacitásának kiesése nem azonos súllyal számolandó, tehát amikor választani szükséges, hogy mely gépek kiszolgálásának prioritása magasabb, ezt is mérlegelni kell. Ez alapjaiban teszi összetettebbé műhelyrendszerű termelés logisztikai kiszolgálását, mert az esetleges várakozások nem azonos súllyal számolandók, tehát a kiszolgálás célja nem a várakozási idők, hanem a gépenként eltérő költséggel súlyozott várakozási idők, tehát a várakozási költségek minimalizálása. Emellett annak nincsen előnye, hogyha a kiszolgálás a határidő előtt valósul meg, így kizárólag a késés van büntetve a koraiságnak nincsen jutalma.

4.3.4. Az anyagmozgatási feladatok felmerülése

A termeléstervezésről szóló fejezetben (4.1) már említésre került, hogy a termelés tervezés komplexitását milyen jelentősen befolyásolja, hogy az egyes gyártó berendezések önálló ütemben működnek, melyek nincsenek összehangolva egymással. Emiatt az anyagmozgatási feladatok felmerülése sem ütemezhető, tehát előfordulhatnak olyan időszakok, amikor az ezek a feladatok feltorlódnak, míg más esetben a targonca várakozik feladatra. Tekintve, hogy a 4.3.2

fejezetben foglaltak miatt a feladatokkal jellemzően nem lehet előkészülni (előre dolgozni például azzal, hogy a gép közelébe szállítják a következő cseréhez szükséges anyagokat) a terheletlen időszakok során megnyert időt nem lehet a terhelt idők csökkentésére felhasználni. Ezért amikor a feladatok összetorlódnak (vagy az igények közel egyenlők a kapacitással), a végrehajtási sorrendet úgy érdemes meghatározni, hogy az a lehető legalacsonyabb várakozási költséget eredményezze. Ez alapján a műhelyrendszerű termelés anyagmozgatásnak célja a teljes, súlyozott késésköltség minimlaizálása.

4.3.5. Az operatív anyagmozgatási feladatok elvégzője

Az anyagmozgatási feladatokat elvégezheti a gyártó gép kezelője, de nagyobb vállalat méret felett jellemzően dedikáltan ezzel a feladattal megbízott logisztikai dolgozó végzi, univerzális anyagmozgató eszközökkel. Az hogy ki végzi az anyagmozgatási feladatot, számos tényezőtől függ:

- **Kezelői szakképesítés-igény:** A kézi anyagmozgató eszközökhöz nem, vagy csak alacsony szintű oktatás szükséges, így ezeket elméletileg az üzem számos dolgozója kezelheti, viszont a villástargoncák már speciális szakképesítést igényelnek, ami a gyártási feladatokkal megbízott gépkezelők esetében nem feltétlenül lehet követelmény.
- **A vállalat humánpolitikája:** a vállalat dönthet úgy, hogy képzett gépkezelőket nem bíz meg anyagmozgatási feladatokkal, mert olyan mértékű a szükséges szakképesítés (és ezzel a munkabér különbség), hogy nem vesztegeti el az értékes erőforrásokat alacsonyabb kvalitással is elvégezhető munkákra.
- **A vállalat teljesítménymérési politikája:** a vállalat dönthet úgy, hogy szándékosan választja szét az gépkezelői és az anyagmozgatói funkciókat, hogy az egyes területek teljesítménye jól mérhető legyen. Ebben az esetben a gépkezelő nem mozgathat anyagot, és ha anyagellátási okból teljesítményvesztés következik be, az a logisztika felelőssége. Ez a rendszer különösen hatékony teljesítménymérést és folyamatos fejlődést tesz lehetővé, ezért főleg a nagyobb vállalatok esetében gyakran alkalmazott.
- **A rendelkezésre álló anyagmozgató berendezések száma:** Amennyiben az anyagmozgatáshoz nagyobb értékű berendezések szükségesek, valószínű, hogy a vállalat azokat korlátozott számmal tartja rendszerben. Emiatt ezeknek az eszközöknek a kapacitását a lehető legnagyobb mértékben kell kihasználni, ami leginkább központosított anyagmozgató csoporttal lehetséges.
- **Anyagmozgatáshoz kötődő egyéb logisztikai folyamatok:** a korszerű termelőüzem-irányítás elvei közé tartozik az anyagtranzakciók valós idejű leképezése a

vállalatirányítási rendszerben. Technikailag ennek számos módja lehetséges (vonalkódos technológia, RFID, stb.), de a jogosultságot és szakértelmet kívánó logisztikai folyamat nem bízható gépkezelőkre, illetve az anyagelszámolás pontosságát is növelheti az, ha nem a termelést végző dolgozó maga végzi a teljesítés igazolását. Ilyen esetben a logisztika kell, hogy elvégezze az anyagmozgatást és vele együtt az elszámolást is.

A műhelyrendszerű termelés anyagmozgatásának irányítását az ütemezhető anyagmozgatási feladatok és az éppen aktuális termelési folyamat által megkövetelt gépkiszolgálási műveletek együttes kezelése jelenti. Tekintve, hogy az anyagmozgatás szorosan kötődik a termelési folyamathoz, az irányítás közvetetten innen származtatható. Az ipar 4.0 előtti állapotok esetében (tehát a feladatok digitalizálása hiányában) fontos kitétel, hogy az anyagmozgatással foglalkozó dolgozó közvetlen kapcsolatban legyen a termeléssel, mert a munkájához szükséges információkat onnan tudja megszerezni. Emiatt elterjedt gyakorlat, hogy az anyagmozgató eszközöket és dolgozókat a műhelyekhez rendelik, ahol a termelési tevékenység részeként a helyi vezető a saját belátása szerint irányítja az operatív anyagmozgatási tevékenységet [Ludwig, et al, 2009].

Ennek a rendszernek a rugalmas, helyi igényekhez igazodó működés mellett számos hátránya van:

- Az anyagmozgatási feladatok ütemezése manuális irányítással emberi döntéseken alapul, emiatt szükségszerűen magában hordozza az emberi tényező jelenlétéből fakadó hiányosságokat, illetve jelentős gyakorlatot és helyismeretet igényel, amit időigényes fejleszteni és szinte lehetetlen mérni [Ferenczi, Lilik, 2022a].
- A folyamatos döntési igény jelentős stressztarhelést jelent a dolgozókra és nehezen meghatározhatóvá teszi az elvégzett munka objektív értékelését.
- Amennyiben a feladatok irányítása helyi szinten zajlik, az egyéb területeken felmerülő kapacitáshiányok vagy -többletek nem ismertek, így ezek kiegyenlítése nem lehetséges. Emiatt gyári szinten a szükségesnél magasabb anyagmozgatási kapacitás áll rendelkezésre, miközben előfordulhatnak lokális kapacitáshiányok [Ferenczi, Németh, 2019c], [Ferenczi, Németh, 2019d].

A hátrányai ellenére, főleg a kis és középvállalkozások között, a helyi irányítású anyagmozgatás mégis általános, mert az amúgy is elterjedt helyi (szakértő alapokon nyugvó) operatív termelésirányításhoz könnyen hozzáilleszthető. Sajnos ez az állapot amellett, hogy lehetővé

teszi a rugalmasságot, pont az anyagmozgatást végzők részéről is szükséges szakértői tudásra, és a csak helyben rendelkezésre álló információkra alapozott gyakorlat miatt gátolja a hatékonyság további növelését.

4.3.6. A műhelyrendszerű termelés logisztikai kiszolgálásának összefoglalása:

A fentiek alapján a műhelyrendszerű termelés anyagmozgatásának jellemzése az alábbiakban foglalható össze:

- Az anygamozgatási feladatok két csoportra oszthatók: műhelyek közötti szállítási feladatok, és termeléskiszolgálási feladatok.
- Míg a műhelyek közötti szállítási feladatok jól előre ütemezhetők, az termelés kiszolgálása a termelési rendszer sajátosságai miatt korlátozottan.
- A termelés és a logisztikai folyamatok átadás-átételi helye a gyártó berendezések melletti tároló helyek.
- A termelés kiszolgálás a gépek melletti tárolóhelyek ürítését és töltését jelenti, ahol a mozgatás másik végpontja az ütemraktár.
- A gép melletti tárolóterületek kapacitása összefüggésben van az anyagmozgatási feladatok elvégzési határidöjével és korlátozza az előre elvégezhető anyagmozgatási feladatok lehetőségét. A mozgatási feladatot akkor lehet megkezdeni, amikor az utolsó munkadarabot kiemelték a ládából,
- A termeléskiszolgálási feladatok, igazodva az üzemi tevékenységhez, hektikusan merülnek fel, ahol a kapacitáshiányos és kapacitástöbbletes időszakok követik egymást.
- Az egyes gyártóberendezések prioritása eltérő lehet, emiatt a feladatok ütemezésénél ezt is figyelembe szükséges venni.

4.3.7. Kutatás célja:

Kutatási munkám célja a műhelyrendszerű termelés operatív, vagyis rövid távú, maximum 4 óra időtávban történő anyagmozgatási tevékenységének fejlesztése olyan módon, hogy az ipar 4.0 elveknek megfelelően az anyagmozgatási feladatok végrehajtási sorrendjének meghatározását az ember helyett számítógép végezze, de az anyagmozgató berendezést továbbra is ember kezeli.

5. A vizsgált probléma szakirodalmi leírása

A probléma megoldásának szakirodalmi vizsgálatát az alábbi témakörökben végeztem:

- Optimalizáció és operáció kutatás.
- Műhelyrendszerű termelés anyagmozgatásának operatív irányítása és az ipar 4.0.

5.1. Az optimalizáció és az operációkutatás

Az optimalizáció, mint fogalom, a legjobb elem kiválasztása egy lehetséges elemhalmazokból, más néven a célt leginkább megvalósító megoldás megkeresése, optimálisnak pedig az a megoldás tekinthető, aminél a lehető legjobban megvalósítja a kitűzött célt. Ebből következik, hogy az optimum szorosan együtt jár a céllal is, tehát csak jól definiált célok esetében lehetséges a megtalálása. [Temesi, Varró, 2014].

Az optimalizáció, mint tevékenység, kapcsolatot mutat az operációkutatással (Operation Research OR), ám érdemes tisztázni a két fogalom közti eltéréseket.

Az operációkutatás a logisztikához hasonlatosan a hadtudományokból eredeztethető, és jelentősen fejlődött a második világháború időszakának nagy tömegeket megmozgató hadművelet-tervezési igényeinek hatására. Számtalan feladatra használták (pl. légvédelmi rendszerek telepítésének vagy csapatok ellátásának tervezésére). A második világháború után a hadseregek kötelékéből leszerelő katonák közvetítésével hamarosan a gazdasági életben is számtalan helyen kezdték alkalmazni [Reveillac, 2017]. Mivel számos gazdasági- és tudományterületen szükség van a legjobb, azaz az optimális megoldás megtalálására, az operációkutatás kimondottan gyakorlati tudomány, aminek egyre inkább helye van a globalizálódó világban. A számítástechnika rohamos fejlődése lehetővé tette, hogy a kutatások a számításiigény minimalizálása helyett a gyakorlati alkalmazásokra koncentráljanak. Ennek eredményeképp elsősorban az üzleti tudományterületekre volt jelentős hatása. Az operációkutatási feladatok jelentős része a „termelés irányítás, a vállalati stratégia, a pénzügy irányítás, vagy a műszaki fejlesztés területéről érkezett”

Hillier és Liebermann szerint az operációkutatási probléma megoldásnak általános elemei a következők [Hillier,Liebermann 1995]:

1. A probléma megfogalmazása, azonosítása. A lényeges és lényegtelen elemek elkülönítése, az összefüggések és célok meghatározása.
2. A probléma matematikai modellezése: az összefüggések matematikai leírása.
3. A számítógépes megoldó algoritmus megkeresése és alkalmazása.

4. A modell tesztelése és finomítása, amennyiben ez szükséges
5. A modell gyakorlati használatának előkészítése.
6. Rendszer bevezetése

Hasonló folyamatot vázol Zandin is [Zandin, 2001]. Ezek alapján egyértelművé válik a két fogalom közti különbség, miszerint az operációkutatás egy problémamegoldási folyamat, míg az optimalizáció ennek a folyamatnak az a része, ami a felállított keretek között a számítási tevékenységet takarja.

5.1.1. Az operációkutatási folyamat lépései

1. A probléma megfogalmazása. Annak érdekében, hogy a végeredmény a gyakorlatban is használható legyen, a probléma megfogalmazása rendkívül fontos. Ez nem mindig könnyű feladat, és különböző végrehajtási szinteken ugyanannak a problémának különböző megfogalmazása is lehetséges. Míg rövidtávon egy gyártóberendezés kapacitása egy átléphetetlen korlát, középtávon már lehetséges a kapacitás bővítése, így onnantól akár a gazdasági számítások részét képezheti a kapacitásbővítés költsége. El kell tehát dönteni, mely elemek változtathatók, amiknek hatása lesz a végeredményre, és melyek jelentik a megváltoztathatatlan környezetet, vagyis a korlátokat. A célok megfogalmazása az egyik kulcslépése a problémamegfogalmazási folyamatnak, mint ahogyan az is, hogy a cél a végeredmény maximalizálása (pl. profit) vagy pedig a minimalizálása (költség). A logisztikai vonatkozású, munkaütemezéssel kapcsolatos kutatásokban a célfüggvényekben leggyakrabban alkalmazott mérőszámok az átfutásiidő (makespan), a gépterhelés (workload), a várakozás (tardiness), és ezek kombináció [Chaudhry, Kahn, 2016].

2. A probléma matematikai modellje a megfogalmazott probléma alapján állítható elő. Célja, hogy az összefüggéseket matematikai műveletekkel írja le. Ennek első lépése, a változók, tehát a keresett értékek definiálása és azok számszerű jellemzőinek meghatározása. Következő lépésként a korábban megfogalmazott célból a változók alapján kialakításra kerül a célfüggvény. A probléma megfogalmazása során számba vett korlátozások és a változók között szintén matematikai összefüggést szükséges felállítani.

Az operációkutatás általános matematikai modellje:

$$max\ f(x_1, x_2, \dots x_n),$$

figyelembe véve az alábbi korlátozásokat:

$$g_i(x_1; x_2, \dots, x\ \ ) \leq b_i, i = 1,2, \dots, m$$

és

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0,$$

ahol f a célfüggvény, x_i az i-edik alapváltozó, g_i az i-edik erőforrás fehasználásának függvénye, b_i pedig az i-edik erőforrás maximálisan rendelkezésre álló mennyisége [Zandin, 2001].

Az x_1 – x_n változók, vagyis azok az elemek, amiknek az értékét keresik a folyamat során. (például, hogy egy adott termékből mekkora mennyiség kerüljön szállításra).

Feltételezett, hogy az m számú különböző erőforrás mindegyike korlátozottan áll rendelkezésre, ahol a g_i függvény mutatja az erőforrások felhasználását x_i függvényében és b_i jelenti a maximálisan rendelkezésre álló erőforrás mennyiséget. A korlátozások során indokolt a kisebb vagy egyenlő reláció, hiszen egy gép maximális kapacitása egy adott időszakban nem léphető túl, de értelemszerűen lehetséges a rendelkezésre állónál kisebb mértékű felhasználása. Természtesen, ha a kevesebb felhasználásnak költsége van (például a gép banki hitelből van finanszírozva: ha nem termel értéket, akkor a hitel törlesztése sem lehetséges, ilyenkor pedig a kapacitásveszteségnek is van költsége) ezt a célfüggvényben kell szerepeltetni, itt tehát visszacsatolunk a probléma helyes megfogalmazásának igényére. A nemnegatív korlátozás szerint a változók nem vehetnek fel negatív értéket. [Zandin, 2001]

A probléma megfogalmazása és matematikai modellezése egyaránt magasan képzett szakértőket igényel, akiknek átfogó ismeretekkel kell rendelkezni mind a vizsgált rendszerről, mind pedig az operációkutatás eszköztáráról, mert az egyes optimalizálási módszerek sajátosságai visszahathatnak a modellre (például a linearitás feltétele az LP – linear programming – esetében). Ilyen szakértelem számos vállalat számára nem, vagy csak korlátozottan áll rendelkezésre, ami megnehezítheti a gyakorlati problémák ilyen módon történő megoldását. Ebben a lépésben kell figyelembe venni, hogy a környezetben várhatóan milyen változások fordulhatnak elő, és dönteni, hogy ezeket hogyan és ki fogja átvezetni az operációkutatási rendszerbe. Tekintve, hogy egyes változások akár a modell teljes újra alkotását is igényelhetik, ezeket nagyon körültekintően kell megvizsgálni. Ide sorolható még annak vizsgálata is, hogy a rendszert kik és milyen képzettséggel fogják használni. Amennyiben az átlagfelhasználó nem tudja átlátni a módszer működését, a főbb összefüggéseket, komoly hibákat vihet a rendszerbe a paraméterek nem megfelelő beállításával, illetve előfordulhat, hogy nem veszi észre a hibás működést, ahogyan azt sem, hogy a körülmények esetleges változása igényli-e a modell változtatását is. Azt is mérlegelni kell, hogy a felhasználó elfogadja-e és bízik-e a folyamat végén kapott eredményben. A felhasználók számára az is zavaró lehet, hogy

a probléma modellezése során a modellalkotó egyes jelenségeket esetleg figyelmen kívül hagy. Amennyiben az alkalmazott módszer és a folyamat számukra nem átlátható, előfordulhat, hogy ignorálni fogják a kapott eredményt, ami a rendszer teljes értelmetlenségét eredményezi. Ezért a kialakítás során ezeket is mérlegelni kell [Ferenczi, Lilik, 2021].

3. A megoldómódszer megtalálása és alkalmazása: Az optimalizáció, vagyis a lehetséges megoldások közül a legjobb kiválasztása a matematikai szélsőérték számítás egyik változata. Amikor egy ember ugyan azzal a problémával többször találkozik, a korábbi tapasztalatit felhasználva megoldó módszereket, szabályokat alkot. Ezeket folyamatosan fejleszti annak érdekében, hogy a probléma megoldása számára kedvezőbb legyen és kevesebb erőforrást igényeljen. Az emberi szabályalkotó képességgel így kialakított probléma specifikus ökölszabályok (heurisztikák), alkalmazása egyidős az ipari tevékenységgel és lehetővé tették az egyébként összetett problémákat kielégítő módon történő optimalizálását. A számítógépek elterjedése a számítási kapacitás ugrásszerű növekedése lehetővé tette a meglévő problémák jobb eredménnyel történő megoldása mellett a rendkívül összetett problémák kezelését is. Köszönhetően a téma összetettségének és a számtalan alkalmazási területnek, az optimalizációs technikák rendkívül széles körben kutatottok, és a témában született publikációk emelkedő száma jelzi, hogy jelenlegig is rendkívül aktuális [Chaudhry, Khan 2016]. Számtalan módszer áll rendelkezésre, függően a probléma nagyságától, a modell összetettségétől, a változók számától és a matematikai modell összefüggéseitől. A téma nagysága miatt értekezésemben csak az optimumkeresés főbb módszereit mutatom be.

4. Az eredmények validációja és analízise, fejlesztése: Amennyiben az optimalizáció sikeresen megtörtént, ellenőrizni kell, hogy a kapott eredmény megfelel-e az eredeti megfogalmazásnak, illetve a gyakorlatban alkalmazható-e? Hiába fogalmazták meg a legnagyobb gondossággal a folyamat kezdetén a feladatot, előfordulhat, hogy bizonyos jelenségek kimaradtak, amik a gyakorlatban szükségesek a megfelelő működéshez, esetleg olyan paraméterek és korlátozások is belekerültek a modellbe, amik a gyakorlatban nem relevánsak, tehát figyelmen kívül hagyandók. (Jól mutatják ezeket a gyakorlati alkalmazás során végtelen nagyra állított korlátozó tényezők, amiket így nem vesz figyelembe a modell, viszont a komplexitását növeli, tehát érdemes eltávolítani.)

Az is előfordulhat, hogy olyan korlátozás is megfogalmazásra került, ami valójában nem releváns (például egy termelésütemezési problémában a munkaidőkorlát nem tartalmazza a túlórák lehetőségét, vagy a gépkapacitás-korlát a külső szolgáltató lehetséges bevonását), így egyébként a gyakorlatban használható optimumközeli megoldások kerülhetnek elvetésre.

Ezek az ellenőrző műveletek a modell megalkotásához hasonlatosan nagyfokú szakértelmet igényelnek, egyfelől az eredmények helyességnek felismerését, másrészről az esetleges hibák okának megtalálását. Ilyenkor szerencsés, ha a probléma modelljét megalkotó szakemberek egyben az optimalizációs módszerekkel is tisztában vannak, mert abban is döntést kellhet hozni, hogy az optimalizációs folyamat eredményének javítása mekkora erőforrás befektetéssel jár.

5 – 6. Bevezetés előkészítése és bevezetés: Az újonnan megalkotott módszert alkalmassá kell tenni a gyakorlati felhasználásra. Ez egyfelől az átlagos képzettségű felhasználó számára alkalmazható számítógépes környezet kialakítását jelenti, másfelől a felhasználók szükségszerű oktatását. Mindkét tényező kiemelt fontosságú annak érdekében, hogy a felhasználók a rendszerben megbízzanak, alkalmazzák és a döntéseit elfogadják.

5.1.2 Optimumkeresési módszerek

A szakirodalom a megoldási módszereket alapvetően két nagy csoportba osztja: pontos eredményt és közelítő eredményt adókra. [Zhang, et al, 2019],[Chaudhry et al, 2011],[Mohan et al, 2019].

5.1.2.1. Pontos eredményt adó módszerek:

A pontos eredményt adó módszerek esetében a matematikai algoritmusok lehetővé teszik, hogy a végeredmény pontosan az optimum legyen, bár jellemzően csak korlátozott méretű problémák esetében alkalmazhatók [Zhang, et al 2019]. A logisztikai problémákban leggyakrabban alkalmazott eljárások a következők:

- **Lineáris programozás (LP):** a legrégebbi, és leginkább elterjedt pontos értéket adó optimalizációs módszer, amely elsősorban Dantzig hatékony megoldást biztosító szimplex módszere hatására vált ismertté [Dantzig, 1947]. Nagy lökést adott az operációkutatás gyakorlati, polgári célú alkalmazásának, hogy a szimplex módszer jól automatizálható, ezért az egyre fejlettebb számítógépek egyre nagyobb feladatok megoldását is lehetővé tették. Amellett, hogy ez a fajta számítás hatékonyan működik, számos további módszer alapját is képezi [Zandin, 2001].

  A módszer a nevét a benne alkalmazott függvények linearitásáról kapta. Ebből fakad az egyik hátránya is, nevezetesen, hogy a gyakorlati összefüggések általában nem lineárisak, ezért a linearitás biztosítása érdekében a valóság bizonyos jellemzőit sokszor figyelmen kívül kell hagyni, vagy egyszerűsítések alkalmazása szükséges. [Glover, Sörensen, 2013].

- **Vegyes egészértékű lineáris programozás (MILP):** előfordulhatnak olyan döntési helyzetek, ahol a változók kizárólag egész számként értelmezhetők, például legyártott darabszám, vagy dolgozók feladathoz rendelése. Az LP működése szempontjából fontos kitétel, hogy a változó bármilyen 0-nál nagyobb vagy egyenlő értéket felvehet, így valószínű, hogy a végeredmény nem egész szám. Ez egyes esetekben nem okoz problémát, a kerekítéssel kapott változó érték nem befolyásolja jelentősen a célfüggvényt. [Zandin, 2001] Abban az esetben viszont, ha ez logikailag értelmezhetetlen (például bináris változók esetén, melyek csak 1 és 0 értéket vehetnek fel), az LP feladat nagyságrendekkel összetettebbé válik. Ilyenkor egész értékű lineáris programozásról beszélünk. Ennek gazdaságos megoldása úgy lehetséges, hogy a feladatot megoldják LP-vel, majd az így kapott optimális eredményt transzformálják egész értékűvé. Elfogadhatóan alacsony eltérés esetén a megoldás optimumnak tekinthető. Tekintve, hogy a gyakorlati példák esetében gyakori az egész értékű kitétel, a MILP alkalmazása rendkívül elterjedt [Méndez, et al, 2001].
- **Nemlineáris programozás:** Szimplex módszerének bemutatásakor Dantzig is elismerte, hogy a világ valós problémái a legtöbb esetben nem lineárisak [Dantzig, 1947]. A nemlineáris problémák összehasonlíthatatlanul komplexebbek a lineárisokhoz képest, ezért ezeknek nem is létezik az LP-hez hasonló egységes megoldási módszere. [Zandin, 2001],[Hiller, Lieberman, 1994]. Számos speciális módszer került kidolgozásra a különböző nemlineáris problémák kezelésére, mint például: feltétel nélküli optimalizálás, kvadratikus programozás, konvex programozás, szétválasztó programozás, de ezek részletesebb bemutatása meghaladja ezen értekezés kereteit. Az egyedi megoldások közül ki kell emelni a szétválasztó programozást, mint módszert, aminek során a nemlineáris függvényt lineáris szakaszokra bontva kellően jó közelítéssel oldható meg a probléma az ismert LP módszerrel [Hiller, Lieberman 1995].
- **Dinamikus programozás:** a lineáris programozással szemben nem létezik szabványos megoldási módszere, ez inkább egy problémamegoldási módszer és csak bizonyos típusú problémák oldhatók meg vele. „A dinamikus programozás a valóság egy kicsiny részletével kezd dolgozni, és megkeresi a megoldást erre a kisebb problémára. Ezután fokozatosan bővíti a problémát úgy, hogy az aktuális problémamegoldást mindig az előzőből keresi meg, amíg az eredeti probléma is meg nem oldódik a maga teljességében” [Hiller, Lieberman, 1995].

5.1.2.2. Közelítő eredményt adó módszerek:

A közelítő módszerek eredményei a garantált optimum megtalálása helyett elfogadhatóan jól közelítik meg azt. Céljuk, hogy a komplex problémákra elfogadható számítási időn belül elfogadhatóan jó eredményt adjanak, ezért nagy szerepük van a gyakorlati ipari alkalmazások esetében [Zandin, 2001].

Heurisztika

A heurisztikáknak is nevezett módszerek megkülönböztető vonása, hogy nem garantálják a legjobb megoldás megtalálását, ugyanakkor nem olyan összetettek, mint egy pontos optimumkereső algoritmus. A heurisztikák egyszerű, észszerű szabályok, jellemzően olyan módszerek, amelyek egy adott probléma kezelésére dolgoztak ki és elég jó eredmények érhető el velük, elfogadható időn belül elfogadható mennyiségű számítással., Bár létezésük egyidősnek tekinthető az alapanyagokból tervszerűen terméket előállító tevékenységgel, mégis, mint szabályrendszer, csak az 50-es években kerültek megfogalmazásra és operációkutatási szempontból vizsgálatra [Jackson, 1955],[Mohan 2019].

A gyártási munkaütemezés egy rendkívül összetett és az ipari gyakorlatban is napi probléma, melyet az összetettségük miatt jellemzően NP-nehézként definiálnak, tehát a megoldás nem található meg polinom idő alatt [Sipser, 1992]. Ezek kezelésére gyakran alkalmaznak heurisztikákat [Garey et al, 1976], de számtalan egyéb területen is alkalmazásra kerülhetnek, ahol a feladatokat valamilyen logika szerint rendezni kell, például kórházakban, elosztórendszerekben, vagy más szolgáltatási funkciókban [Sculli, Tsang, 1990].

Néhány, egygépes gyártási munka (tehát az elkezdhető gyártási feladatok egyetlen gépen végzendők el) ütemezéshez használatos heurisztika [Alharkan, 2005]:

- Shortest Processing Time (SPT): a legrövidebb végrehajtási idejű feladat kerül elsőnek elvégzésre, majd a második legrövidebb, és így tovább. Ez a szabály minimalizálja az átlagosan várakozó munkák számát és a késést.
- Longest Processing Time (LPT): a leghosszabb végrehajtási idejű munka kerül elsőnek végrehajtásra, majd a második leghosszabb és így tovább, ezzel a legnagyobb erőfeszítést igénylő feladat kerül elsőnek végrehajtásra.
- Earliest Due Date (EDD): a legkorábbi befejezési határidejű feladat kerül elsőnek végrehajtásra.

- Job Slack Time (JST): minden feladathoz kiszámításra kerül a tartalékidő (a határidő és a végrehajtási idő különbsége, és a legkisebb időtartalékkal rendelkező feladat kerül elsőnek végrehajtásra, majd a második legrövidebb és így tovább.
- Critical Ratio (CR): minden feladathoz kiszámításra kerül a határidő és a végrehajtási idő hányadosa, a feladatok ezen érték szerint növekvő sorrendbe rendezve kerülnek végrehajtásra. Az 1-nél kisebb érték esetén a határidő nem tartható, 1-es érték esetén a feladat azonnali megkezdés esetén határidőre éppen elkészül, 1-nél nagyobb érték esetén van tartalékidő.
- Random: a feladatok véletlenszerűen kerülnek kiválasztásra, például amennyiben a feladatoknak azonosak a paramétereik. Gyakran használatos olyan heurisztikákban, amik először valamilyen logika alapján csoportosítják a feladatokat és a csoporton belül nem lehetséges további sorba rendezés.
- First Come, First Served (FCFS, vagy FIFO) a feladatok az érkezés sorrendjében kerülnek végrehajtásra (például egy bolt pénztára esetében). Ebben az esetben az ütemező nem dönt, ezért ez egy „demokratikus" heurisztika, előnye, hogy a sorbanállással járó emberi konfliktusok minimalizálódnak.
- Last Come, First Served: az utolsónak beérkező feladat kerül először végrehajtásra. (Példa erre egy leveles kosár feldolgozása, ahol az új leveleket mindig a régiekre helyezik rá.)
- Least Flexible Job (LFJ), Legkevésbé rugalmas munka szabály: azt a feladatot választja ki elsőnek, amit a legkevesebb gépen lehetséges elvégezni, tehát ami a legrugalmatlanabban ütemezhető.

A felsorolt heurisztikák több csoportba is sorolhatók:

- A végrehajtási idővel kapcsolatos szabályok: SPT, LPT.
- Határidőt is magukba foglaló szabályok: EDD, JST, CR

A felsoroltakon kívül még számtalan más prioritásalapú szabály került kidolgozásra [Panwalkar Iskander 1977],[Sels et al., 2012] de lehetséges a szabályok kombinációja is, melyek jellemzően egyedi problémákra kerülnek kialakításra [Sculli ,Tsang, 1990]. Összességében elmondható, hogy az emberi elme a rendszeresen felmerülő sorbarendezési és ütemezési problémák kezelésére létrehoz valamilyen szabályalapú megoldást, a problémák ilyen módon történő kezelése tehát az emberi elme válasza az egyébként átláthatatlanul komplex problémákra.

Metaheurisztika

A metaheurisztika egy magas szintű problémafüggetlen algoritmikus keretrendszer, amely nem csak egyetlen problémához használható eredményesen, ezáltal a pontos eredményt adó módszereknél gyorsabb, a heurisztikáknál pedig pontosabb eredményt szolgáltat. A korszerű optimumkereső eljárások rendkívül gyakran metaheurisztikák, mert az egyre növekvő számítási teljesítmény lehetővé teszi a komplex, számításigényes kalkulációk elvégzését, és ezzel rendkívül összetett NP-nehéz problémák megoldását belátható időn belül. Előny még, hogy a metaheurisztikák esetében nem szükséges alkalmazkodni az olyan kitételekhez, mint például a linearitás. [Sörensen, Glover, 2013] A metahurisztikus módszerek logikája jól megérthető az evolúciós algoritmusok (Evolutionary Algorithm, EA) működésén keresztül. Ezek az algoritmusok azt a biológiából vett evolúciós jelenséget használják fel, hogy az egyedek mutálódhatnak, és a mutációk hatására olyan változások jöhetnek létre, amik az adott környezetben hatékonyabbá teszik a megváltozott tulajdonságokkal rendelkező egyedeket. A kedvező tulajdonság öröklődik, amennyiben pedig a megváltozott tulajdonság hátrányt jelent, az egyed kihull. Az algoritmus a változók egy kiinduló populációjára kiszámítja a célfüggvény értékét, majd a populációt különböző mértékben mutálja, és megnézi, hogy a célfüggvény eredménye hogyan változik. A mutációk hatására születő kedvezőbb tulajdonságú (életképesebb) egyedeket megtartja, az életképtelenebbeket pedig elveti. A folyamat addig ismétlődik, amíg már szignifikáns javulást nem tud eléri. A beállítható futási idő és a mutációs paraméterek, jelentősen befolyásolják, hogy a végeredmény mennyire lesz közel az optimumhoz, ezáltal a számítási erőforrásigény és végeredmény kompromisszumok hatékonyan szabályozhatók. Ez különösen alkalmassá teszi ezeket az eljárásokat gyakorlati alkalmazásokra [Sörenden-Glover, 2013],[Beyer ,Schwefel, 2002]. Számos metaheurisztika ismert, melyek eltérő elvek szerint, de minden iteráció során az egyre jobb megoldást keresik [Danka, 2014]. Az építkező módszerek, mint például a hangyakolónia algoritmus (ACO), a meglévő megoldáshoz ad újabb elemet és vizsgálja a hatását a megoldásra. Lokális kereső algoritmusok közé tartozik a szimulált hűtés (SA). Ez egy kiinduló megoldást fejleszt és vizsgálja, hogy kisebb változtatások (mozgások) milyen hatással vannak a célfüggvényre [Sörensen-Glover, 2013]. Gyakran előfordul, hogy az egyes módszerek előnyeit ötvözik a számítási idő csökkentése érdekében, például, hogy az egyik módszerrel részproblémákat alakítanak ki, majd azokat egy másik módszerrel megoldják. Az így kialakított úgy nevezett hibrid megoldások lehetővé teszik az egyes módszerek előnyeinek kihasználását.

5.1.2.3. A szakértői rendszerek

A szakértői rendszerek mesterséges intelligenciára épülő számítógépes rendszerek, amelyek a szakértői tudást és szaktudást modellezik és alkalmazzák különböző problémák megoldására. Ezek a rendszerek képesek az emberi szakértők döntéshozatali folyamatát lemodellezni és szimulálni. Annyiban hasonlatosak a heurisztikákhoz, hogy mindkettő a gyakorlati alkalmazás során kerül kialakításra, és nem feltétlenül a matematikai optimumra törekszenek, viszont rövid idő alatt kielégítően jó eredményt adnak. A szakértői rendszerek egyik meghatározó technikája a fuzzy logikán alapul.

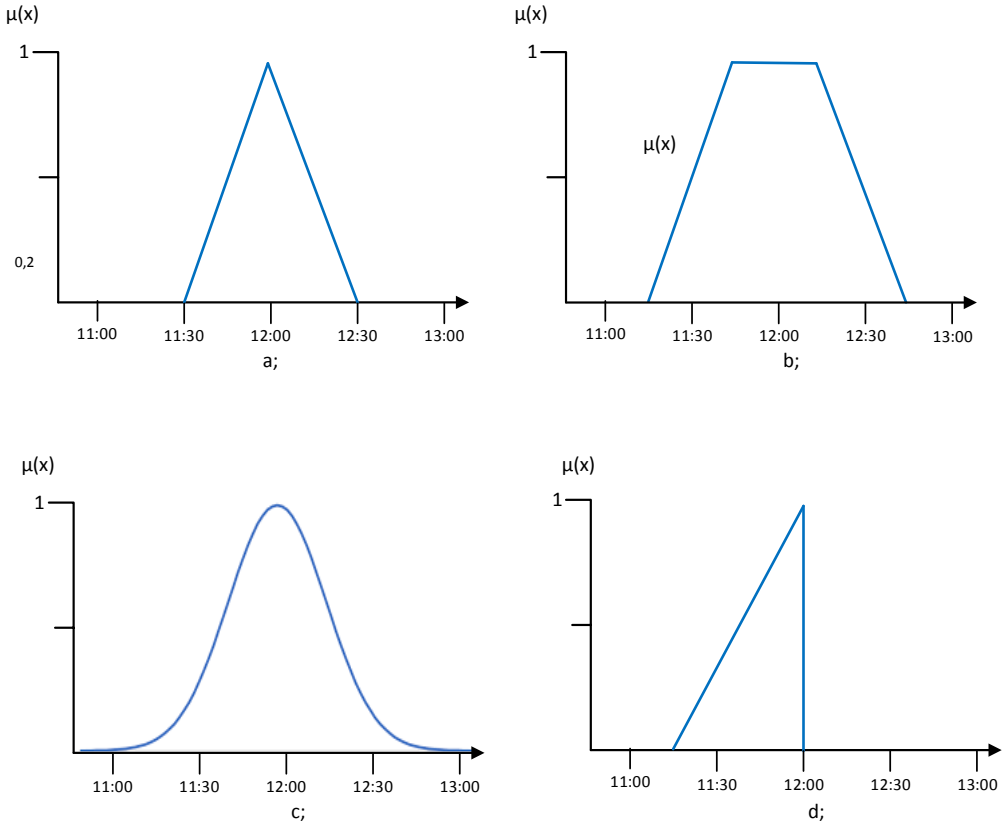
Fuzzy halmazok

Az emberi gondolkodás sokkal összetettebb és árnyaltabb annál, hogy a szokásos Boole logikával, vagyis egy halmazhoz tartozással (1) vagy nem tartozással (0) a világ jelenségeit egyértelműen le lehessen írni.

L. A. Zadeh által az 1960-as években kidolgozott fuzzy logika [Zadeh, 1965] ezt a dilemmát oldja fel azzal, hogy lehetővé teszi, hogy az egyes jelenségek az egyes tulajdonságokhoz nem csak igen (1) vagy nem (0) értékekkel tartozzanak, hanem 0 és 1 között bármekkora értékkel. A logika megtartja a kétértékű logika alapvetéseit (0 → az elem nem tagja, 1 → az elem teljes mértékben tagja a halmaznak), de lehetővé teszi a részleges halmazhoz tartozás (átmenetek) definiálását is.

Egy fuzzy halmaz megadható a tagsági függvényével, ami a rendezett alaphalmaz elemeinek adott halmazhoz való tagsági értékeit írja le. A tagsági érték általában az a 0 és 1 közötti szám, ami kifejezi az adott jelenség fuzzy halmazhoz tartozásának mértékét (a 0-tól és 1-től, mint szélsőértékektől elméletileg el lehet térni, de a gyakorlatban ilyesmi nem fordul elő). A tagsági függvények bármilyen formát felvehetnek, de a legelterjedtebbek a kis számításigényű háromszög-, trapéz-, szakaszonként lineáris és Gauss-görbe alakú függvények (12. ábra). A 12. ábrán a „találkozzunk déli tizenkettőkor!” felszólításhoz kapcsolódóan a déli 12 óra fuzzy értékként, különböző pontosságértékeket tartalmazó fuzzy halmazokkal van megadva. Az „a” ábrarészen látható függvény szerint kizárólag a 12:00 órás érkezés tekinthető tökéletesen pontosnak. A 12 órától történő pozitív és negatív eltérés egyaránt az érkezés pontosságának azonos mértékű változását (csökkenését) eredményezi, tehát a késés és a korai érkezés is azonos mértékben kerül értékelésre, 30 percnél nagyobb eltérés esetén pedig a pontos érkezés értéke nulla lesz, ami a szervező számára eszerint a függvény szerint elfogadhatatlan. Ezzel szemben a „b” ábrarészben látható trapéz alakú függvénynek „tűrése” van, aminek hatására egy bizonyos

határidőn belül korábbi vagy későbbi érkezés nem fogja befolyásolni a pontosság értékelését. A „c” ábrarész tagsági függvénye Guass görbe alakú, amivel a természetes jelenségek jobban leírhatók. Érezhetően ez feleltethető meg az ember pontossághoz tartozó értékítéletének. A „d” ábra nem szimmetrikus, a korábbi érkezést jobban tűri, mint a késést (ez utóbbi függvény jó példa a repülőgépbe történő beszállás esetére is).



12. ábra Példák különböző alakú fuzzy tagsági függvényekre

Forrás: Saját szerkesztés

Ezeknek megfelelően a „találkozzunk 12-kor” fogalom esetében „b” ábrarész például egy baráti összejövetel pontossági függvényének, míg „d” egy állásinterjúénak felelhet meg. A háromszög vagy trapéz alakú fuzzy halmazok általánosításai a szakaszonként lineáris tagsági függvények, melyek a töréspontokat összekötő lineáris szaksokból állnak. Másképpen fogalmazva a töréspontokban a tagsági függvény meredeksége változik [Vöröskői, 2019].

A fuzzy tagsági függvények tehát képesek jól követni a jelenségek emberi gondolkodás szerinti csoportosítását. Nem csak azt írják le, hogy egy jelenség hozzátartozik-e egy adott halmazhoz, hanem azt is, hogy ez a hozzátartozás milyen mértékű. Ez a szemlélet rendkívül leegyszerűsíti a logikai szabályrendszerek megfogalmazását. Az értekezésemben bemutatott munkám során nem alkalmaztam fuzzy következtetőrendszereket, ezért ebben a részben nem térek ki a fuzzy

halmazműveletek és az azoknak megfelelő logikai műveletek ismertetésére, a téma iránt érdeklődő olvasónak azonban ajánlom Kóczy professzor úr előzőekben is hivatkozott kiváló munkáját, mely alaposan tárgyalja ezeket a témaköröket is [Kóczy-Tikk, 2000].

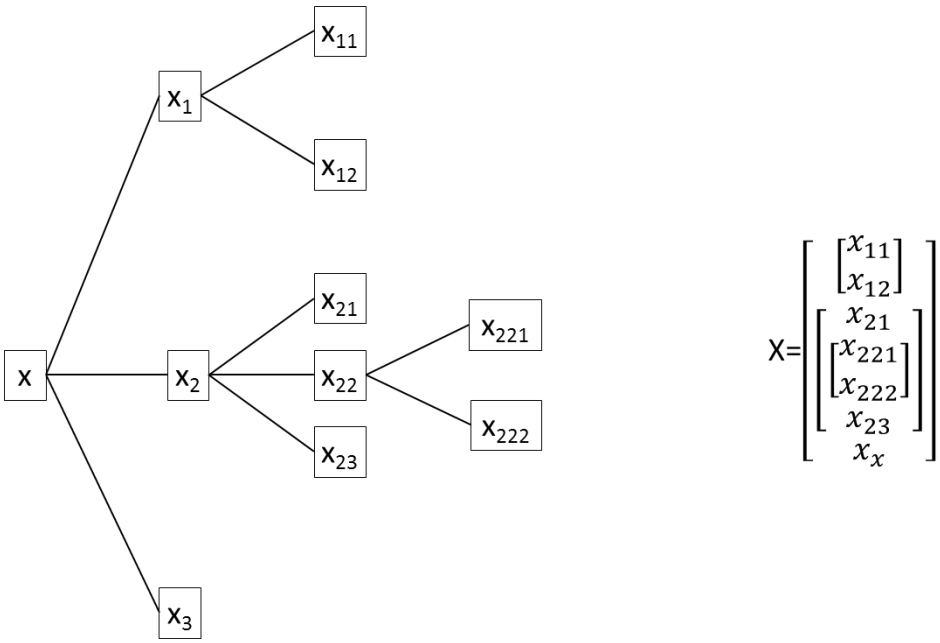
Fuzzy szignatúrák

A mintázatfelismerésen alapuló megoldások kiváló eszközei a neurális hálók [Gurney, 2018]. A neurális hálók egyszerűen megfogalmazva egymással összeköttetésben álló „neuronok" hálózata, rendszere. Az egyes neuronok számítási műveleteket tartalmaznak, melyeket a bemenetükre érkező adatokon hajtanak végre, és az így kapott eredményt adják bemeneti értékül a kimenetükhöz kapcsolt neuronoknak. A neurális háló tanítása a neuronok közötti összeköttetések súlyainak iteratív beállításával történik. A terület új, többek között Masa eredményeit [Masa, 1994] felhasználva ezek az algoritmusok ma már nagy pontossággal képesek a bemeneti és kimeneti adatok közti összefüggések modellezésére, ám van egy hátrányuk. A neurális hálókkal elérhető nagy pontosság feltétele, hogy tanításukhoz kellően nagymennyiségű tanítóminta álljon rendelkezésre. Bizonyos esetekben, például lakóépületek vizsgálata [Bektas et al., 2022], [Bukovics et al., 2022] orvosi kutatások [Lilik, et al., 2021], [Nagy, et al., 2021] vagy minőségbiztosítási problémák [Sós, Földesi, 2022] esetén szinte lehetetlen elegendően sok minta összegyűjtése, így ez a módszer nem alkalmazható kellő pontossággal.

A neurális hálókéhoz hasonló szerkezettel rendelkeznek a fuzzy szignatúrák. A fuzzy szignatúrák olyan modellek, melyekben a vizsgált jelenségek leírása azok résztulajdonságainak értékeiből és az azok közötti kapcsolatokból áll [Koczy et al. 1999]. Ezek a résztulajdonságok további altulajdonságokra bonthatók. Az egyes altulajdonságok értékei (fuzzy szignatúra esetén ezek az értékek szigorúan 0 és 1 közöttiek) a hozzájuk tartozó súlyok figyelembevételével aggregálva adják a felettes tulajdonságok értékét (a szerkezet egy modellje a 36. ábrán látható). A neurális hálókhoz képest különbség, hogy ezek a modellek nem gépi tanulás alapúak, ellenben kiválóan alkalmasak szakértői tudás modellezésére, szakértői rendszerek megvalósítására, tehát nem nagymennyiségű tanítómintára, hanem gyakorlott szakértőkre van szükség a felállításukhoz. Így akkor is sikeresen működhetnek, ha elkészítésükkor nem állt rendelkezésre nagymennyiségű minta. A szakértők döntési módszereit, logikáját a fuzzy szignatúrákkal még akkor is lehetséges leképezni, ha azok eltérő struktúrájúak és egymással nem összevethető adatokból állnak [Ballagi 2015].

A fuzzy szignatúrák a vektorértékű fuzzy halmazok általánosításai, azaz a jelenséghez rendelt vektor minden eleme lehet önmaga is egy vektor. Így bármilyen mélységű szignatúra

létrehozható, melyeknek a legszemléletesebb ábrázolása a fastruktúra [Koczy et al. 1999]. A fastruktúra felbontható további al-struktúrákra, vagyis részfákra. A 13. ábra egy fuzzy szignatúra felépítését mutatja grafikusan és vektorként is. Az egyes ágak további részfákra bonthatók.



13. ábra. Egy lehetséges fuzzy szignatúra fastruktúraként és vektorként is ábrázolva. (Saját szerkesztés [Vöröskői, 2019]alapján)

A 33. ábrán látható fuzzy szignatúrában az alapvektor:$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$, míg $x_1 = \begin{bmatrix} x_{12} \\ x_{12} \end{bmatrix}$ és $x_2 = \begin{bmatrix} x_{21} \\ x_{22} \\ x_{23} \end{bmatrix}$ részfák, $x_{22} = \begin{bmatrix} x_{221} \\ x_{222} \end{bmatrix}$ pedig további részfa. A fuzzy szignatúrák szóhasználatában a részfák ágak, a részfára nem bomló csomópontok (pl. x_3 és x_{23}) pedig levelek.

Ahhoz, hogy az egyes ágak értékei meghatározhatók legyenek, a hozzájuk tartozó levelek (vagy alsóbb szintű ágak) értékeinek valamilyen módszer szerinti aggregációját kell elvégezni. Ez egy redukciós folyamat, ami akkor végezhető el, ha a részfa nem tartalmaz további aggregálatlan részfákat, vagyis az aggregációs folyamatot a levelektől indulva kell értelmezni. Azt a műveletet, melynek során az egyes részfák redukálásra kerülnek nevezzük aggregációnak [Vöröskői 2019].

Az aggregáció műveletének elvégzésére használt függvényeket (melyekkel a csomópontot alkotó részfák összegzésre kerülnek) aggregációs operátoroknak nevezzük. A megfelelő aggregációs operátorok kiválasztása kifejezetten a fuzzy szignatúrában „tárolt” szakértői tudástól függ, azok arra jellemzők. Az aggregációs operátorok modellenként különbözők

lehetnek, bár léteznek általánosan alkalmazott függvények. Ilyen általános használatra ajánlott aggregációs operátorok a Weighted Relevance Aggregation Operator (WRAO)

$$g(s_1, s_2, \cdots, s_n; w_1, w_1, \cdots, w_1) = \left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(w_i s_i)^p\right)^{\frac{1}{p}},$$

(ahol $p \in \Re, p \neq 0$, $i \in [0; 1]$ és $\sum_{i=1}^{n} w_i$ nem feltétlenül egyenlő 1-gyel) [Mendis, 2006] vagy az Ordered Weighted Average (OWA)

$$M(a_1, a_2, \cdots, a_n) = (\sum_{i=1}^{n} w_i {b_i}^p)^{\frac{1}{p}},$$

ahol $p \in [-\infty, \infty]$, b_i az i-dik legnagyobb bemenet, w_i pedig súlyok gyűjteménye, melyre igaz, hogy $w_i \in [0; 1]$ és $\sum_{i=1}^{n} w_i = 1$ [Mendis, 2008].

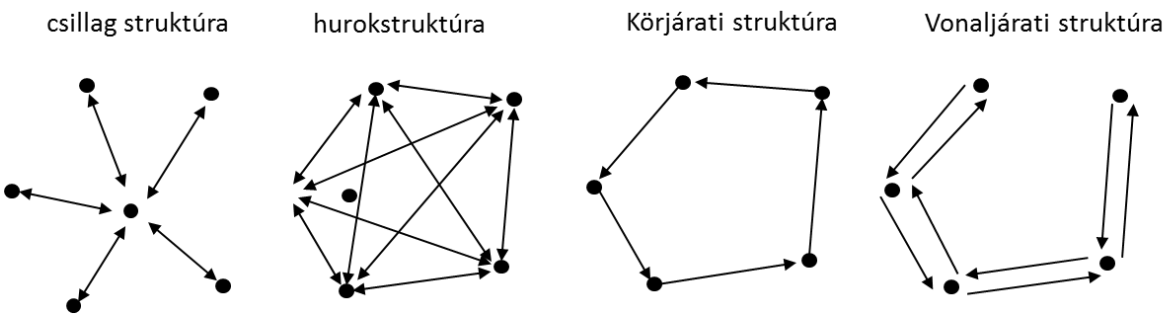
5.2. A műhelyrendszerű termelésben történő anyagmozgatás operatív irányításának szakirodalmi áttekintése.

A műhelyrendszerű termelés anyagmozgatásának irányítását az ütemezhető anyagmozgatási feladatok és az aktuális termelési folyamat által megkövetelt gépkiszolgálási műveletek együttes kezelése jelenti. Az ipar 4.0 előtti állapotok esetében (tehát a feladatok digitalizálása hiányában) fontos kitétel, hogy az anyagmozgatással foglalkozó dolgozó közvetlen kapcsolatban legyen a termeléssel, mert a munkájához szükséges információkat onnan tudja megszerezni. Emiatt elterjedt gyakorlat, hogy az anyagmozgató eszközöket és dolgozókat a műhelyekhez rendelik, ahol a termelési tevékenység részeként a helyi vezető a saját belátása szerint irányítja az operatív anyagmozgatási tevékenységet [Wahl, et al, 2022]. Főleg a kis és középvállalkozások között, a helyi irányítású anyagmozgatás általános, mert az amúgy is elterjedt helyi (szakértő alapokon nyugvó) operatív termelésirányításhoz könnyen hozzáilleszthető. Ez az körülmény az anyagmozgatást végzők részéről is szükséges szakértői tudásra, és a csak helyben rendelkezésre álló információkra alapozott gyakorlat miatt, meg határozza a kezelhető feladatméret felső határait és komplexitását. Az ipar 4.0 az információk folyamatos gyűjtésének, kiértékelésének, megosztásának lehetőségével feloldja azt a korlátot lehetővé teszi az irányítási módszerek újra definiálását, ezzel jelentős hatékonyság növekedési potenciált teremt. Tekintve, hogy a két állapot közötti átmenetet keresem, fontos mindkettőt megvizsgálni.

5.2.1. Anyagmozgatás irányítása a hagyományos irányítású termelési rendszerekben

A műhelyrendszerű termelés hagyományos környezetben történő, operatív anyagmozgatásával kapcsolatos irodalom elsősorban általános elvekről szóló publikációkra korlátozódik. Az anyagmozgatás szervezésének céljai és általános alapelvei közül meghatározó az, hogy a szükséges szállítási teljesítmény megvalósítása mellett minimalizálja az anyag elérhetőségből fakadó termelési veszteségeket, hangsúlyozva, hogy az anyagmozgatás nem ad értéket a termékhez, viszont jelentős veszteségek forrása lehet [Kumar, Suresh 2006].

A műhelyrendszerű termelés rugalmassági igényeit és a rugalmassági igények hatását az anyagmozgatási jellemzőire többen is leírták. Felföldi „rugalmasan automatizált, számítógéppel irányított" anyagmozgató rendszert javasolt [Felföldi, 1989]. Prezenszky kifejti, hogy az anyagmozgatás irányítását kockázatos a diszponáló dolgozóra bízni, mert „leterheltsége sok esetben olyan nagy lehet, hogy az a diszponálás minőségét veszélyezteti", helyette számítógépes irányítást javasol, ahol a kommunikációt korszerű megvalósítás esetén digitális jelátvitel biztosítja. Az irányítási struktúráknál kifejti, hogy a hurokstruktúra alkalmazandó (14. ábra) ha az egyes források és nyelők között keletkező szállítási igények gyakran sztochasztikus jellegűek, ezért nincsen mód determinisztikus szituációt feltételező tervezésre". [Preszenszky, 2002]



14. ábra. Szállításszervezési struktúrák [Prezenszky 2002]

A számítógépes szállításirányítás céljaiként a következőket fogalmazza meg: „a szállítások határidőre való lebonyolítása, az üresjáratok minimalizálása, megfelelő szállító eszközök alkalmazása, a diszpécser tehermentesítése (különösen a rutintevékenységek alól), a szállítási folyamatok jobb áttekinthetősége". [Prezenszki, 2002]

A folyamatok irányításának részműveleteit mutatja be az 1. táblázat, kiegészítve a logisztikára jellemző információkkal. A folyamat elemei két nagy csoportra oszthatók, egyik az információ megszerzése illetve továbbítása, a másik pedig az információ alapján történő döntés hozatal. A

döntés meghozása, során ahol logisztikai szempontból az optimalizáció kerül a fókuszpontba Tulajdonképpen ez a folyamatlépés jelenti a logisztikai értékképzés gerincét, míg a többi a szükséges és a megszerzett információ kezelésének lépése.

1. táblázat. Anyagmozgató rendszer irányítása és az információkezelési folyamat lépései. (Saját szerkesztés)

Irányítási fázis	Logisztikai jellemzők	Információ kezelés
1. Érzékelés	Anyagmozgatási igények regisztrálása,	Adatok észlelése, rögzítése, tárolása, értékelése
2. Ítéletalkotás	Döntés a feladatok végrehajtásáról (sorrend, eszköz, időzítés)	Adatok feldolgozása, döntés meghozatala
3. Rendelkezés	Utasítás az anyagmozgatási feladat végrehajtására.	Döntésről szóló információ közlése
4. Beavatkozás	Az anyagmozgatási feladat végrehajtása	Feladat végrehajtásának jelentése, idő és teljesítmény adatok rögzítése

A folyamatlépéseket elemezve látható, hogy a második lépés kivételével mindegyik valamiféle információgyűjtési, összegzési vagy továbbítási feladat. A második lépésben viszont érdemi döntés történik, itt készül el a cselekvési terv a beérkezett információ alapján. (Tulajdonképpen ebben a lépésben realizálódik a rendszert tervező logisztikus szakmai elképzelése, munkája, szakértelme).

A szakirodalom kutatása során nem sikerült a fentieknél konkrétabb, az anyagmozgatás hagyományos keretek közötti, operatív irányítására vonatkozó megoldásokat találnom, a szakirodalom ezen a téren kifejezetten szűkszavú, az ipari gyakorlatban pedig túlnyomórészt a helyi szakértők tapasztalati úton kialakított, helyszínfüggő módszerei kerülnek alkalmazásra. Ennek egyik oka abban keresendő, hogy a működtetéshez szükséges sinformációk a hagyományos struktúrákban teljességükben csak helyben állnak rendelkezésre és az emberi feldolgozó képesség is behatárolhatja az így irányítható rendszerek mérettét. Ugyanakkor, az Ipar 4.0, eszközeinek segítségével az 1. táblázatban látható fázisok gyakorlati megvalósítása jelentősen átalakul.

5.2.2. Ipar 4.0 megoldások

Az ipar 4.0 mint a digitális átalakulás lépcsőfoka, a hagyományos ipari folyamatokat és gyártási rendszereket összekapcsolja a legújabb információs és kommunikációs technológiák, az automatizálás, a mesterséges intelligencia és az adatelemzés lehetőségeivel. Az ipari gyártásban használt eszközök, gépek és rendszerek közötti adatcsere és kommunikáció új szintre emelése

az ipar 4.0 lényege. Általános célja az ipari folyamatok hatékonyságának, termelékenységének és minőségének javítása, valamint a gyártási rendszerek rugalmasságának növelése az ember-gép együttműködés új szintre emelésével [Proia, et al, 2021]. Az információ valós idejű gyűjtése, megosztása, gépi kiértékelése és az emberi döntés támogatása, majd a döntések azonnali végrehajtása jelentős potenciált jelent a gyártási folyamatok hatékonyságának növelésre. [Facchini, et al, 2022]. Ugyanakkor már elérhető költségekkel rendelkezésre álló lehetőségek ellenére az ipar 4.0 elterjedése fokozatos, 2019-ben a vállalatok közel 50%-a, egyáltalán nem alkalmazza az ipar 4.0 eszközrendszerét, és közel 39% pedig „kezdőnek" minősül [Agostini, Filippini, 2019]. Ennek az egyik oka, hogy az ipar 4.0 elsősorban az új beruházásokon keresztül valósul meg a meglévő gyártási rendszerekhez technikai és kulturális okokból nehezebben csatlakoztatható [Pessl et al, 2017].

A logisztikai folyamatok ipar 4.0 keretében történő fejlődése az okoslogisztikai megoldások (Smart Logistics), melyek az adatok, az automatizálás és a digitalizáció felhasználásával optimalizálják és hatékonyabbá teszik a logisztikai folyamatokat. Az okoslogisztika célja a szállítás, az áruk követése, a raktárkezelés és az ellátási lánc optimalizálása. [Winkelhaus, Grosse, 2020]. Az okoslogisztikai rendszerek esetében is érvényes, hogy elsősorban a nagy rendszereket üzemeltetőknél (raktárak, elosztó központok, összeszerelő sorok) terjednek el, ahol a folyamatok megfelelően standardizálhatók [Vonolfen, et al, 2012],[Ludwig, Goomas 2009]. A dinamikusabb termelési formákban történő alkalmazásra [Yongkuk, et al, 2021] olyan megoldást kínálnak, ami az önjáró anyagmozgató eszközök (AGV) irányításában azonnali választ ad, arra ez esetre, ha változnak a körülmények, igények, vagy akadályok merülnek fel. Ugyanakkor munkájukban különösen hangsúlyos, hogy ennek elengedhetetlen feltétele, hogy az összes eszköz az információs hálózat része legyen, és így a megfelelő digitális modell rendelkezésre álljon, ez általánosan megfigyelhető követelmény [Qu, et al, 2016], [Malus, et al, 2020]. Kis és közép vállalatok számára, alacsonyabb infrastruktúra igényű, gyakorlati megoldás található Whal és társai jelentésében [Whal et-al, 2022], ahol feladatokat ember vezette targoncák végzik, AGVk helyett. A beérkező mozgatási igényeket zónánként érkezési sorrendben (FIFO) szerint kezelik, amibe a diszpécser beavatkozhat, amennyiben ennek szükségét látja. Annak ellenére, hogy a bemutatott és tesztelt rendszer további priorizálást nem alkalmaz, jelentősen javultak a mért kiszolgálási eredmények. A továbbiakban megvizsgálom, az AGV-vel működtetett nagy rendszerek vezérlésben alkalmazott módszereket és azok alkalmazhatóságát a műhely rendszerű termelés logisztikai kiszolgálásában.

5.2.2.1. Az AGV irányítás hierarchikus szintjei, célfüggvényei

Az AGV irányítás kutatási területét alapvetően két részre lehet osztani: egyik a feladatütemezés (scheduling), másik pedig az útvonalkijelölés (routing) [Qiu, et al., 2002]. Az AGV ütemezés célja, hogy az AGV-ket felvételi és lerakási feladatokhoz rendelje, figyelembe véve a különböző korlátozásokat, mint például a határidők vagy a prioritások. Ezek a célok általában a végrehajtási időre (annak minimalizálása) vagy az erőforrás legjobb kihasználásra irányulnak (hatékonyságmaximalizálás, vagy futásidő-, szállítóeszközszám-minimalizálás) [Akturk, Yilmaz, 1996]. Az AGV útvonalkijelölés esetén a feladat a megfelelő út megtalálása (leggyorsabb, legrövidebb, vagy legkevesebb energiát igénylő). Az útvonalkijelölés a következő két nehézséget hordozza magában. Először is, létezik-e ésszerű, valóban létező útvonal a kiválasztható AGV-k és a feladat végrehajtási helye között (ez főleg kötött pályán működő járművek esetében kritikus), másodszor, hogy a kiválasztott útvonal használható-e, ami azt jelenti, hogy konfliktusmentesnek kell lennie, a kiválasztás nem okozhat ütközést vagy dugót [Taghaboni , Tanchoco 1995]. A két rész között nem lehet hiearchikus kapcsolatot felállítani, az útvonal, az utazási idő hatással van az ütemezésre és viszont. Nagyszámú feladat és AGV esetén az útvonalak terhelhetőségét is figyelembe kell venni [Qui et al., 2002], tehát bármilyen célfüggvény kerül is meghatározásra, az AGV-k ütemezésében az útvonalkijelölés minden esetben fontos szempont, ami jelentősen növeli a probléma komplexitását.

Egy rugalmas gyártási rendszer (FMS), vagy egy kikötő esetében jellemzően kétfajta ütemezési megközelítést lehet tapasztalni. Az egyik megközelítés külön rendszerként kezeli az AGV-ket, melyeknek a megadott határidő-paraméterekhez igazodva kell kiszolgálni a fő rendszert, azaz a megmunkálógépeket a gyártási rendszerben, vagy a darukat a kikötőben. Mivel ezek az eszközök jelentik a tevékenység kulcselemét, ezek kapacitásának optimális kihasználása az elsődleges cél. Ebben az esetben az AGV-k ütemezésnek nincs hatása a fő rendszerre, teljes mértékben alárendelt annak. Az alárendelt rendszerre jellemző célfüggvények a minden esetben felmerülő konfliktusmentes közlekedés mellett a következők:

- Az AGV-k futási teljesítményének minimalizálása (a bejárt távolság vagy futási idő csökkentése) úgy, hogy az kiszolgálás megfelelő színvonalon megvalósuljon. Ezzel biztosítható, hogy az AGV-k futásarányos üzemeltetési költségei a lehető legalacsonyabbak legyenek, illetve a CO_2 kibocsátás (ami például egy kikötő esetében már számottevő mértékű) is ezzel a célfüggvénnyel minimalizálható [Confessore, et al., 2013].

- Az AGV-k várakozási idejének minimalizálása: cél a feladatra várakozó eszközök összetorlódásának megakadályozása, a folyamatos terhelés biztosítása [Cheng et al, 2005].
- Az üres futások távolságának minimalizálása: a cél ebben az esetben is a kihasználtság növelése.
- A gyártóberendezések késedelmes kiszolgálása miatti várakozási idő minimalizálása. A cél, hogy a megadott feladatvégrehajtási határidők és a tényleges feladatbefejezési idők különbsége a lehető legalacsonyabb legyen. Ez a megközelítés tulajdonképpen a szolgáltatási színvonal maximalizálásnak is felfogható és megfogalmazható korai teljesítésre és késésre is [Bose, et al., 2000].
- A fentiek kombinációja: A vállalatok üzleti céljai jellemzően összetettebbek, minthogy egyetlen mérőszámban meg lehessen határozni őket, ezért, hogy az adott vállalat üzleti céljainak megfeleljenek, a célfüggvények is gyakran összetettek. Ez megfogalmazható egyetlen közös célfüggvényben, ahol az egyes célok eltérő súlyokat kaphatnak, például a közlekedési és a várakozási idők minimalizálása [Chawla et al., 2018], vagy a kiszolgálási idők, majd a futási teljesítmény minimalizálása [Wook, Hwan, 2000]. A többcélú programozás esetében gyakori, hogy a célfüggvények nem egymással összevethető mérőszámokon alapulnak (pl. idő, távolság). Ebben az esetben a Pareto-optimális megoldás megtalálása a cél, ilyenkor a legjobb megoldás ott található, ahol az egyik célfüggvény már nem adhat jobb eredményt a többi romlása nélkül Ilyen célfüggvények lehetnek például az értékteremtő gépek állásidejének, majd az őket kiszolgáló AGV-k futásteljesítményének minimalizálása. Ebben ez esetben nem lehetséges egyetlen célfüggvényt alkalmazni, ezért a pareto-hatékony megoldás megtalálása a cél [Kim et al. 2013].

A másik megközelítés szerint az AGV-k a rendszer részei, tehát az ütemezésük együtt történik a rendszer többi elemével. Ebben az esetben az anyagmozgatás gyakorlatilag egy gyártási műveletként is értelmezhető. Az előnye ennek a megközelítésének az, hogy a valóságos rendszer összefüggéseit, a részek egymásra hatását jobban leképezi, ugyanakkor az AGV vezérlést teljes egészében integrálni szükséges a gyártó eszközök irányítás rendszerébe, ami nagyban megnöveli a rendszer komplexitását. Az ilyen kombinált rendszermegközelítésben leggyakrabban alkalmazott célfüggvények a következők:

- **Teljes végrehajtási idő (makespan) minimalizálása:** Amennyiben a gyártási rendelések több műveletből állnak és azokat több gépen is lehet végezni, a feladatok gépek közötti elosztásával a teljes végrehajtási idő minimalizálható [Cahudhry, et al. ,2011], [Medikondu, et al., 2017]
- **Késés (tardiness) minimalizálása:** amennyiben a gyártási rendelésekhez határidők is társulnak, a gyártási feladatok befejezési ideje és a határidők közti különbségek minimalizálása a kiszolgálási színvonal maximalizálását segíti elő. [Nageswararao, et al., 2014]
- **Súlyozott késés (weighted tardiness) minimalizálása:** Súlyozott késés esetén a határidővel rendelkező különböző gyártási munkák késése nem azonos következményekkel jár. Egyes rendelések késése esetén például rendelés-specifikus kötbér terheli a vállalatot. Ebben az esetben a teljes kötbér vagy büntető költség (penalty) minimalizálása a cél. Előfordul, hogy a vállalat szempontjából a feladatok korai befejezése is veszteségnek számít (például a raktározási költségek miatt), ebben az esetben az összköltség függvényben a határidő előtti elkészüléshez is tartozik büntetés [Ioannou, Kritikos, 2004].
- **A fentiek kombinációja:** mint például az átfutási idő és az anyagmozgató eszközök számának minimalizálása. [Mousavi, 2017]

Az AGV-k ütemezésében használatos célfüggvényeket tehát alapvetően az alábbiak szerint lehet csoportosítani:

- Az erőforrás felhasználás minimalizálása, például működési költség, eszköz szám, vagy kihasználtság maximalizálása.
- A működés káros következményeinek minimalizálása, például az átfutási idő, késési idő vagy éppen a késési költség.

Ennek a két megközelítésnek a továbbfejlesztése, kombinációja fedezhető fel a többi célfüggvényben. [Gen, Lin, 2014]

Az anyagmozgatási rendszer a gyártási rendszerhez képest pedig hiearchikusan értelmezve lehet:

- **Alárendelt:** amikor a gyártási rendszer ütemezése során az anyagmozgatási rendszer pillanatnyi állapota nem kerül figyelembevételre. Ebben az esetben az anyagmozgatási

rendszer célja a megadott feladatok határidőn belüli végrehajtása anélkül, hogy zavarná a gyártási tevékenységet.

- **Mellérendelt:** a gyártási műveletek ütemezésének része az anyagmozgatás ütemezése is.

A munkám során vizsgált probléma esetében a műhelyrendszerű termelés ütemezése már önmagában is rendkívül komplex feladat. Ezt nem célszerű további tényezőkkel - mint az anyagmozgatás operatív ütemezése- tovább bonyolítani. Ennek oka az is, hogy kevés vállalatnál kerül kialakításra olyan informatikai rendszer, ami az üzem minden műveletét, beleértve a targoncák mozgását is valósidőben irányítani képes. Így az anyagmozgatást a termelésnek alárendelt rendszerként kezelem, ahol a gyártási ütemterv adott, a logisztikai rendszer célja, hogy ezt a rendelkezésére adott erőforrásokkal kiszolgálja, vagy ha erre erőforrások hiányában nem képes, akkor a működésével összefüggésbe hozható termelési veszteséget minimalizálja. Kutatásiam során elsősorban erre az erőforráshiányos állapotra fókuszálok.

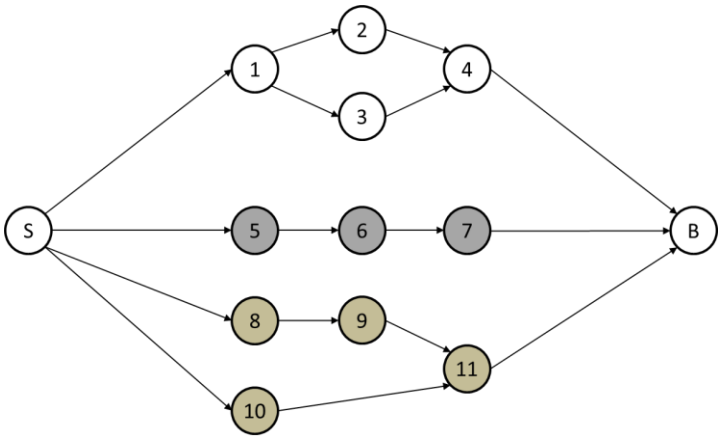
5.2.2.2. Az AGV-irányítás-optimalizáció módszerei:

Az AGV-irányítás (AGV Dispatching) összetettsége miatt jellemzően NP nehéz feladat [Popper, et al, 2021], a szakirodalomban számos optimalizációs technika alkalmazására van példa.

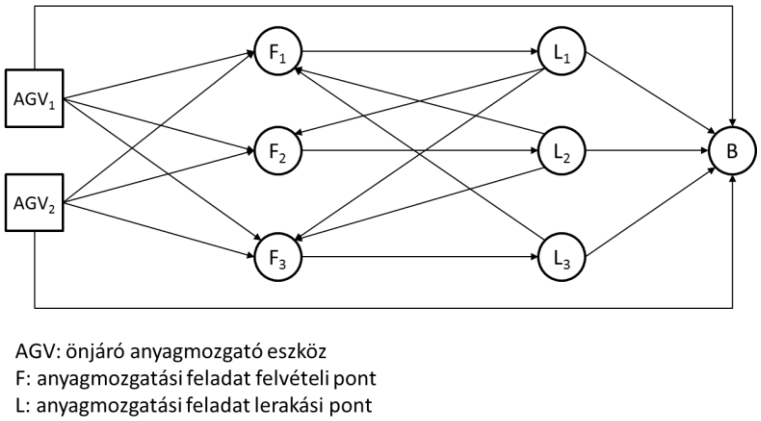
Az AGV-k 1980-as évekbeli megjelenése a műszaki kérdések mellet felvetette az irányítás kérdését is. Az első megoldások heurisztikák voltak. Egbelu és Tancho [Egbelu, Tancho, 1984] prioritás alapú szabályokat fogalmaztak meg a témában, melyek a jellemzően a műhelyrendszerben alkalmazott ütemezési szabályok módosítási voltak. Javaslatuk szerint járműfókuszú megközelítés alkalmazandó, ha a feladatokat akkor rendelik hozzá a járműhöz, amikor az szabaddá válik. Ilyenek például a legtöbb kimenő tétel (maximum outgoing queue size, MOQS) szabály, amikor a munkára kész járművet ahhoz a géphez irányítják, ahol a legnagyobb az elszállításra váró tételek száma, vagy a legrövidebb utazási távolság (shortest travel time STT) amikor az utazásiidőben legközelebbi munkahely kerül kiszolgálásra. A gépfókuszú (work center) megközelítés esetén a feladathoz keresik a járművet, ilyenek például a „legközelebbi jármű” (nearest vehicle NV) vagy a „legrégebben várakozó jármű” (longest idle vehicle LIV) szabályok E módszereknek közös hátrányának tekinthető, hogy a forgalmi szituációval nem foglalkoznak a modellezés során, tehát nagyobb számú kötött pályán mozgó eszköz esetén előfordulhatnak dugók vagy összeakadások [Egbelu, Tancho, 1984].

Elsősorban egyszerű gyakorlati alkalmazhatóságuk miatt az aktuális munkakörnyezethez igazodva számtalan heurisztikus megközelítés született [Confessore, et al., 2013],[Sabuncuoglu, Hommertzheim, 1993]. A helyi adottságok alapvetően befolyásolhatják a szabályok és algoritmusok kidolgozását, amibe beépíthető a helyi szakértők gyakorlata és tudása, így ezek meglehetősen rugalmas módszerek. Hátrányukként lehet megfogalmazni, hogy mint közelítő eredményt adó módszerek, a lehető legjobb eredményt nem feltétlenül érik el, ráadásul a gyakorlatban általában nem is ismert, hogy mennyire közelítik azt meg.

A pontos értéket adó, vegyes egész értékű programozás (MILP) alapú megközelítés szintén gyakran alkalmazott módszer [Rashidi et al 2020]. Az optimális eredményt adó MILP alkalmazását indokolja, hogy a feladatok és a logikai összefüggések jellemzően jól ábrázolhatók gráfos formában. Ilyenkor a döntés az egyes élek vagy csúcsok bejárási sorrendje, tehát a változó bináris: útba ejtik-e az adott élet vagy csúcsot, vagy nem (15. és 16. ábra). Az ilyen feladatok megoldására mint az útvonal választás tehát a MILP különösen alkalmas [Wook, Kim, 2000], [Frits et al, 2020], beleértve egyéb, gyártási környezetben felmerülő váltásokat tartalmazó problémákat is [Bertok, et al, 2011], [Frits et al, 2021].



15. ábra. Egy három feladatból és tizenegy műveletből álló feladatcsoport ábrázolása gráfszerűen. [Gen-Li, 2014]



16.. ábra. Szállítási feladatokat ábrázoló gráf. [Confessore, et al., 2013] alapján saját szerkesztés.

Az alkalmazott módszerek másik nagy csoportját a metaheurisztikus módszerek alkotják. Ezek elsősorban a futási sebességük és rugalmasságuk miatt elterjedtek, ami különösen fontos, ha a dinamikus tervezés rövid válaszidőt követel meg a rendszertől [Mitsuo-Lin, 2014]. A már korábban kifejtett okok (bizonyos esetekben felmerülő büntetésköltség, vagy egyéb, nem lineárisan számolandó tényezők) miatt összetett, nem lineáris problémákra és többcélú optimalizálási feladatokra is alkalmasak [Kim et al., 2013].

Számtalan eltérő módszer, célfüggvény és megközelítés létezik. Az összes AGV ütemezésre használt metaheurisztikus módszer felsorolására itt terjedelmi okokból nincs lehetőség, csupán példaként említem meg a Chawala és Mousavi munkásságát [Chawla, et al., 2018], [Mousavi, Maryam 2017].

5.3. Következtetések a szakirodalmi elemzéséből

A műhelyrendszerű termelés logisztikájának hagyományos, operatív szintű irányítási módszereire kevés szakirodalmi megoldást találtam, ebből arra lehet következtetni, hogy, azokat jellemzően helyben, az adott vállalat adottságainak megfelelően alakítják ki. Több forrás is megemlítette ugyanakkor, hogy a működés alapja a helyben beszerzett információ, tehát ennek rendelkezésre állása és a probléma komplexitása alapvető korlátja a működésnek. Az ipar 4.0 megoldások ezt a korlátot döntik le, elsősorban az információ gyűjtésével, megosztásával, feldolgozásával. Bár az általam vizsgált problémára az AGV ütemezéssel összefüggő kutatások sem adnak teljeskörű megoldást, az AGV szakirodalmi adatok alapján a műhely rendszerű termelés körülményei közti kiszolgálással kapcsolatban az alábbi gondolatokat lehet megfogalmazni.

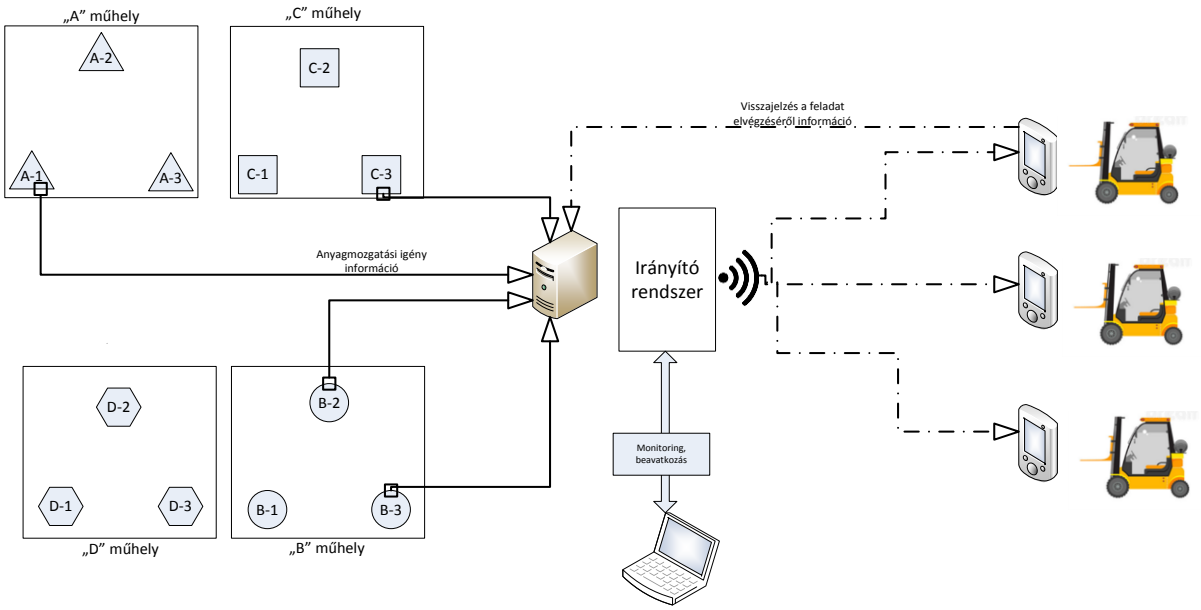
- Az információ megszerzése, feldolgozása és elosztása kulcsfontosságú a működés hatékonyágának növelése érdekében, ezért a továbblépés kizárólag az ipar 4.0 eszközeivel lehetséges.
- A műhelyrendszerű termelés anyagmozgatási tevékenysége a termelésnek alá van rendelve, mert a termelés ütemezése során nem veszik figyelembe az anyagmozgatási tevékenységet. Ez alapján az anyagmozgatási szervezet célja az általa nyújtott szolgáltatás maximalizálása a rendelkezésre álló eszközök alkalmazásával, másképpen a célfüggvény az anyagmozgatáshoz köthető veszteségek (termelő berendezések várakozásának) minimalizálása
- A problémát gráf formájában célszerű ábrázolni, ahol az élek a végrehajtási időt, a csúcsok pedig a feladatok végrehajtását reprezentálják.
- Az egyes gépek eltérő prioritással rendelkeznek, ezért az egyes gépek várakozását súlyozni kell, ami súlyozott büntetésfüggvényként (weighted tardiness) jelenik meg a célfüggvényben.
- Az optimalizáció végrehajtására számos módszer áll rendelkezésre, és ezek mindegyikére lehet példát is találni.
- Az útvonalkiválasztással kapcsolatos problémát, miszerint figyelembe kell venni, hogy az adott útvonalat milyen mértékben használják egyéb eszközök, nem szükséges figyelembe venni, mert az emberi kezelő által vezetett targoncák esetében a torlódások és összeakadások a vezetők közreműködésének következtében elkerülhetők.

A probléma megoldására adott javaslatiam a fentiek figyelembevételével történtek.

6. A műhelyrendszerű termelésben történő anyagmozgatás ütemezési problémájának elméleti modellje

6.1 Modell célja és működési környezete

A műhelyrendszerű termelést kiszolgáló logisztika célja, hogy a termelés zavartalanságát biztosítsa. Az egyes diszkrét anyagmozgatási feladatok elvégzése egymás után lehetséges, tehát az ismert anyagmozgatási feladatok végrehajtási sorrendjét úgy szükséges meghatározása hogy az egyes termelő gépek egyedi várakozási költségével súlyozott összes várakozási költség minimális legyen. A modellnek kezelni kell tudni azt is, hogyha több anyagmozgató eszköz egyszerre dolgozik, eltérő kompetenciákkal. A modell kialakítása során feltételezem, hogy rendelkezésre áll olyan ipar 4.0 elveknek megfelelő digitális feladatkezelő és ütemező rendszer, ami biztosítja a folyamatos kommunikációt a munkahelyek és a targoncák között. Ezzel az anyagmozgatási feladatok felmerülése valós időben követhető, és a rendszer a feladatokat a beállított szabályok szerint osztja szét a targoncák között. Egy ilyen feladatkezelő és ütemező rendszer vázlata a 17. ábra látható [Ferenczi, Németh, 2018].



17. ábra. Anyagmozgatás irányítására alkalmazható rendszer vázlata. A munkahelyeken felmerülő anyagmozgatási igények egy központi számítógépen futó irányító rendszerbe érkeznek, ami azok kiszolgálását a beállított logika szerint ütemezi az egyes anyagmozgató eszközök között. A-B-C-D betűkkel az egyes műhelyek, 1-2-3 számmal pedig az adott technológián belül az egyes gépeket jelölöm. (Ferenczi, Németh, 2018)

Egy ilyen rendszer alkalmazása az alábbi feltételek megléte esetén lehetséges:

- Valós idejű kapcsolat (eszközök hálózata, internet of thing, IOT) megléte a munkahelyek és a targoncák között. Ehhez digitális információközlő rendszer (például kiépített WI-FI vagy LAN hálózat) szükséges. Ennek számottevő költsége lehet.
- Az anyagmozgatási igények digitálisan rendelkezésre állnak. Ez megvalósítható a gépkezelő jelzése alapján, de az információ származhat akár magától a termelőberendezésektől is, amennyiben azok kialakítása ezt lehetővé teszi.
- Az anyagmozgatási feladatokhoz hozzá vannak rendelve a szükséges paraméterek, melyeket a rendszer döntéseiben felhasznál (végrehajtási idő, határidő, fontosság érték). A paraméterek értékeinek megállapítása történhet méréssel, de akár a múltbéli adatok folyamatos elemzésével is. Ez a tevékenység következetesen és folyamatosan végzendő és szakképzett dolgozókat igényel.
- Folyamatosan naprakészen tartott döntést végző számítógépes szoftver megléte. Ez egyrészt szakképzett személyzetet igényel, másrészt pedig jelentős költsége lehet.
- Nyitott munkahelyi kultúra szükséges egy ilyen rendszert bevezetéséhez és működtetéséhez, mert a vállalati működés eddig homályban maradó részei ezután átláthatóvá válnak.

A fenti feltételek biztosítása jelentős terhet jelenthet egy vállalat számára, ugyanakkor az alábbi előnyök jelentősen ellensúlyozzák a terheket, és végeredményben jobb döntésekhez, ezáltal a vállalat számára anyagi előnyhöz vezetnek. Ezek mellett pedig egy ilyen rendszer egy már működő vállalat struktúrájába is beépíthető, anélkül, hogy működésen jelentősen változtatni kellene.

- A valós idejű feladatkövetés lehetővé teszi, hogy a logisztika irányítói számára minden anyagmozgatási feladat ismert legyen.
- A központi irányítás ezáltal folyamatosan kiegyenlítheti az egyes targoncák terhelését akár a műhelyek között is, megszüntetve ezzel a lokális kapacitáshiányokat és többleteket, ezáltal javul a kiszolgálás minősége és növekszik a hatékonysága.
- Az anyagmozgatási feladatok objektív paraméterei (beérkezési idő, határidő, kiszolgálandó gép(tevékenység) fontossága, targoncák aktuális helyzete, stb.) lehetővé teszik a feladatok objektív ütemezését.
- Amennyiben feladatoptimalizáló rendszer működtethető, az emberi döntések hiányosságai és hibái kiküszöbölhetők (például a bonyolult döntési helyzetekben elkövetett hibák, illetve szubjektív emberi szempontok a döntés során).

- Csökken a döntéshozókra nehezedő stresszhatás azáltal, hogy kiélezett helyzetekben egy vállalati céloknak megfelelően megalkotott optimalizáció algoritmus végzi el a döntést.
- A digitálisan rögzített feladatnapló lehetővé teszi az elemzéseket és értékeléseket.

Ezek alapján a digitalizált feladatmenedzsment jelentős előnyökhöz juttathatja az azt alkalmazó vállalatot, amennyiben a vállalat felvállalja a bevezetéssel járó anyagi áldozatokat és kulturális változásokat. A javaslataim kidolgozásánál feltételezem, hogy ilyen rendszer rendelkezésre áll.

6.2. A modell paraméterei

Az egyes anyagmozgatási feladatok jellemző paraméterei.

- Végrehajtási idő: előzetesen, mérésekkel meghatározott időtartam, ami feladat megkezdésétől kezdődik és addig tart, míg az anyagmozgató eszköz új feladatot tud megkezdeni.
- Határidő: az az időtartam, ameddig a gyártó eszköz a feladat elvégézése nélkül üzemelni tud. A feladat bármikor megkezdhető, tehát a határidő folyamatosan csökken.
- Közlekedési idő: az az időtartam, ami ahhoz szükséges, hogy a targonca ez lőző feladat befejezési helyéről az aktuális a feladat végrehajtás megkezdési helyére közlekedjen és a feladatot megkezdhesse. Az egyes feladatok végrehajtási helye közötti távolságot egy közlekedési idő mátrixban lehetséges rögzíteni. A közlekedési idő mátrix a balesetvédelmi, közlekedési és targonca műszaki képességek alapján előzetesen kerül meghatározásra és az egyes feladatok kezdési és befejezési helye közötti közlekedési idő tartalmazza. Alapvetésként feltételezem, hogy a targonca a feladatot a gépnél fejezi be, de amennyiben ez valamiért nem így lenne, akkor a mátrix a feladatok befejezési és megkezdési helyek közötti utazás időszükségletét tartalmazza.
- Az egyes gyártó berendezések várakozási költsége: az az egységköltség, amit a várakozási idővel szorozva megadja, hogy az adott gyártóberendezés várakozása mekkora veszteséget eredményez. Gyártó gépenként eltérő mértékű.
- Az egyes targoncák által elvégezhető feladatok. Tekintve, hogy nem minden taronca tud minden feladatot elvégezni, a végrehajtási sorrend meghatározása során erre is tekintettel kell lenni.

A végrehajtandó feladatok listája tartalmazza a feladatokat, ahol a végrehajtás bármikor megkezdhető (tehát a láda tele van, vagy üres), és ezzel a határidő már ismert. A jövőbeli

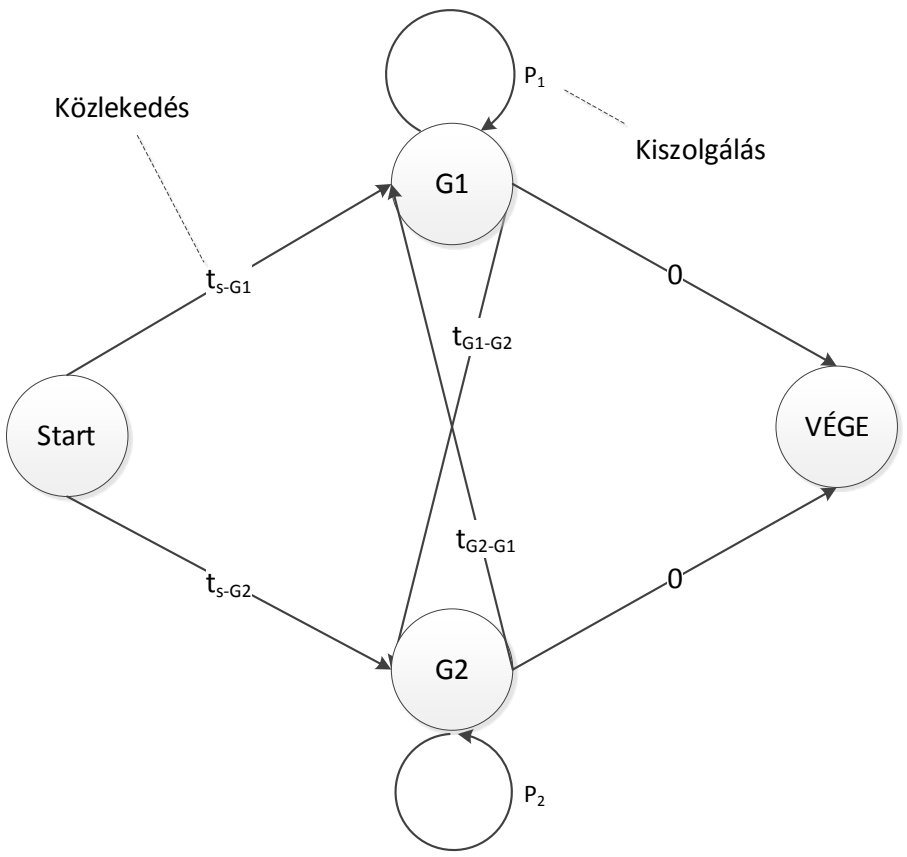
feladatok (tehát előrejelzésre kerültek, de a csere nem hajtható még végre, mert a láda nem teli vagy üres) akkor kerülnek bele a feladat listába, amikor a végrehajtás megkezdhető.

6.3 A probléma ábrázolása gráffal:

A döntés, hogy az egyes targoncák az egyes feladatokat milyen sorrendben hajtják végre, tehát veszik igénybe az útvonalakat. A kiinduló állapotban a targoncák a kiinduló helyen tartózkodnak, ahonnan közlekedési idő igénybevételével lehet megkezdeni a feladat végrehajtást. Az utolsó feladat befejezése után a targonca a befejezés helyén marad és várja a további utasításokat.

A probléma ábrázolására az irányított gráfos megjelenítés alkalmazható. Az irányított gráf az anyagmozgatást végző eszközök lehetséges fizikai mozgását modellezi: az élek jelképezik a helyváltoztatást, a csúcsok pedig a végrehajtási helyszíneket (kiindulási pont, kiszolgálandó eszközök helye). Tekintve, hogy a feladatok végrehajtási sorrendje nincs korlátozva, minden csúcsból mutat él minden csúcsba, kivéve a kiinduló állapotot és a végállapotot reprezentáló csúcsokat. A kiinduló állapotba (0) egyetlen él sem mutat, a végállapotba (N+1) mutató élek időszükséglete pedig 0 és csak oda mutatnak.

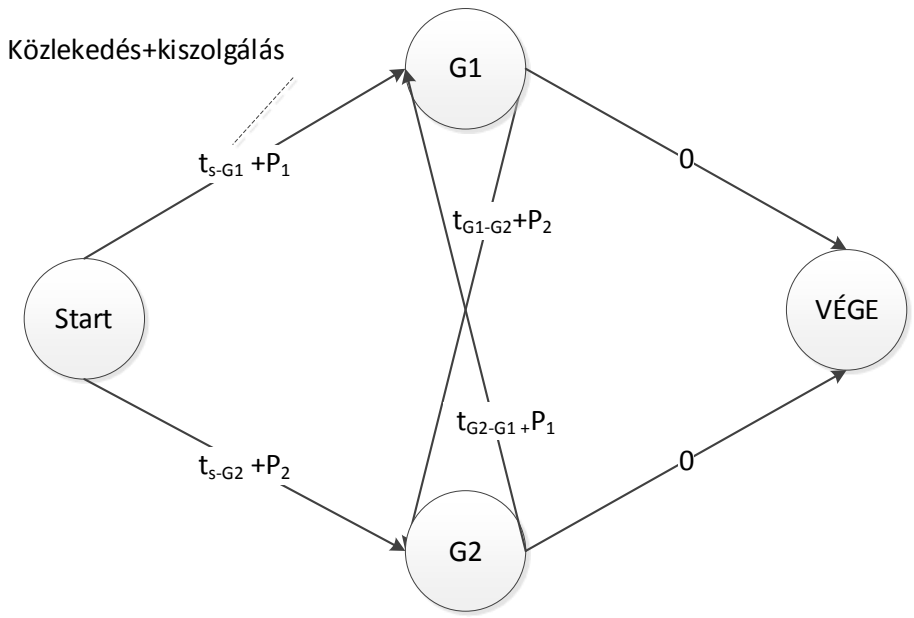
Tekintve, hogy azt feltételezem, hogy nem áll rendelkezésre hely a feladat előkészítésére, a targoncának először fel kell keresni a munkahelyet, el kell szállítani a kicserélendő rakatot, majd egy telit kell a munkahelyhez szállítania. Így a feladatot a munkahelyen kezdi meg és ott is fejezi be, bár a távolság mátrixban változtatás nélkül lehet szerepeltetni a feladat befejezés helyét is. Ezek alapján egy két feladatot tartalmazó feladatcsoport ábrázolása látható a 18. ábrán.



18. ábra. Két feladatból álló feladatcsoport gráfos ábrázolása, az élek a közlekedési és anyagmozgatási időszükségleteket, a csúcsok a helyszíneket reprezentálják. A feladat megkezdése az adott munkahelyen történik és ott is fejeződik be, ezért az hurokéllel kerül ábrázolásra. (Saját szerkesztés)

A kiindulópozícióból (*Start*) $t_{s\text{-}m1}$ idő alatt lehet eljutni az 1. feladat helyszínére (*M1*), míg $t_{s\text{-}m2}$ idő alatt a 2. feladat helyszínéhez (*M2*). A feladatok végrehajtásának időszükséglete P_1 és P_2. A feladatok a kiszolgálandó gépnél kezdődnek és ott is végződnek, ezért a fizikai mozgás leképezése során a kiszolgálás egy hurokél, ami ugyanannál a gépnél végződik, ahol kezdődik (P_1 és P_2).

Tekintve, hogy a munkahelyet csak akkor keresi fel a targonca, ha a feladatot végre is hajtja, és a feladat befejezési ideje az utazási idő és a végrehajtási idő összege, az ábrázolás során a közlekedési időt jelképező él értéke és a feladat végrehajtását jelképező hurokél értéke összeadható. Így gráfban a csúcsok közötti élek értékei az odautazás és a végrehajtás idejét tartalmazzák, a csúcsok pedig a kiszolgálandó gépeket reprezentálják. A feladatokat ilyen módon megjelenítő gráf ábrázolása a 19. ábrán látható.



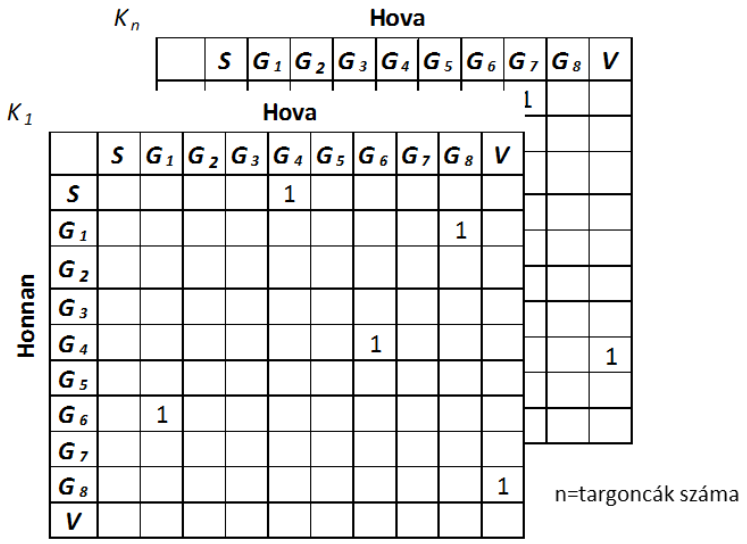
19.. ábra. A modellben alkalmazott gráf. Az gráfon az utazási idők és a végrehajtási idők egyetlen élen kerülnek megjelenítésre. (Saját szerkesztés)

Minden egyes csúcshoz hozzá van rendelve a végrehajtás határideje és a késedelem időarányos költsége. Ez alapján a gráf minden pontja elérhető minden ponton keresztül. Amennyiben több feladat merül fel, gráf korlátlanul bővíthető. Tekintve, hogy csak olyan feladat kerül a gráfba, ami megkezdhető, és nincsen kötött végrehajtási sorrend, ezért minden csúcsból minden csúcsba mutat él.

6.4 A meghozandó döntés

A probléma megoldás során meghozandó döntés, hogy az egyes targoncák az egyes feladatokat milyen sorrendben hajtják végre, tehát milyen úton járják be a gráfot a kezdőpontból (start) a végpontig (vége) A végpont egy virtuális hely, amit bármely pontból 0 idó alatt el lehet érni, és amihez nem tartozik se határidő, az utazási idő pedig 0.

A döntést egy mátrixszal lehet reprezentálni, ahol a sorértékek a honnan, az oszlopértékek a hova pontokat jelölik. Amennyiben több targonca is van, akkor a mátrix 3. dimenziója a targoncák száma. A mátrix elemei lehetnek 0, ha az adott útvonal nem kerül bejárásre és 1 ha azon végigmennek. A változó mátrixra példa a 20. ábrán látható.



20. ábra. Az egyes targoncák által az élek kiválasztását reprezentáló bináris mátrix (a könnyebb áttekinthetőség érdekében a 0-k nem merültek ábrázolásra, de az üres mezők 0 értéket tartalmaznak). (Saját szerkesztés)

6.5 A modellben alkalmazandó logikai feltételek:

Modell az alábbi logikai feltételek esetén működtethető helyesen.

- Csak olyan feladatokat tartalmazhat, melyek megkezdhetők.
- Minden feladatot végre kell hajtani
- Egy feladatot csak egyszer lehet végrehajtani, tehát minden csúcs csak egyszer érinthető.
- A feladatok végrehajtási sorrendjét úgy kell megválasztani, hogy az egymás után következő feladatok között legyen közvetlen kapcsolat.
- Amennyiben több targonca dolgozik, annak a targoncának kell befejezni a feladatot, amelyik elkezdte.
- Nem minden targonca tud minden feladatot végrehajtani, így azok nem minden utat tudnak bejárni.

Ezeket a korlátozásokat figyelembe szükséges venni a megoldás során.

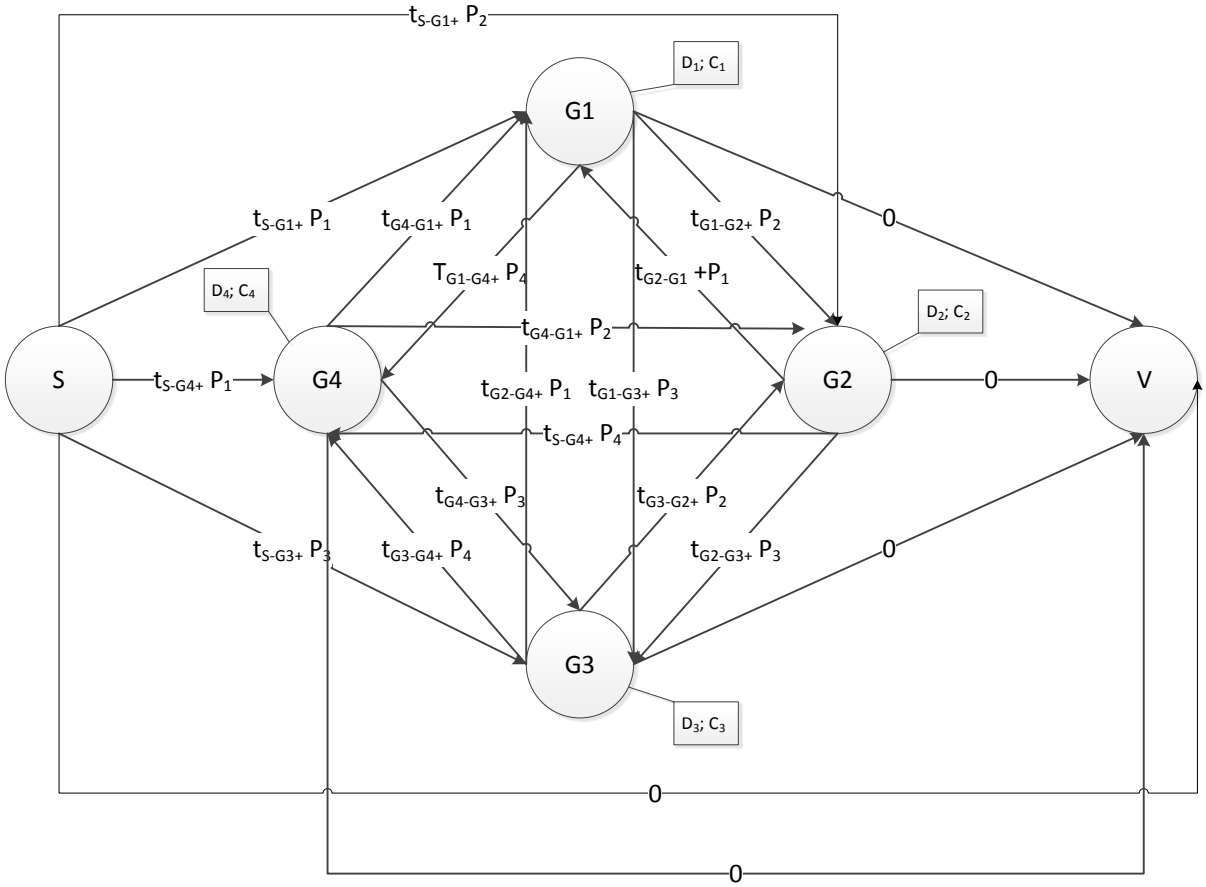
7. A műhelyrendszerű termelés logisztikai kiszolgálás optimalizálásnak MILP modellje.

A 6. fejezetben vázolt probléma megoldására kevert vegyes egészértékű lineári programozást (MILP) választottam, mert a bináris változók és a lineáris célfüggvény ezt lehetővé teszi.

7.1. A MILP modell

A matematikai modellt „N” számú feladatra és „k” számú kiszolgáló eszközre dolgoztam ki. A kiinduló állapotot, vagyis a rendszerben lévő feladatokat egy irányított gráf reprezentálja, ahol a csúcsok az egyes berendezések kiszolgálásának befejezését, az élek pedig az adott él végpontjában található berendezéshez történő utazás és a kiszolgálás idejének összegét jelentik.

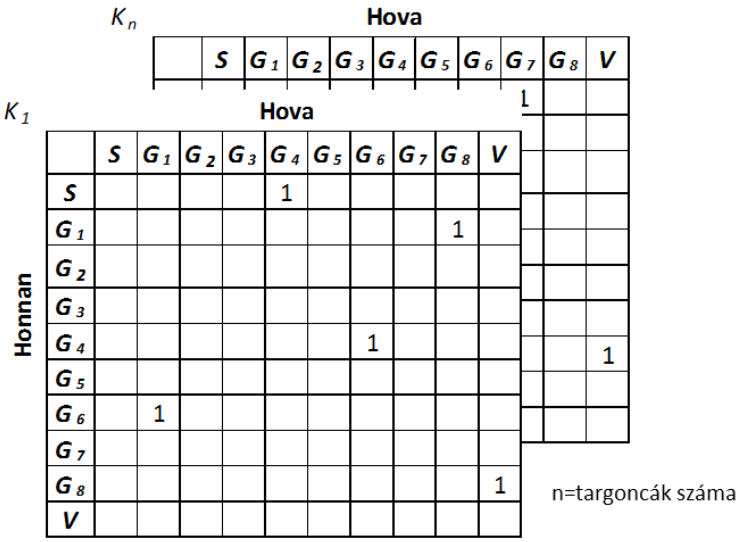
A feladat, hogy a gráf minden egyes, gép kiszolgálást jelentő csúcsa egyszer és csak egyszer bejárásra kerüljön. A kiinduló és az érkező csúcsokat minden targoncának be kell járnia. A feladatokat reprezentáló gráf a 21. ábrán látható.



11. ábra. 4 feladatot ábrázoló gráf a lehetséges bejárási útvonalakat jelentő élekkel. Az élek értékei az utazási és a végrehajtási időt jelentik. (Saját szerkesztés)

Ez a megközelítés megfeleltethető a többszörös utazóügynök problémának (multiply travel salesman problem, mTSP), A többszörös utazóügynök problémában az ügyfeleket több ügynök látogatja úgy, hogy minden ügyfelet csak egy ügynök keres fel úgy, hogy az összes betazott távolság minimális legyen [Bektas, 2006]. Az általam vizsgált probléma ehhez nagyon hasonló, kiegészítve a késések költségével, annyi különbséggel, hogy nem szükséges a visszatérés a kiinduló helyre.

A végrehajtási sorrendet egy háromdimenziós bináris változómátrixban lehet ábrázolni, ami megmutatja, hogy mely éleket melyik targoncák járják be (22. ábra). A mátrix első két dimenziója a kiinduló- és a befejező csúcsot reprezentálja, az egyes elemek pedig 0-át (nem járja be) vagy 1-et (bejárja) kaphatnak értékül. A mátrix harmadik dimenziójának értékei az egyes targoncáknak feletethetők meg. Minden targoncához egy „réteg" (egy kétdimenziós mátrix) tartozik, amit az ábrán „K_n" jelöl. Minden targoncának el kell jutnia a kiinduló csúcsból a befejező csúcsba. Ez a háromdimenziós bináris mátrix tartalmazza a keresett változókat. A feladat végrehajtásához minden pontot egyszer, és csak egyszer be kell járni, ezért a változómátrix sor- és oszlopösszegeinek pontosan 1-nek kell lennie, kivéve a kiinduló és az befejező csúcs esetében. A kiinduló csúcsot minden targoncának el kell hagynia, míg az befejező csúcsba minden targoncának meg kell érkeznie.



22. ábra. Az egyes targoncák által az élek kiválasztását reprezentáló bináris mátrix (a könnyebb áttekinthetőség érdekében a 0-k nem merültek ábrázolásra, de az üres mezők 0 értéket tartalmaznak). (Saját szerkesztés)

A megoldás során tekintettel kellett lennem arra is, hogy egyes targoncák nem feltétlenül képesek minden feladatot végrehajtani, amit azzal a korlátozással lehet modellezni, hogy az

ilyen feladatba vezető éleket az adott targonca nem választhatja. Emiatt létrehoztam egy, a változómátrixszal megegyező méretű kompetenciamátrixot, amiben 1-esek kerülnek hozzárendelésre azokhoz az útvonalakhoz, amiket az egyes targoncák bejárhatnak és 0 azokhoz, melyeket nem. Ugyancsak 0 jelöli azokat az útvonalakat, amik logikailag nem járhatók be, például az önmagukba vezetők, illetve a célból (*V*) közvetlenül a startba (*S*) vezető útvonalak. További korlátozás, hogy a mátrix főátlója 0, mert a csúcsokból önmagukba nem vezet út. A kiinduló állapotból (*S*) csak elfelé vezet út, míg a célállapotba (*V*) csak odafelé. (23.ábra)

K_n Hova

	S	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7	G_8	V
								0	1	1
								0	1	1
								0	1	1
								0	1	1
								0	1	1
								0	1	1
								0	1	1
								0	1	1
								0	0	1
								0	0	0

K_1 Hova

Honnan

	S	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7	G_8	V
S	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1
G_1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1
G_2	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1
G_3	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1
G_4	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1
G_5	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1
G_6	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1
G_7	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1
G_8	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1
V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

n=targoncák száma

23. ábra. Az egyes targoncák számára az egyes élek bejárását megengedő kompetenciamátrix. (Saját szerkesztés)

Az egyes feladatok esetében biztosítanom kellett, hogy az a targonca fejezze be, amelyik elkezdte. Ezt úgy lehet elérni, hogy annak a targoncának kell az adott csúcsot elhagyó élt is bejárni, amelyik a végrehajtást megkezdte, tehát a bemenő élt bejárta.

Paraméterek:

N: A kiszolgálásra váró gépek száma

K: A kiszolgálást végző targoncák száma

COM_{kij}: Kompetenciamátrix. Megmutatja, hogy a *k*. targonca végig tud-e menni az *i-j* élen (végre tudja-e hajtani a *j*. feladatot).

D_j: A *j*. gép kiszolgálásnak határideje.

P_j: A *j*. géphez tartozó feladat végrehajtási ideje.

C_j: A *j*. gép állásának fajlagos költsége.

t_{ij}: Az *i*. géptől a *j*. gépig történő közlekedés időszükséglete.

M: Nagy konstans

Változók:

X_{ij}: Bináris változó. Értéke 1, ha a targonca végig hajad az *i*. géptől a *j* géphez mutató élen (tehát az *i* után a *j* feladatot hajtja végre), és 0 ha ez nem kerül kiválasztásra.

S_j: A *j*. gép kiszolgálásnak kezdési ideje $(S_j \geq 0)$.

L_j: A *j*. gép állás ideje $(L_j \geq 0)$.

Korlátozások:

Az X_{kij} bináris változómátrixra vonatkozó korlátozások:

A változómátrix főátlójának értékei 0-k, ezek az útvonalak kizártak (1).

$$X_{kij} = 0 \;\; (0 \leq i, j \leq N); (1 \leq k \leq K); (i = j) \tag{1}$$

A változómátrix sorainak összege 1. Ezzel biztosítható, hogy minden géphez pontosan egy targonca érkezik meg (2).

$$\sum_{k=1}^{K} \sum_{i=0}^{N} X_{kij} = 1 \;\; (1 \leq k \leq K); (1 \leq i, j \leq N); (i \neq j) \tag{2}$$

Ha egy csomópontba a *k*. targonca bemegy akkor onnan ki is kell jönnie (3). Kivétel a kezdőpont, ahonnan csak elmegy, és a végpont, ahova csak érkezik.

$$\sum_{i=0}^{N+1} x_{kij} = \sum_{i=0}^{N+1} x_{kji} \;\; (1 \leq k \leq K); (1 \leq i, j \leq N); \; (i \neq j) \tag{3}$$

A kezdőpontot minden targoncának el kell hagynia (4) és a végpontba minden targoncának meg kell érkeznie (5).

$$\sum_{j=1}^{N+1} x_{k0j} = 1 \;\; (1 \leq k \leq K) \tag{4}$$

$$\sum_{j=N}^{N+1} x_{ki\,n+1} = k\ (1 \leq k \leq K) \tag{5}$$

A kompetenciamátrixban kizárt útvonalakat a *k*. targonca nem járhatja be, itt *Xkij* értéke csak 0 lehet (6).

$$x_{kij} \leq COM_{kij}(1 \leq k \leq K); (0 \leq j \leq N); (0 \leq i \leq N) \tag{6}$$

Az egyes feladatok kezdési ideje (7):

$$S_j \geq S_i + P_i + t_{ij} + M * \left(X_{kij} - 1\right)\ \ (1 \leq k \leq K; 0 \leq i \leq N;\ 0 \leq j \leq N; i \neq j) \tag{7}$$
$$S_j \geq 0$$

Ez a korlátozás a Miller-Tucker-Zemlin (MTZ) formula alapján [Miller et al. 1960] azt eredményezi, hogy ha az *i*. feladat után megyünk a *j*. feladathoz, akkor a *j*. feladat kezdési idejének mindenképpen nagyobbnak kell lennie, mint az *i*-dikének, így nem alakulnak ki olyan hurkok, amik önmagukba mutatnak.

Egyes gépek késése szintén egy változóval (L_j) kerül meghatározásra, amiknek az értékét a (8) egyenlet, mint korlátozás határozza meg.

$$L_j \geq S_j + P_j - D_j \quad (1 \leq i \leq N)$$
$$L_j \geq 0 \tag{8}$$

A célfüggvény az összes várakozási költség minimalizálása (9):

$$f_t(j) = \sum_{j=1}^{N} L_j C_j \rightarrow min. \tag{9}$$

[Ferenczi-Németh, 2018], [Ferenczi-Németh, 2019b], [Ferenczi-Németh, 2019e] [Ferenczi-Németh, 2021]

7.2. Numerikus példa

Az általam létrehozott, előző szakaszban ismertetett modell működését, az anyagmozgatási feladatok sorba rendezését és az összes várakozási költség, mint végeredmény kiszámításának folyamatát a következő egyszerű példán keresztül mutatom be. A példa 8 munkahelyet tartalmaz, melyek kiszolgálására két targonca áll rendelkezésre. A példa egy adott pillanat döntési problémáját modellezi, szükséges meghatározni, hogy az egyes munkahelyeket melyik targonca keresi fel annak érdekében, hogy a kiszolgálás befejezése után a teljes várakozási költség minimális legyen.

A példa kiinduló adatai (bemenő adatok) a 2. táblázatban láthatók. A táblázat a határidőt és a végrehajtási időt percben, a várakozási költséget pedig Ft/percben tartalmazza. A *COMj* oszlop mutatja, hogy az adott feladatot a rendelkezésre álló targoncák közül melyik tudja kiszolgálni (T_1 vagy T_2)

2. táblázat. A bemutatott példában szereplő bemenő paraméterek. (Saját szerkesztés)

N (gép száma)	D_j (perc)	P_j (Perc)	C_j (Ft/perc)	COM_j
G_1	10	7	450	T_1
G_2	9	5	100	T_1,T_2
G_3	17	6	1500	T_2
G_4	12	7	3800	T_1,T_2
G_5	10	5	600	T_1,T_2
G_6	14	6	2500	T_1
G_7	9	8	800	T_2
G_8	13	8	200	T_1,T_2

Az egyes munkahelyek közötti közlekedési időt mutatja a 3. táblázat

3. táblázat. Az egyes munkahelyek közötti közlekedési idők táblázata. A táblázatban szereplő értékek percben értendők. (Saját szerkesztés)

	Start	***G_1***	***G_2***	***G_3***	***G_4***	***G_5***	***G_6***	***G_7***	***G_8***	***Vége***
Start	0	1	0,5	0,8	1,2	1	1,5	2	1	0
G_1	0	0	2	1,5	1	2	3	2	1	0
G_2	0	1	0	2	4,5	2	2	0,5	1	0
G_3	0	0,5	1	0	1	1	4	2	0,5	0
G_4	0	1	2	2	0	3	1	1,4	3	0
G_5	0	4	2	1,2	3	0	3	2	2	0
G_6	0	1	3	3	1,2	2	0	2	2	0
G_7	0	0,5	1	1	1	5	1,2	0	5	0
G_8	0	1	2	2	2	3	2	2	0	0
Cél	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Az egyes targoncák által (T_1, T_2) végrehajtható feladatokat, másnéven a kompetenciamátrixot a 4. táblázat adja meg. (COM_j)

4. táblázat. Az egyes targoncák által végrehajtható feladatok mátrixa. (Saját szerkesztés)

	T_1	T_2
G_1	1	0
G_2	1	1
G_3	0	1
G_4	1	1
G_5	1	1
G_6	1	0
G_7	0	1
G_8	1	1

A modell futtatása GUSEK integrált fejlesztői környezetben [GUSEK] a GLPK solverrel [GLPK] történt. A futtatás során keletkezett és a 24. ábrán bemutatott kimenti file-ban látható, hogy a program először megoldotta egész értékű korlátozás nélkül a feladatot, majd a végén optimális egész értékű megoldást talált.

```
Model has been successfully generated
GLPK Integer Optimizer, v4.65
362 rows, 215 columns, 1108 non-zeros
198 integer variables, all of which are binary
Preprocessing...
179 rows, 147 columns, 740 non-zeros
130 integer variables, all of which are binary
Scaling...
 A: min|aij| =  1.000e+00  max|aij| =  3.000e+02  ratio =  3.000e+02
GM: min|aij| =  8.077e-01  max|aij| =  1.238e+00  ratio =  1.533e+00
EQ: min|aij| =  6.805e-01  max|aij| =  1.000e+00  ratio =  1.469e+00
2N: min|aij| =  5.000e-01  max|aij| =  1.172e+00  ratio =  2.344e+00
Constructing initial basis...
Size of triangular part is 179
Solving LP relaxation...
GLPK Simplex Optimizer, v4.65
179 rows, 147 columns, 740 non-zeros
      0: obj =   0.000000000e+00 inf =   8.259e+01 (16)
     28: obj =   0.000000000e+00 inf =   8.882e-16 (0)
OPTIMAL LP SOLUTION FOUND
Integer optimization begins...
Long-step dual simplex will be used
Gomory's cuts enabled
MIR cuts enabled
Cover cuts enabled
Number of 0-1 knapsack inequalities = 40
Clique cuts enabled
Constructing conflict graph...
Conflict graph has 102 + 4 = 106 vertices
+     28: mip =     not found yet >=              -inf        (1; 0)
Cuts on level 0: gmi = 7; mir = 8;
Cuts on level 19: gmi = 8; mir = 14;
+    306: >>>>>   1.599000000e+05 >=   0.000000000e+00 100.0% (20; 1)
Cuts on level 15: gmi = 8; mir = 19;
+    400: >>>>>   3.861500000e+04 >=   0.000000000e+00 100.0% (25; 2)
Cuts on level 17: gmi = 14; mir = 19;
+   2800: >>>>>   2.484000000e+04 >=   5.000000000e+02  98.0% (150; 27)
Cuts on level 27: gmi = 23; mir = 27;
+   6864: >>>>>   2.348000000e+04 >=   2.663010432e+03  88.7% (273; 100)
+  30659: mip =   2.348000000e+04 >=   1.151120000e+04  51.0% (648; 598)
+  45728: mip =   2.348000000e+04 >=     tree is empty   0.0% (0; 2891)
INTEGER OPTIMAL SOLUTION FOUND
```

24. ábra. A MILP megoldószoftver futtatás utáni kimeneti képernyője. Keretezve látható az üzenet, hogy a szoftver által talált egész értékű megoldás optimális.

(Saját szerkesztés)

A futtatás eredményét a 25. ábrán látható változómátrix tartalmazza. Az egyes feladatok végrehajtási adatai és a várakozási költségek az 5. táblázatban láthatók

K_1

Honnan \ Hova	S	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7	G_8	V
S					1					
G_1									1	
G_2										
G_3										
G_4							1			
G_5										
G_6		1								
G_7										
G_8										1
V										

K_2

Honnan \ Hova	S	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7	G_8	V
S								1		
G_1										
G_2										1
G_3						1				
G_4										
G_5			1							
G_6										
G_7				1						
G_8										
V										

25. ábra. Az optimalizáció eredményeképpen létrejött változómátrix. A táblázat a háromdimenziós mátrixot az átláthatóság kedvéért két kétdimenziós mátrixra bontva tartalmazza. A korlátozó feltételek biztosítják, hogy ugyanazt az útvonalat csak egy targonca tudja bejárni (könnyebb áttekinthetőség érdekében csak az 1-es értékek kerültek ábrázolásra, a 0k nem). (Saját szerkesztés)

5. táblázat. az egyes targoncák által elvégzendő feladatok és az így kialakuló várakozási költségek. (Saját szerkesztés)

Targonca	Sorrend	Feladat	D_j (perc)	P_j (Perc)	C_j (Ft/perc)	S_j	T_j	Befejezés ideje	L_j	$L_j \cdot C_j$
T_1	1.	G_4	12	7	3800	1,2	1,2	8,2	0	0
	2.	G_6	14	6	2500	9,2	1	15,2	1,2	3000
	3.	G_1	10	7	450	16,2	1	23,2	13,2	5940
	4.	G_8	13	8	200	24,2	1	32,2	19,2	3840
T_2	1.	G_7	9	8	800	2	2	10	1	800
	2.	G_3	17	6	1500	11	1	17	0	0
	3.	G_5	10	5	600	18	1	23	13	7800
	4.	G_2	9	5	100	25	2	30	21	2100

Az optimalizált sorrenddel a példában a teljes várakozási költség 23 480Ft.

Az általam kidolgozott módszerrel modellezhetők a műhelyrendszerű termelés anyagmozgatási feladatai, elvégezhető a feladatok optimális sorrendbe rendezése és a targoncához rendelése. [Ferenczi, Németh, 2021].

7.3 Összefoglalás és gyakorlati alkalmazhatóság

Kutatásom célja a műhelyrendszerű termelés körülményei között végzett operatív anyagmozgatás optimalizálása. A szakirodalmi kutatások alapján erre a problémára nem találtam egzakt megoldást, ezért a probléma megoldására alkalmas módszert kellett keresnem, amihez a problémához illeszkedő modellt kellett alkotnom. A kutatás során azokat az anyagmozgatási feladatokat vizsgáltam, melyek a gyártóberendezések közvetlen alapanyaggal történő ellátását, vagy a késztermék elszállítását jelentik. A termelési rendszer sajátosságának tekinthető, hogy a gyártóberendezés melletti anyagtároló területen valósul meg az alapanyag átadása és a késztermék átvétele, illetve a szállítás csak ládaegységben, anyagmozgató eszközzel valósítható meg. Továbbá, főleg a kis és közép vállalkozások esetében, a tárolóterületek mérete erősen korlátozott, ezért amennyiben csak egy ládának van hely, az utolsó alapanyag kiemelése után egy gyártási ciklusidő áll a logisztikai szervezet rendelkezésére a láda cseréjére. Ennek folyományaként a logisztikai kiszolgálást egy meghatározott határidőn belül el kell végezni, különben a gyártóberendezés megáll. A

problémát az jelenti, hogy a vizsgált termelési rendszerben a sok egymástól függetlenül működő, sokféle terméket gyártó berendezések kiszolgálását nem lehet menetrendszerűen szervezni, a logisztikai kiszolgálást végző szervezet minden pillanatban egyedi feladatstruktúrával szembesül.

Az operatív kiszolgálás minőségének mutatószáma a kiszolgálás hiánya miatti várakozási költség. Mivel a gyártóberendezések ebben a struktúrában meglehetős változatosságot mutatnak, az egyes gépek várakozásának gazdasági hatása jelentősen eltérő is lehet. A megoldás kidolgozás során feltételeztem, hogy rendelkezésre áll olyan valós idejű feladatmenedzselő rendszer, melyben a munkahelyekről az anyagmozgatási igények digitalizált formában kerülnek regisztrálásra, és ami a targoncák számára valós idejű anyagmozgatási utasítások küldésére alkalmas. A beérkező igényeket egy szoftver rendezi optimális végrehajtási sorrendbe és osztja szét a targoncák között a feladatokat. Az ehhez használt adatok:

- Az egyes feladatok határideje.
- Az egyes feladatokhoz tartozó gépek időarányos várakozási költsége.
- Az egyes feladatokhoz tartozó gépek közötti közlekedés időszükséglete, (a targonca a feladatot ott fejezi be, ahol elkezdte).
- Az egyes feladatokhoz előre meghatározott végrehajtási normaidők.
- Az egyes targoncák feladatvégző képessége (kompetenciája).

A cél, hogy minden feladat végre hajtásra kerüljön úgy, hogy az összes várakozási költség minimális legyen. Ezt a problémát a szakirodalmi kutatások alapján a legcélszerűbb irányított gráf formájában ábrázolni, ahol a csúcsok az egyes feladatok befejezett állapotát, a csúcsokhoz mutató élek pedig az odautazás és a végrehajtás idejét jelentik. Így minden egyes él egyedi értéket vesz fel, ami megfelel a valóságnak. Mivel a rendszerbe csak azok a feladatok kerülnek be, amelyek már megkezdhetők, minden csúcsból minden csúcsba el lehet jutni, tehát a megkezdés és a további végrehajtás sorrendje tetszőlegesen választható. Tekintve, hogy cél az összes csúcs bejárása anélkül, hogy egy csúcsot kétszer is érintenének, a probléma meglehetős hasonlóságot mutat a többszörös utazóügynök problémával, azzal a módosítással, hogy a cél nem a bejárás hosszának minimalizálása, hanem a bejárási sorrend miatti várakozási költségek minimalizálása. Ez a célfüggvény az ütemezési szakirodalomban súlyozott késésként (weighted tardiness) található meg.

A döntés, hogy az egyes targoncák mely csúcsokat milyen sorrendben keresik fel (hajtják végre a feladatokat), ennek megfelelően, a változó egy olyan háromdimenziós mártix, aminek az

egyik dimenziója, az, hogy melyik munkahelyről indul a targonca, a másik az, hogy hova érkezik (ezt a feladatot hajtja végre). A harmadik dimenzió az egyes targoncákhoz tartoznak (a harmadik dimenzió annyi „rétegből áll”, ahány targonca van). A változó bináris, azaz adott targonca az adott útvonalon végigmegy (1) vagy nem (0). Korlátozások, hogy egy csúcs csak egyszer kereshető fel, és az útvonalaknak csatlakozni kell egymáshoz. Az így megalkotott matematikai modellt vegyes egészértékű lineáris programozással (MILP) optimalizáltam, bár ugyan erre a célra használható lenne más módszer, például evolúciós algoritmus is. Sajnos a modell használhatóságát a gyakorlatban akkor lehet tesztelni, ha hasonló környezetben működő irányító rendszer kerül telepítésre. Ebben az esetben az alábbi előnyök várhatók:

- A valós idejű feladat- és végrehajtáskövetés lehetővé teszi a teljesítmény tényszerű elemzését.
- A valós idejű, elektronikus kommunikáció lehetővé teszi, hogy a targoncavezető nagyobb területet szolgáljon ki, ezáltal kevesebb targonca szükséges.
- A komplex optimalizálási feladatok számítógéppel történő megoldása jobb eredményt biztosít, mintha ugyan ezt emberek végeznék, erre az általam megalkotott MILP modell alkalmas.
- Az emberi tényező, mint bizonytalansági faktor, kikerül a döntési rendszerből.
- A dolgozókra— beleértve a vezetőket is — nehezedő stressz csökken, mert a feladatvégrehajtás ütemezése objektív, utólagosan elemezhető módon történik, amit számítógép végez.

Ezek folyományaként a műhelyrendszerű termelést alkalmazó vállalkozások jelentősen növelhetik a már meglévő, univerzális, ember vezette anyagmozgató eszközökre alapuló logisztikai rendszerük hatékonyságát.

7.4 Első tézis

Mixed Integer Linear Programming (MILP) alapú optimalizációs modellt alkottam a műhelyrendszerű termelésben végzett anyagmozgatással összefüggésben felmerülő teljes várakozásiköltség minimalizálására a feladatvégrehajtási sorrend meghatározásával.

A modell alapja egy olyan irányított gráf, ami a műhelyrendszerű termelés anyagmozgatási feladatait és a hozzájuk tartozó bejárható útvonalakat ábrázolja, a gráf élei a végrehajtási idő és a közlekedési idő összegét, míg a csúcsai a feladatok teljesülését reprezentálják.

A tézissel kapcsolatos saját publikációk:

Ferenczi B, Németh P: Funkcionális elrendezésű termelési rendszer logisztikájának automatizált irányítása in XIX. ENELKO – XXVIII. SzámOk Konferencia, Tusnádfürdő, Románia 2018 Október

Ferenczi B, Németh P. :Műhelyrendszerű termelés anyagmozgatásának optimalizálására alkalmazható stratégiák elemzése, In: Bihari, Erika; Molnár, Dániel; Szikszai-Németh, Ketrin (szerk.) Tavaszi Szél 2019 Konferencia = Spring Wind 2019: Konferenciakötet III. (2019) (a)

Ferenczi B, Németh P: Műhelyrendszerű termelés anyagmozgatásának optimalizálása lineáris programozás alkalmazásával In: Koncz, István; Szova, Ilona (szerk.) PEME XVIII. PhD - Konferencia : A PEME XVIII. PhD - Konferenciájának előadásai (2019) (b)

Ferenczi B, Németh P : Műhelyrendszerű termelés anyagmozgatási igényének meghatározása sorbanállási modell alkalmazásával In: Kreatív ipar-digitális gazdaság (2019) (c)

Ferenczi B, Németh P: Műhelyrendszerű termelés anyagmozgatási igényeinek sajátosságai. TÉR-GAZDASÁG-EMBER 2019 VII/2-3 145-161 (2019)

Ferenczi, B. ; Németh, P. Műhelyrendszerű termelés anyagmozgatásának optimalizálása In: Dr. Sebestyén-Pál, György; Dr. Szabó, Loránd; Dr. Biró, Károly-Ágoston (szerk.) ENELKO 2019 SzámOkt 2019 : XX. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia, XXIX. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia Kolozsvár, Románia : Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) (2019) pp. 159-164. , 6 p. (e)

Ferenczi B., Németh P.,: Műhely rendszerű termelés logisztikai kiszolgálásának automatizálási lehetőségei International journal of engineering and management sciences / műszaki és menedzsment tudományi közlemények (2498-700X): 5 1 210-221 (2020)

Ferenczi, B., Németh, P.: Műhelyrendszerű termelés anyagmozgatásának optimalizálása. In: Horváth, Balázs; Horváth, Gábor (szerk.) XI. Nemzetközi Közlekedéstudományi Konferencia Közlekedés a Járvány után: folytatás vagy újrakezdés” (2021)

7. Fuzzy szignatúra alapú priorizáció a műhelyrendszerű termelés logisztikájának irányításában.

7.1. A MILP-el végzett optimalizáció előnyei és hátrányai.

Az előző fejezetben bemutatott MILP modell alkalmas a műhelyrendszerű termelés logisztikai feladatinak ütemezésére, aminek eredményeképp elérhető a rendszer üzleti célja, tehát a kiszolgálandó termelő berendezések várakozásból fakadó költsége minimalizálható. A MILP, mint módszer alkalmazása biztosítja, hogy az így megtalált megoldás optimális lesz. Az általam megalkotott MILP modell így sikeresen alkalmazható, mint feladat ütemező módszer egy számítógéppel irányított anyagmozgatási rendszerben, amivel a hagyományos irányítás kiváltható.

A MILP (és más hasonlóan magas szakképesítést igénylő optimalizációs módszer) bevezetésének és működtetésének feltételei és hátrányai:

- Meg kell alkotni a rendszer modelljét. Ehhez olyan szakértő munkaerő szükséges, aki átlátja a logisztikai folyamatokat és a matematikai modell megalkotásához szükséges ismeretekkel és gyakorlattal is rendelkezik, vagy legalább képes ezt megvitatni az optimalizációt kidolgozó szakemberrel. A modellalkotás során a legnagyobb horderejű döntés, hogy a valóság mely tulajdonságait kell beépíteni a modellbe és melyek hagyhatók el. Ennek során figyelembe kell venni a kiválasztott megoldó módszer sajátosságait is.
- A modellt folyamatosan karban kell tartani. A modell csak akkor működik a célnak megfelelően, ha a valóság változásai folyamatosan átvezetésre kerülnek, például új munkahelyek üzembe állítása vagy az anyagmozgatási útvonalak akár időszakos változása esetén is módosítani kell a távolság és kompetencia mátrixokat. Folyamatosan értékelni kell a változások hatását a modellre, és amennyiben az olyan mértékű, előfordulhat, hogy a modellt az alapjaiban kell megváltoztatni (például új termelési rendszer kerül bevezetésre a vállalatnál). Az ezt a folyamatot végző szakember részértől jelentős szakértelemre, a modell és a modellalkotás alapos ismeretére és az üzleti folyamatokra történő alapos rálátásra van szükség ahhoz, hogy a rendszer alapját képező modell tényleg a modellezett valóságnak megfelelő legyen és betöltse a célját.
- A felhasználóknak meg kell érteni és el kell fogadni a modell által generált, számukra a számítógéptől kapott utasításként jelentkező megoldásokat. El kell fogadniuk, hogy a számítógép által kalkulált optimalizációs megoldás jobb, mint a néha az azzal ellentétes,

az ember által megszokásból, rutinból, tapasztalati úton meghozott döntés. Ehhez szükséges, hogy legalább alapvető szinten megértsék a rendszer működését és az optimalizáció módszerét, ami targoncakezelőktől nem feltétlenül elvárható. Arra is szükség van, hogy észrevegyék, ha a rendszer valamilyen okból nem megfelelő módon működik. Ez egy átlagos képzettségű felhasználók számára „fekete dobozként" működő rendszer esetében (mint amilyen például egy MILP alapú modell) fokozottan fennállhat. Ezek a gyakorlati végrehajtásban a módszer alkalmazásával szemben kétségeket támaszthatnak és ez oda vezethet, hogy adott esetben a dolgozók ignorálni fogják és saját hatáskörükben felülbírálják a rendszer által meghozott döntéseket.

- Mivel egy elektronikus anyagmozgatás-irányító rendszer esetében folyamatos és dinamikus kapcsolat van a munkahelyek, az irányító rendszer és a targoncák között, fontos a gyors válaszidő. Amennyiben az optimalizáció kalkulációs folyamata lassabb, mint a felhasználók számára még elfogadható válaszidő (3-5 s), a rendszer használhatósága megkérdőjelezhető. A MILP modellek futási idejét jelentősen befolyásolja a probléma összetettsége, ezért, eltekintve az egyéb korlátoktól, a gyakorlati alkalmazásuk csak abban ez esetben vezethet eredményre, ha a futási idő ezen belül tartható.
- A MILP modellek (és egyéb szofisztikált optimumkereső algoritmusok, mint pl. az evolutív algoritmusok) futtatására speciális megoldószoftverekre van szükség, melyeknek egyfelül jelentős költségvonzata lehet, másrészről pedig minden esetben jelentős szakértelmet igényel a programozásuk.

A fenti pontok közül különösen jelentősnek tartom a MILP modellek (vagy más szofisztikált optimumkereséséi eljárások, mint a GA) megalkotásához, működtetéséhez és karbantartásához szükséges speciális szakértelemigényt, illetve azt, hogy az átlagos felhasználó számára ezek működése nem áláthatóó. A szükséges szakértelem főleg a műhelyrendszerű termelést gyakran alkalmazó kis és közép-vállalkozások számára nem feltétlenül (gyakorlatilag a vállalatok elenyésző részénél) áll rendelkezésre, ráadásul ezek a vállalkozások nem minden esetben rendelkeznek az ilyen rendszerek bevezetésére és működtetésére alkalmas személyzet fenntartására szükséges fedezettel sem. Ezek miatt a MILP modellek (vagy más szofisztikált optimumkereséséi eljárások, mint a GA) elméletileg ugyan biztosítják a probléma optimális megoldhatóságát, de gyakorlati használatuknak, főleg kis és közép-vállalkozások esetében, erős korlátai vannak.

Mivel a gyakorlatban is használható módszert kerestem, egyszerűbben működtethető, „emberközelibb” optimalizálási megoldásokat kellett találnom. Tekintve, hogy a fuzzy logika működése sokkal közelebb áll a tényleges emberi gondolkodáshoz, megvizsgáltam a fuzzy rendszerek alkalmazásának lehetőségeit

7.3 A fuzzy szignatúra alapú algoritmus.

A fuzzy rendszerek különösen alkalmasak az emberi gondolkodási módszerek algoritmizált megvalósítására, ezért a módszer kialakítását úgy kezdtem, hogy megvizsgáltam, hogy egy létező vállalat targoncavezetői hogyan döntenek a hatáskörükben felmerülő ütemezési problémákban. Az üzem klasszikus műhelyrendszerű termelés folytat, kovácsolt alkatrészeket állít elő az autóipar számára kis és közepes sorozatokban. A termelési tevékenységek a következők: darabolás, kovácsolás, sorjázás, hőkezelés, szemcseszórás, minőségellenőrzés és csomagolás. A műveletek között az anyagok és félkész termékek ládákban (a szállítási egység a láda) áramlanak. A gyártási kapacitások nincsenek kiegyenlítve, és jelentős a termelés közbeni készlet szintje. Az egyforma termelési funkciót ellátó munkahelyekből fajtától függően egytől hat darabig terjedő mennyiség került telepítésre, és az is előfordulhat, hogy egy adott funkciójú munkahelyek mindegyike különböző terméket állít elő eltérő folyamatidőkkel és eltérő méretű szállítási egységekben. Ezért a targoncavezetőknek komoly hely- és termékismerttel kell rendelkezniük, hogy a termelési folyamatok aktuális állapota alapján sikeresen ütemezhessék a feladataikat. A targoncavezetők munkájának értékelését elsősorban a termelési tevékenység zavartalansága határozza meg. Az egyes targoncavezetők teljesítménye, megítélése jelentősen eltér egymástól. A jelenleg üzemelő munkaszervezési rendszerben a targoncavezetők részére kiadott munkautasítás az alábbiakat szabályozza:

- Működési terület
- Használható útvonalak és sebesség korlátozás
- Balesetvédelmi okokból tiltott helyek és feladatok (például túl szűk helyek, vagy gyenge padozat, illetve túl nehéz terhek)
- Területen elhelyezkedő munkahelyek kategorizálása (kiemelt és standard). A kategorizálás dinamikusan, akár napról napra is változhat, a termelési helyzet függvényében.
- Az egyes anyagmozgatási feladattípusokhoz tartozó utasítások (tárolási hely, tárolási mód, közlekedési útvonal, speciális információk).

Az, hogy a munkautasítás nem ad részletesebb instrukciókat, jól jelzi, hogy milyen nehéz pontos szabályrendszert felállítani a feladatok ütemezésére. Fókuszcsoportos interjú során megállapítottam, hogy a targoncavezetők saját módszert dolgoztak ki, ami több targoncavezető módszerét összegezve az alábbiak szerint írható le:

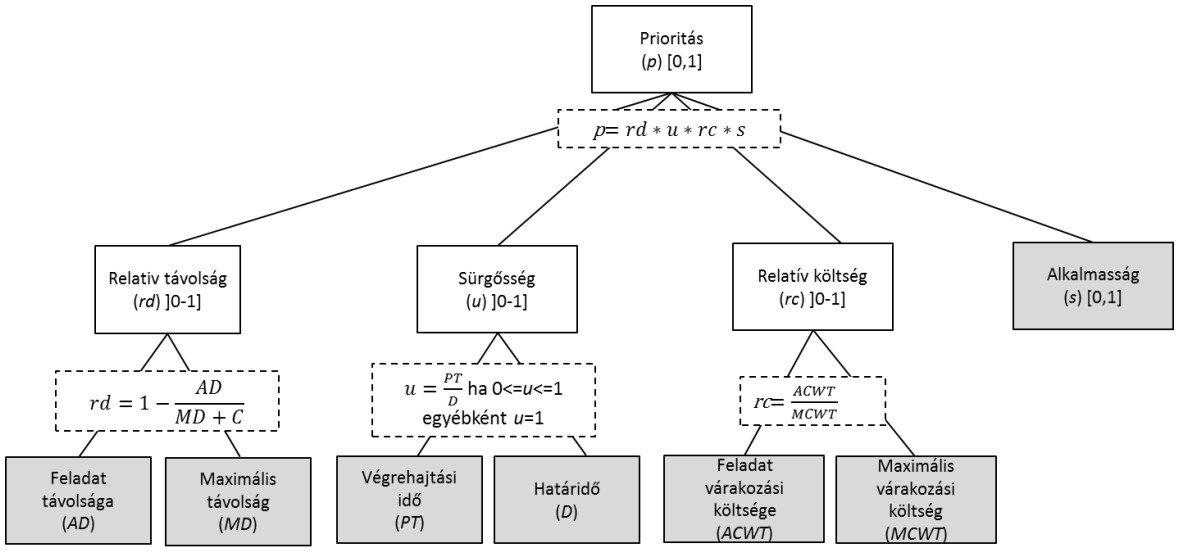
- A termelés folyamatos nyomon követésével a lehető leghamarabb fel kell ismerni, hogy melyik gépnél van kiszolgálásra váró anyagmozgatási feladat. (Nincs elektronikus feladatjelző vagy -kezelő rendszer).
- Ha a gyártóberendezés már nem termel (mert hiányzik hozzá az alapanyag, vagy megtelt a késztermékek tárolására rendelkezésre álló láda), azt kell elsőnek kiszolgálni.
- Ha több gép is áll, akkor a magasabb prioritásúval kell kezdeni. Ehhez a prioritáslistát használják, de sokszor döntő szempont az is, hogy azt a gépet szolgálják ki előbb, ahol több dolgozó kénytelen várakozni. Egyes esetekben — helytelenül — felülírják a prioritáslistát is.
- Ha még nem álltak meg a gépek, azt veszik előre, amelyik várhatóan hamarabb fog megállni (ez megfeleltethető az EDD szabálynak).
- Ha gépmegállás nincs belátható időn belül, akkor azt a feladatot hajtják végre előbb, amivel a lehető leggyorsabban lehet végezni (ez megfeleltethető az SPT stratégiának).
- És természetesen figyelembe veszik, hogy a targonca alkalmas-e a feladat végrehajtására.

Ez a módszer meglehetősen jól működik, amikor az anyagmozgatási kapacitás meghaladja a szükséges mértéket és gyakorlatilag a felmerülés pillaantában végre is hajthatók a feladatok. Ellenben, ha a terhelés mértéke eléri vagy meghaladja az anyagmozgatási kapacitást, a feladatok feltorlódhatnak és a targoncavezetők gyakorlatilag folyamatosan „tüzet oltanak”. Ebben az esetben érvényes a fent leírt összetett döntési folyamat, a targoncavezetők az ismert feladatokat szubjektív módon értékelik, és az általuk legmagasabb prioritásúnak vélt feladatot hajtják végre. Amennyiben ez megtörtént, újra értékelnek, majd az aktuális feladatok közül megint a legmagasabb prioritásút választják ki. Gyakorlatuk szerint nem terveznek előre, mert a kiszámíthatatlan, gyakran változó termelési helyzet miatt ez nem lehetséges. Ez alapján a targoncavezetők — mint szakértők — döntési módszere az ismert feladatok paramétereinek összehasonlításán alapuló priorizáció. A fent leírt szakértői tudást felhasználva fuzzy szignatúra alapú optimalizációs algoritmust alkottam. Ennek alapelve, hogy minden feladathoz hozzárendel egy priorizációs értéket, majd a legmagasabb értéket kapó feladatot jelöli ki végrehajtásra. Ez egy mohó algoritmusnak tekinthető, tehát a lehetőségek közül minden esetben

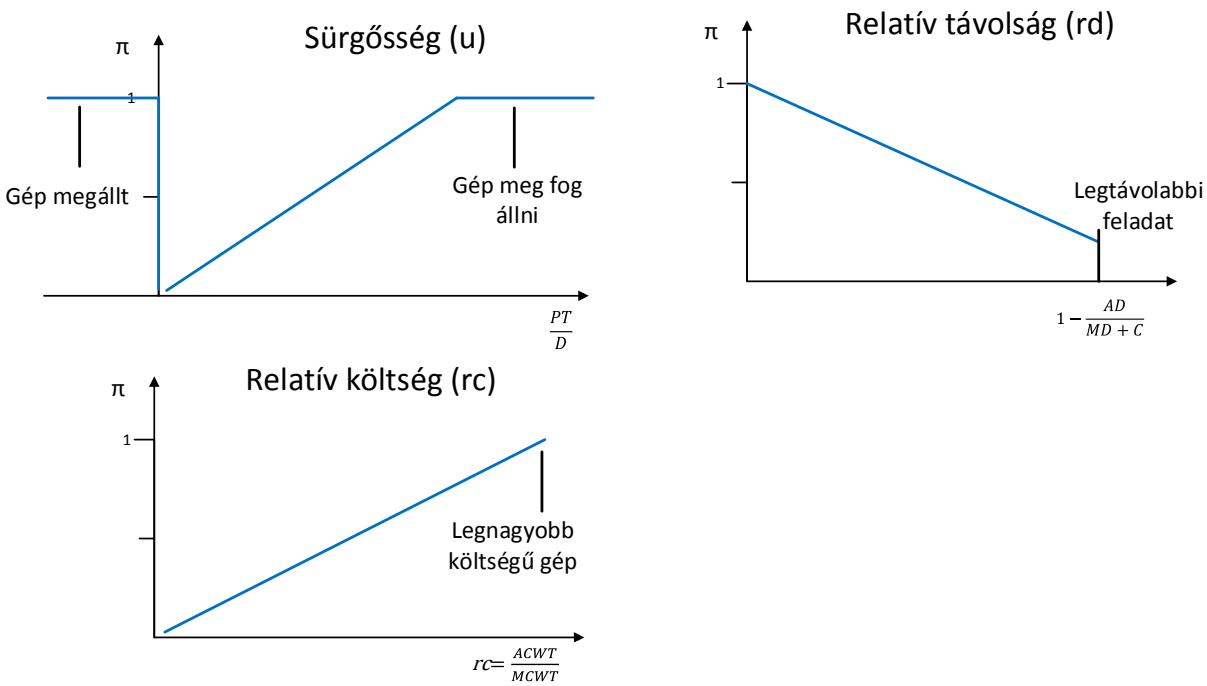
a legnagyobb haszonnal kecsegtetőt választja ki. A végrehajtást követően a módszer a megváltozott paraméterek alapján újraértékeli a feladatokat, melyek közül ismét a legmagasabb prioritásút választja ki. Az értékelés során alkalmazott paraméterek a következők (a témában megjelent publikációimhoz alkalmazkodva a paramétereket az angol megfelelőjük kezdőbetűivel jelölöm):

- A feladat távolsága. (Actual Distance: *AD*)
- A legtávolabbi feladat a csoportban. (Maximal Distance: *MD*)
- A végrehajtási idő. (Processing Time: *PT*)
- A határidő. (Deadline: *D*)
- Az adott feladathoz tartozó gép fajlagos várakozási költsége. (Actual Cost of Waiting Time: *ACWT*)
- A csoportban található legmagasabb fajlagos várakozási költség. (Maximal Cost of Waiting Time: *MCWT*)
- A feladat végrehajthatósága: az adott targonca végre tudja-e hajtani a feladatot vagy nem. (Suitability: *S*)

A prioritásérték meghatározására alkalmazott szignatúra és az aggregációs függvények a 26. ábrán láthatók. Az egyes feladathoz tartozó feladatok prioritásérték 0 és 1 közötti lehet. Az 1-es érték az elérhető legmagasabb prioritás, míg a 0-s érték a végre nem hajtandó (vagy hajtható) feladat prioritását jelenti. Az egyes származtatott értékekhez tartozó tagsági függvények a 27. ábrán láthatók.



26. ábra. Az egyes feladatokhoz tartozó prioritásértéket meghatározó fuzzy szignatúra struktúrája. (Saját szerkesztés)



27.. ábra. A 26. ábrán látható szignatúrában alkalmazott fuzzy tagsági függvények. (Saját szerkesztés)

Az első megvizsgálandó tulajdonság, a relatív távolság (*rd*) az egyes feladatok]0;1] tartományra transzformált távolságértéke, ahol a targoncától legmesszebbi feladat relatív távolságértéke kis (*C*-nyi) értékkel tér el a 0-tól. A transzformáció során a legtávolabbi feladat kapja a legkisebb, a legközelebbi pedig a legnagyobb értéket. Ezzel a módszerrel modellezhető a targoncavezetők döntési módszere, miszerint a közelebbi feladatok elvégzése időben megelőzi a távolabbiakét. A relatív távolság (*rd*) értékének számítás. A (10) számú egyenlet szerint történik.

$$rd = 1 - \frac{AD}{MD + C} \mid rd \in]0,1] \tag{10}$$

ahol *AD* az éppen vizsgált feladathoz tartozó távolság, *MD* a feladathalmazban található maximális távolság, *C* pedig egy módosító. A képletben szereplő *C* egy kisértékű konstans, ami biztosítja, hogy a legtávolabbi feladat ne 0 értéket kapjon a kalkuláció során, mert ezzel a $p=rd \cdot u \cdot rc \cdot s$ művelet eredménye is 0 lenne, ami miatt a feladat soha nem kerülne elvégzésre.

A sürgősség (urgency, *u*) esetemben a feladat végrehajtási idejének és határidejének viszonya (11). Azonosan *u*=1 értéket kap egy feladat, ha a hozzá tartozó gép már megállt ($D \leq 0$), vagy a végrehajtási idő (*PT*) és a határidő (*D*) egymáshoz viszonyított aránya alapján biztosan meg fog állni, még akkor is, ha azonnal megkezdik a kiszolgálását (ennek feltételét tartalmazza a (12) egyenlet).

$$u = \max\left(\frac{PT}{D}, 1\right) \mid u \in]0,1] \tag{11}$$

$$\frac{PT}{D} \leq 1 \tag{12}$$

Az *u* értéke kifejezi, hogy „mennyire sürgős” a kiszolgálás végrehajtása. Alacsony érték esetén jelentős a tartalékidő, magas (egyhez közeli) érték esetén pedig minél előbb meg kell kezdeni a kiszolgálást, hogy a gép megállása elkerülhető legyen.

A relatív költség (relative cost: *rc*) kalkulációja során az kerül számszerűsítésre, hogy az egyes feladatok várakozási költsége hogyan viszonyul a többi feladat várakozási költségéhez. A kalkuláció során a feladathalmazban található, legmagasabb várakozási költségű géphez tartozó feladat kap 1-es értéket (*MCWT*), a többi feladat relatív költsége pedig a tényleges költségének (*ACWT*) aránya ehhez képest (13).

$$rc = \frac{ACWT}{MCWT} \mid rc \in 0,1] \tag{13}$$

A prioritásérték (priority, *p*) az ágak értékeinek szorzataként áll elő. Ezzel biztosítható, hogy amennyiben a végrehajthatóság (suitability: *S*) 0, tehát a feladat nem hajtható végre az adott

targoncával, akkor a feladat prioritásértéke is 0, így nem kerülhet kiválasztásra [Ferenczi, et al., 2021], [Ferenczi, Lilik 2022a], [Ferenczi, Lilik 2022b], [Ferenczi, et al., 2022a]

Az algoritmusban alkalmazni szükséges továbbá az alábbi szabályokat is:

- Amennyiben több targonca is egyidőben szabad, mindig az választ elsőnek feladatot, amelyik kompetencia mátrix alapján a választható feladatok közül a legkevesebb feladat végrehajtására képes. Ezzel csökkenthető annak veszélye, hogy az egyik targoncának elfogyjanak a választható feladatai, a másik pedig túl legyen terhelve. Amennyiben a választáskor mindkét targonca ugyanolyan kompetenciákkal bír, akkor az alapértelmezett targonca választ elsőnek.
- Amikor a kiválasztott targoncához rendelhető feladatcsoport összeállításra kerül, csak azok a feladatok maradhatnak benne és kerülnek kiértékelésre, amit az adott targonca el tud végezni. Például, ha legmagasabb várakozási költségű feladatot az éppen feladatot választó targonca nem tudja végrehajtani, ezt a relatív költség meghatározása során nem lehet felhasználni.
- A fuzzy szignatúra akkor használható helyesen, hogyha a feladatok határidőjében és végrehajtási idejében nincsen jelentős, nagyságrendi eltérés. Például kerülni kell az olyan feladatok összehasonlítását, ahol az egyiknek a végrehajtása perces nagyságrendű, a másiké pedig napokba vagy hetekbe telik (ez elméletileg az üzemi körülmények között nem is lehetséges, de általános célú felhasználásnál ezt figyelembe kell venni).
- Amennyiben egy algoritmuson belül kettő vagy több feladathoz azonos prioritás érték kerül meghatározásra, az algoritmus véletlenszerűen választ ezek között.

7.4 Numerikus példa logisztikai feladatok fuzzy szignatúra alapú priorizálására.

Az általam javasolt algoritmus működésének könnyebb megértése érdekében a következőkben bemutatok egy számítást melyben meghatározásra kerülnek egy feladatcsoport egyes feladatinak prioritásértékei (p). A példában szereplő feladatok adatai a 8. táblázatban láthatók. A példában használt adatok ebben az összetételben mesterségesek (a vizsgált üzemben nem áll rendelkezésre feladatmonitoring rendszer), de az értékek a valós környezet alapján kerültek meghatározásra (6. táblázat).

6. táblázat. A számítási példa feladatainak adatai a kiinduló állapotban. (Saját szerkesztés)

Feladat sorszáma	Határidő (*D*) (min)	Végrehajtási idő (*PT*) (min)	Várakozsái költség (*ACWT*) (HUF/min)	Végrehajthatóság K1	Végrehajthatóság K2
G1	11	1	10000	1	0
G2	2	3	7000	1	1
G3	8	3	7000	0	1
G4	10	2	8000	1	1
G5	4	3	6000	1	1
G6	7	4	5000	1	0
G7	6	4	9000	0	1
G8	9	3	6000	1	1

Az egyes feladatok végrehajtási helyei közötti közlekedési idők a 9. táblázatban láthatók.

7. táblázat. Az egyes feladatok végrehajtási helyei közötti utazásiidő mátrix. (Saját szerkesztés)

		Hova							
		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
Honnan	Start	1	1	1	2	3	5	2	3
	G1	***0***	3	4	4	3	1	5	5
	G2	5	***0***	3	2	1	5	4	4
	G3	1	3	***0***	1	3	1	2	1
	G4	3	3	2	***0***	3	5	4	3
	G5	4	2	2	3	***0***	5	2	3
	G6	1	3	2	4	3	***0***	2	3
	G7	1	5	3	3	4	2	***0***	5
	G8	1	2	2	3	3	4	2	***0***

Az algoritmus működési elve, hogy az éppen szabad targonca az összes rendelkezésre álló feladat prioritását kiértékeli és megkezdi a legmagasabb prioritásértéket elérő feladat végrehajtását. Amikor azzal végez, újra értékeli az akkor aktuálisan meglévő feladatokat. Ezt a targoncákat vezérlő központi rendszer egyesével végzi el minden targoncára, miközben minden targonca ugyanabból a feladathalmazból választ feladatot. Az elvégzett feladatok kikerülnek a halmazból, az időközben felmerülő új feladatok pedig bekerülnek a halmazba, így minden döntés egyedi körülmények között történik.

A következő egyszerű példában 8 feladatot összesen 2 targonca végez el. A számításokat két targoncára végeztem úgy, hogy mind a 8 feladat elvégzésre került, de mivel a számítás módja minden döntési esetben azonos, itt csak a legelső feladatválasztást mutatom be (ez látható a 8. táblázatban), majd közlöm az összes számítás eredményeképp létrejött feladatvégrehajtási sorrendet és a várakozási idők miatt előálló várakozási költséget (9. táblázat).

A 8. táblázat tartalmazza az első (*K1*) targonca számára elvégzett prioritásszámítások kiinduló adatait és eredményeit (a számításhoz használt összefüggések a 26. ábrán megtalálhatók). Mivel a *G3* és *G7* jelű feladatokat *K1* nem képes ellátni, számára ezek végrehajthatósága, emiatt prioritása is 0. A legmagasabb prioritást a *G2* jelű feladat kapja, emiatt *K1* azt választja és hajtja végre.

8. táblázat. Az első iteráció során a K1-es targoncához rendelhető feladatok prioritás értékeinek kalkulációja. (Saját szerkesztés)

Feladat sorszáma	Feladat távolsága (AD)	Maximális távolság (MD)	Relatív távolság (rd)	Határidő (D)	Végrehajtási idő (PT)	Sürgősség (u)	Feladat várkaozási költsége (ACWT)	Maximális várakozási költség (MCWT)	Relatív költség (rc)	Végrehajthatóság K1 targonca	Prioritás érték (p)	Kiválasztás
G1	1	5	0,8	11	1	0,09	10000	10000	1,00	1	0,076	
G2	1	5	0,8	2	3	1,00	7000	10000	0,70	1	0,583	I
G3	1	5	0,8	8	3	0,38	7000	10000	0,70	0	0,000	
G4	2	5	0,7	10	2	0,20	8000	10000	0,80	1	0,107	
G5	3	5	0,5	4	3	0,75	6000	10000	0,60	1	0,225	
G6	5	5	0,2	7	4	0,57	5000	10000	0,50	1	0,048	
G7	2	5	0,7	6	4	0,67	9000	10000	0,90	0	0,000	
G8	3	5	0,5	9	3	0,33	6000	10000	0,60	1	0,100	

Miután K1 választott, K2 következik. A számítások K2 esetén is azonosak az előzőkben bemutatottokkal, bár két különbség van: mivel K1 már kiválasztotta és megkezdte a G2 feladat végrehajtását, az kikerül a végrehajtandó feladatok halmazából, a maradék feladatok végrehajthatósági adatai pedig a K2 jelű targonca képességei szerint megváltoznak. Miután K2 is választ, a folyamat addig ismétlődik, míg a feladathalmaz üressé nem válik, azaz az összes feladat elvégzésre nem kerül.

Bár a választás mindig pillanatnyi döntés, a folyamat végén előáll egy végrehajtási sorrend. A 9. táblázat ezt a sorrendet tartalmazza a befejezési és a várakozási időkkel, valamint az egyes feladatokhoz tartozó időegységre jutó és a végrehajtási sorrendből eredő teljes várakozási költségekkel.

9. táblázat:. A feladatok targoncához rendelése és végrehajtási sorrendje, illetve az ez alapján kalkulált várakozási idők és teljes várakozási költség. (Saját szerkesztés)

Iteráció	Végrehajtó targonca	Feladat	Feladat befejezési ideje	Határidő (D)	Várakozás ideje	Feladat várakozási költsége (ACWT)	Teljes várakozási költség
1.	K1	G2	4	2	2	7000	14 000
2.	K2	G7	6	6	0	9000	0
3.	K1	G5	8	4	4	6000	24 000
4.	K2	G3	12	8	4	7000	28 000
5.	K1	G4	13	10	3	8000	24 000
6.	K2	G8	16	9	7	6000	42 000
7.	K1	G1	17	11	6	10000	60 000
8.	K1	G6	22	7	15	5000	75 000
							267 000

Az feladatcsoport fuzzy szignatúra alapú algoritmussal történő sorba rendezésével a teljes várakozási költség 267 000HUF. Próbaképpen ugyanezt a feladatcsoportot a MILP alapú modellel is sorba rendeztem. A MILP modell alkalmazásával sorba rendezve a teljes várakozási költség 243 000HUF. [Ferenczi, Lilik, 2022b]

7.5 Az algoritmus hatékonyságának elemzése.

Az algortimus hatékonyságát az mutatja meg, hogy a sorba rendezést követően a várakozási költség mennyire haladja meg a lehetséges legjobb megoldásal elérhetőt. Ezért kísérleteket végeztem annak érdekében, hogy megállapítsam, milyen mértékben tér el a MILP-el kapott matematikai optimumhoz képest a fuzzy szignatúra alapú optimalizáció által kapott várakozási költség. Tekintve, hogy nagy mennyiségben nem állnak rendelkezésre valós anyagmozgatási feladatcsoportok adatai, a tesztelést a helyszínen mért, így valós adatok fiktív, véletlenszerűen kombinációiból kialakított forgatókönyveken végeztem el. Összesen 10 forgatókönyvet használtam, ezek adatai az 1. számú mellékletben találhatók. Minden forgatókönyv 8 feladatot tartalmaz (G_1-G_8) és két targonca között lehet elosztani őket (K_1-K_2). Az utazásiidő mátrix minden forgatókönyv esetében azonos (mivel a helyszín azonos). Az egyes forgatókönyvekhez

tartozó eredmények várakozási költségét MILP és fuzzy szignatúra alapú optimalizációval is meghatároztam, aminek az eredményei a 10. táblázatban láthatók.

10. táblázat. A MILP és a fuzzy szignatúra alapú algortimussal meghatározott teljes várakozási költségek összehasonlítása. (Saját szerkesztés)

Forgatókönyv	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	Átlagos eltérés (%):
Teljes várakozási költség (MILP) HUF	237 000	234 000	243 000	239 000	230 000	201 000	242 000	203 000	228 000	240 000	
Teljes várakozási költség (Fuzzy) HUF	326 000	265 000	267 000	323 000	289 000	211 000	313 000	229 000	228 000	266 000	
Eltérés (%)	37,6%	13,2%	9,9%	35,1%	25,7%	5,0%	29,3%	12,8%	0,0%	10,8%	**17,9%**

A módszerek eredményeinek összehasonlítását a (13) számú egyenlet alkalmazásával végeztem.

$$D = \frac{TC_{\mathrm{F}} - TC_{\mathrm{M}}}{TC_{\mathrm{F}}} \cdot 100\% \tag{13}$$

ahol *D* az eltérés, *TC* a teljes várakozási költség, F utal a fuzzy szignatúra alapú, M pedig a MILP alapú modell eredményére.

A tíz forgatókönyv esetén a fuzzy szignatúra alapú optimalizáció átlagosan 17,9%-kal magasabb várakozási költséget eredményez, mint a MILP alapú.

Az általam kidolgozott fuzzy szignatúra alapú algoritmus egy mohó algoritmus, amely lokális optimumra törekszik a döntések meghozatala során. A mohó algoritmus minden lépésben a legjobb rövid távú döntést hozza meg, anélkül, hogy figyelembe venne a hosszú távú következményeket vagy az összes lehetséges lehetőséget. Ezért egyszerű és gyors, de nem minden esetben adja a legjobb megoldást [Cormen, et al, 2022]. A módszer eredményességét elsősorban a szakirodalomban található hasonló, prioritás alapú kiválasztási szabályokhoz hasonlítottam, mert az egyik legfőbb cél az egyszerű kezelhetőség volt és az átláthatóság volt.

Kanet és társai [Kanet, et al, 2004] kutatásai során számos, súlyozott késés minimalizálásra alkalmazott prioritás alapú kiválasztási szabályt hasonlított össze, és arra jutott, hogy az általuk módosított (Weighted Modified Due Date', WMDD szabály hatékonyan teljesít a korábban kidolgozott egyéb szabályokhoz képest

A WMDD szabály egyenlete (14).

$$WMDD_i = \frac{\max\{P_j, d_j - t_j\}}{C_j} \tag{14}$$

Ahol

P_j: A *j*. géphez tartozó feladat végrehajtási ideje.

d_j: A *j*. gép kiszolgálásnak határideje.

t= az aktuális idő (ez esetben 0)

C_j= az adott feladat késési költsége

A kiválasztás során a legalacsonyabb értékkel rendelkező feladatot kell először végrehajtani.

Pickart és társai szimulációs eljárásokkal keresték a súlyozott késés problémájára a legjobban teljesítő szabályokat. és ennek során a WMDD az első helyeken volt [Pickhart et al, 2010], ezért a fuzzy szignatúra alapú algoritmus hatékonyságát ehhez mérem. Természetesen léteznek hatékonyabb, mohó algoritmuson alapuló megoldások is például [Helsgaun, 2009], de azok összetettsége miatt a gyakorlati alkalmazás során hasonló problémák merülhetnek fel, mint a MILP alapú módszer esetében, ezért ezeket a vizsgálat során nem vettem számításba.

A vizsgálatot ezen kívül elvégeztem más ismert és az ipari gyakorlatban is előforduló prioritásalapú kiválasztási stratégiákra is (EDD, SPT, HP, RND):

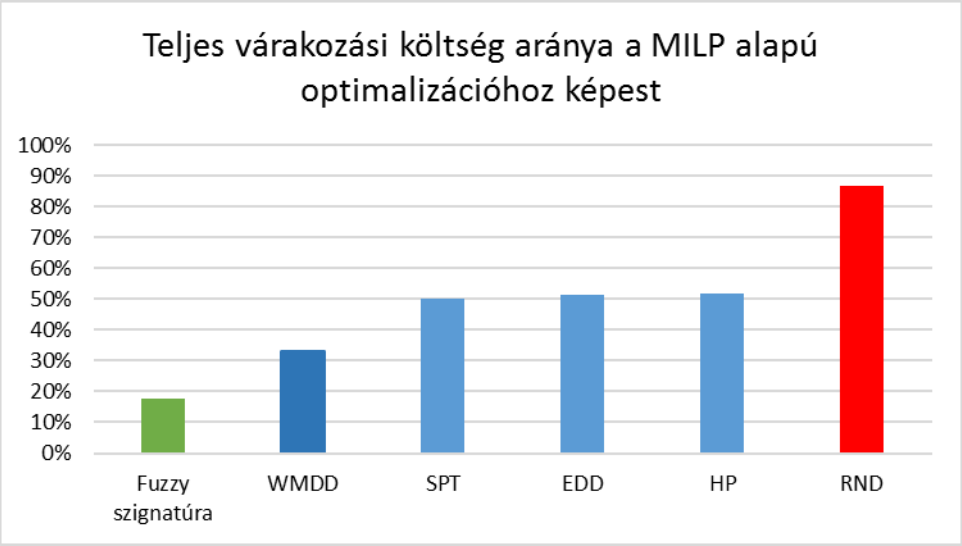
- EDD: a legközelebbi határidejű feladat kerül kiválasztásra.
- SPT: a legrövidebb végrehajtási idejű feladat kerül kiválasztásra.
- HP (highest priroty): a legmagasabb prioritású feladat kerül kiválasztásra. (Ebben az esetben a prioritás nem a MILP- vagy Fuzzy szignatúra alapú modell által meghatározott prioritást jelenti, hanem a minden esetben a legmagasabb várakozási költségű (fontosságú) feladat kerül elsőnek kiválasztásra.
- RND: véletlenszerű kiválasztás. Ez a kiválasztási szabály azt a helyzetet szimulálja, amikor a képzés és helyismeret nélküli targoncavezető dönt, tehát amikor a jóindulatú, de tapasztalat nélküli munkavégzéssel elérhető legrosszabb eredmény várható.

Az eredményeket a már leírt MILP alapú módszerhez viszonyítva tartalmazza a 11. táblázat.

11. táblázat. Különböző sorbarendezési módszerek esetén elérhető átlagos várakozási költségek százalékos eltérése a MILP módszerrel elérhető várakozási költségtől növekvő sorrendben. (Saját szerkesztés)

Optimalizációs módszer	Eltérés (%)
Fuzzy szignatúra	17,90%
WMDD	33,20%
SPT	50,20%
EDD	51,30%
HP	51,70%
RND	87%

Az eredményeket grafikonon ábrázolva (28. ábra) jól látható, hogy a fuzzy szignatúra alapú algoritmus jobb eredményt ad, mint az egyszerű prioritás alapú szabályok és jelentősen jobbat, mint a véletlenszerű kiválasztás. [Ferenczi, et al., 2021], [Ferenczi, et al., 2022a].



28. ábra. A különböző feladatkiválasztási stratégiák eredményének eltérése a MILP modell eredményétől. (Saját szerkesztés)

7.6 A fuzzy szignatúra alapú algoritmussal végzett optimalizáció előnyei

A fuzzy szignatúra alapú algoritmussal végzett optimalizáció kialakítása és alkalmazása az alábbi előnyökkel jár:

- **A fuzzy szignatúra megalkotása nem igényel speciális ismereteket.** A szignatúra csak egyszerű matematikai műveleteket és „ha” függvényeket tartalmaz. Alapszintű matematikai ismeretek birtokában követhető az iterációs folyamat és érthető, elemezhető az eredmény.
- **Nem igényel speciális szoftvert.** Az algoritmus akár MS EXCEL környezetben, makrók alkalmazása nélkül is kialakítható és futtatható. Noha a gyakorlati alkalmazás

valószínűleg célirányosan megírt programot igényelne, ez mutatja, hogy szemben a MILP alapú optimalizáció speciális szoftverigényével mennyivel egyszerűbb a módszer alkalmazása.

- **Átláthatóság.** A fuzzy szignatúra a helyi szakértők tudására építve lett kialakítva, azt tartalmazza, így a működésének megértése, döntéseinek elfogadása nem ütközik akadályba. Emellett a helyi szakértők bevonása is könnyebb a tényleges működés kialakításába és fejlesztésébe.
- **Rugalmasság.** Köszönhetően az átláthatóságának és egyszerűségének, a szignatúra könnyen és gyorsan módosítható, fejleszthető.
- **Futási idő.** Az excellel végzett fuzzy szignatúra alapú algoritmussal végzett optimalizáció gyakorlatilag azonnali (nem érzékelhető válaszidejű) eredményt biztosított a korlátozott számú alapműveletnek köszönhetően. Ez azt jelenti, hogy célszoftver alkalmazása esetén jóval összetettebb feladathalmaz esetén is rövid végrehajtási időre van szükség.

A fuzzy szignatúra alapú megoldás ugyan az optimumtól eltérő eredményt biztosít, de jobbakat, mint az iparban elterjedt módszerek, így a felsorolt előnyöket figyelembe véve reális alternatívája az eddig ismert optimumkereső módszereknek a műhelyrendszerű termelés logisztikai kiszolgálásnak ütemezésében. [Ferenczi, et al., 2022a].

7.7 Második tézis

A műhelyrendszerű termelés logisztikai kiszolgálásának ütemezésére szakértői tudásra épített fuzzy szignatúra alapú priorizációs algoritmust hoztam létre. Az algoritmus bemeneti adatai, a végrehajtási idő, a feladat végrehajtásához szükséges utazási távolság, a feladat határideje és a kiszolgálandó berendezés állásköltsége (várakozási költség, azaz a berendezés gazdasági jelentősége). A rendszer paraméterei és az azok közötti függési viszonyok alapján fuzzy szignatúrát hoztam létre, amivel az algoritmus meghatározza az egyes feladatok fontosságát.

Megmutattam, hogy az általam létrehozott modell hatékonysága az optimális eredményt adó MILP és a szakirodalomban található egyszerű ütemezési módszerek között helyezkedik el.

A tézishez tartozó saját publikációk:

Ferenczi, B., Koczy, L. Lilik, F.. Fuzzy signature based model in material handling management, ESCIM 2021 Book of abstracts (2021)

Ferenczi, B., Lilik, F.: Fuzzy Signature Based Organization of the Material Handling, in Functional Production Systems, TÉR-GAZDASÁG-EMBER (2064-1176): 9 3-4 145-158 (2021)

Ferenczi, B., Lilik, F.: Soft Computing Aided Material Handling For Functional Production System, Logisztikai Évköny 2022, Magyar Logisztikai Egyesület, Budapest. (b)

Ferenczi, B., T. Kóczy, L., Lilik, F.: Fuzzy Signature Based Model in Material Handling Management. , In Computational Intelligence and Mathematics for Tackling Complex Problems 4 (pp. 169-179). Cham: Springer International Publishing. (2022).

8. Üzemi állapot meghatározása

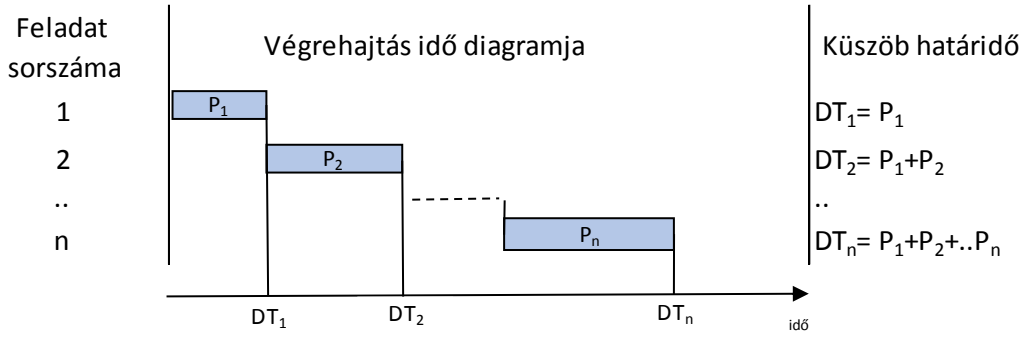
A fuzzy szignatúra alapú algoritmussal végzett kísérletek során láthatóvá vált, hogy az egyes eredmények jelentős szórást mutatnak a MILP módszerrel elérhető eredményekhez képest. Az átlagosan 19,7%-os eltérést adó adatsor legjobb elemének eltérése a MILP eredményétől 0%, míg a legrosszabb adatsoré 37,6 % volt. Annak ellenére, hogy a tesztek során a szignatúra alapú algoritmussal végzett optimalizáció összességében kedvezőnek tekinthető hatékonysággal működött, és mindig jobb eredményeket adott, mint a többi vizsgált módszer, ilyen mértékű szórás a gyakorlati alkalmazást jelentősen nehezítheti. Szükségesnek láttam, hogy javítsak a módszer stabilitásán, azaz csökkentsem az eredmények szórását. Ennek érdekében megvizsgáltam, hogy milyen körülmények játszanak szerepet az instabilitásban, és hogy meg lehet-e azokat szüntetni. Az ilyen irányú vizsgálataimat és eredményeimet a következő részekben mutatom be.

8.1 A problémát jellemző állapot mérőszám meghatározása.

A targoncavezetők döntési módszerénél említettem azt a jelenséget, hogy amikor a feladatok végrehajtása „könnyű”, tehát az anyagmozgatási kapacitás magasabb, mint ami a feladatokhoz szükséges, egyszerű eljárások alkalmazásával is eredményesen, azaz várakozási idők nélkül kiszolgálható a termelés. Ezzel szemben, amikor a feladatok kiszolgálásának erőforrásigénye megközelíti, vagy akár meghaladja a rendelkezésre álló kapacitást, a minimális várakozási költségű feladatvégrehajtási sorrend megtalálása egyre nehezebb. Az egyes módszerek hatékonyságának vizsgálatakor tehát azt is figyelembe kell venni, hogy az adott feladatcsoport esetében mennyire nehéz a minimális várakozási költség megtalálása. A gyakorlatban ezt úgy kell elképzelni, hogy az üzemi „hangulat” jelentősen különbözik egy szombati túlóra és egy hétköznap délelőtti teljes kapacitású működés között. Míg a második esetben a feladatok kényelmesen, kapkodás nélkül végrehajthatók anélkül, hogy a feladatok várakozási költséget elkerülő végrehajtási sorrendjének megválasztása jelentősebb nehézségebe ütközne, a második esetben szoros határidőkkel, kapacitáshatáron, vagy időlegesen akár azon túl működik az anyagmozgatási rendszer, és jelentős különbség lehet az egyes módszerek eredményessége között.

A második esetben egyszerű eszközökkel is eredményesen ütemezhetők a feladatok, az elsőben hangsúlyosabbak az egyes módszerek hatékonyságai közötti különbségek. Ennek a jelenségnek számszerű jellemzésére a szakirodalomban nem találtam megoldást, ezért egy állapotnak nevezett mérőszámot hoztam létre, melyre a későbbiekben az *st* rövidítéssel (state) hivatkozom.

A mérőszám megalkotásakor abból indultam, ki, hogy várakozás akkor nem következik be, ha az egyes feladatok befejezési időpontjai nem korábbiak mint hozzájuk tartozó határidők, tehát minimálisan ez az érték kell hogy a feladat határideje legyen. Az egymás után elvégzett feladatok befejezési ideje a megelőzően végrehajtott feladatok és az aktuális feladat végrehajtási idejének összege (Pt_n). Amennyiben az aktuális feladatnak ez a határideje, akkor nem lesz várakozás, ezt a következőkben küszöbhatáridőnek (deadline treshold, *DT*)-nek nevezem. A 29. ábrán egy n feladatból álló feladatsor esetében látható, hogy az egyes feladatok minimális határideje és ebből az átlagos határidő hogyan számolandó ((15) egyenlet).



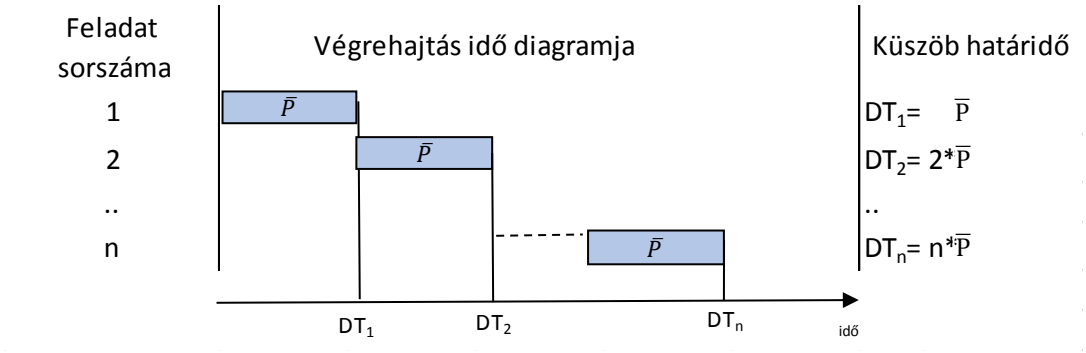
29. ábra: az egyes feladatok küszöbhatáridejének (DT) számítása a feladat végrehajtás sorrendje alapján

Ahol az átlagos küszöbhatáridő ($\overline{DT}$):

$$\overline{DT} = \frac{\sum_1^n P_n}{n} \tag{15}$$

Ahol P_n az n feladat végrehajtási ideje

Ezzel a módszerrel, meghatározható a küszöb határidő minden egyes feladathoz, amennyiben a végrehajtási sorrend ismert. Azonban ez a sorrend csak az optimalizációs folyamat során derül ki, ezért a feladatok végrehajtási idejének átlagával számolok ($\bar{P}$), így a valós sorrend ismerete nem szükséges. Ebben az esetben a küszöb határidők (DT_n), minden egyes feladat esetében egy egységnyi átlagos határidővel nagyobbak a megelőző feladaténál.



30. ábra: Az egyes feladatok kűszöb határidejének számítása átlagos végrehajtási($\bar{P}$) idő alkalmazása esetén

Az 30. ábrán látható, hogy minden egyes feladatvégrehajtás során egy (1) átlagos végrehajtási időegységgel nő az adott feladat küszöbhatárideje, így az átlagos küszöbhatáridő képlete a következő (16).

$$\overline{DT} = \frac{(1 * \bar{P} + 2 * \bar{P} + .. + n * \bar{P})}{n} = \frac{\bar{P} * (1 + 2 + .. n)}{n} \tag{16}$$

Az egymás után következő számok összegének képletét felhasználva:

$$\overline{DT} = \frac{\bar{P} * \left(\frac{n * (n+1)}{2}\right)}{n} = \bar{P} * \frac{n+1}{2} \tag{17}$$

A (17) számú egyenlet alapján, amennyiben ez lenne a feladatok átlagos határideje, a várakozás elkerülhető lenne.

Azonban, mivel a számításokban átlagos végrehajtási időkkel történik a számítás, és mert azok kumuláltan összeadásra kerülnek, korrekciós tényezőként figyelembe szükséges venni a végrehajtási idők szórását is a kalkuláció során ($\sigma_{P)}$ (18)

$$\overline{DT} = (\bar{P} + \sigma_P) * \frac{n+1}{2} \tag{18}$$

A 6. fejezetben megfogalmazott modell szerint a végrehajtási idők mellett a közlekedési időket és a targoncák számát (*K*) is figyelembe szükséges venni, ez alapján az állapot meghatározására a (19) egyenletet használom.

$$\overline{DT} = \frac{n+1}{2} * \frac{(\bar{P} + \bar{t} + \sigma_P + \sigma_t)}{K} \tag{19}$$

ahol az átlagos végrehajtási idő: $\bar{P}$, átlagos végrehajtási idő szórása: σ_P, az átlagos utazási idő:$\bar{t}$, az átlagos utazási idő szórása: σ_t, a targoncák száma: K, és a feladatok száma: n

Az átlagos küszöb határidő $\overline{DT}$ és a feladatok átlagos határidejének ($\overline{D}$) viszonya megmutatja, hogy a feladatok végrehajthatók-e késés nélkül, vagy ha nem, akkor milyen mértékű a „helyzet súlyossága”, vagyis a rendszer állapota (20).

$$st = \frac{\overline{D}}{\overline{DT}} \tag{20}$$

Az állapotnak (*st*) két jellemző tartománya határozható meg:

- *st*≤1: A várakozási idő felmerül (és ezzel a költség nem kerülhető el). Minél alacsonyabb az *st* értéke, annál magasabb lesz a várakozási költség.
- *st*>1: Ebben a tartományban a valós átlagos végrehajtási idő magasabb, mint a küszöbhatáridő, tehát a feladatok nagy valószínűséggel végrehajthatók várakozási idő nélkül. Minél magasabb az érték, annál több lehetséges feladatvégrehajtási sorrend van, ami ezt teljesíti.

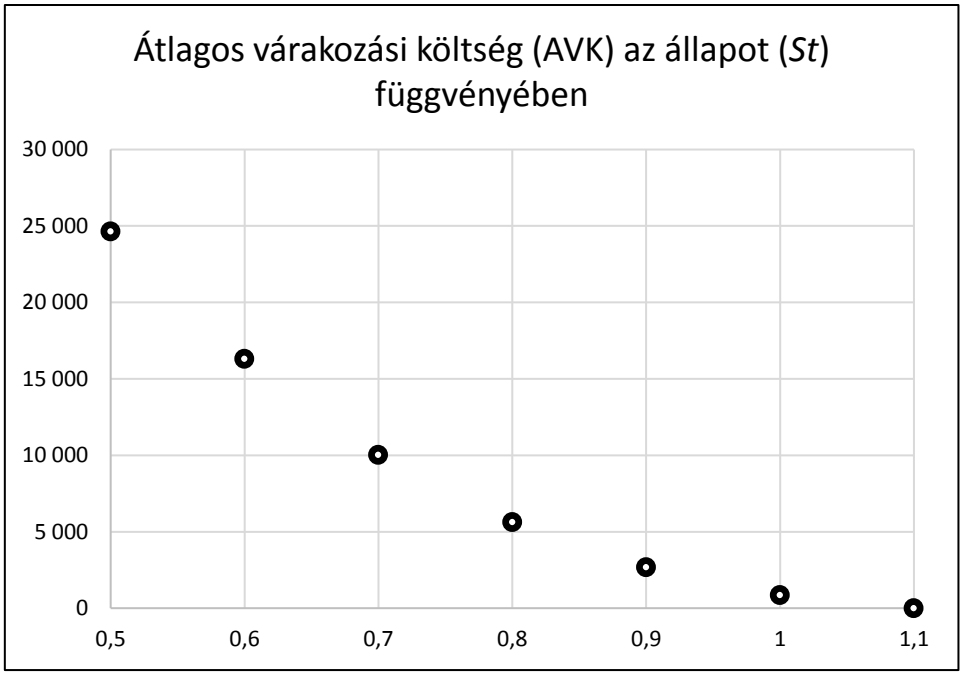
Az állapotmeghatározás, mint módszer vizsgálatát kísérleti úton végeztem:

Tekintve, hogy valós működés során kinyert feladatcsoport-adatok nem állnak rendelkezésre, a valós, ipari környezetben mért adatok alapján összesen 77 (7x11) forgatókönyvet hoztam létre a korábban is alkalmazott alapadatok alapján (ezek értekezésem 2. mellékletében megtalálhatók) úgy, hogy azok az *st* = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8 ;0,9 ;1 ;1,1 állapotértékeket rendre felvegyék. Minden állapothoz 11 eltérő feladatcsoportot hoztam létre. A forgatókönyveket a MILP alapú módszerrel optimalizáltam (10. táblázat), majd megvizsgáltam, hogy a MILP optimalizáció eredménye hogyan viszonyul az állapothoz.

10. táblázat. A tesztadatokon végzett MILP alapú optimalizációval kapott átlagos várakozási költségek értékei az egyes állapotokban. (Saját szerkesztés)

		Állapot						
		0,5	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**	**1**	**1,1**
Forgatókönyv	**1.**	23 480	16 980	10 980	7 150	2 600	1 300	0
	2.	26 160	17 660	10 190	5 340	1 750	370	0
	3.	20 900	16 150	10 190	4 750	3 725	990	0
	4.	27 855	13 255	8 185	1 970	1 310	920	0
	5.	18 720	13 370	8 520	5 270	2 200	1 350	0
	6.	25 195	20 795	12 500	8 150	3 730	1 000	0
	7.	23 850	15 260	7 010	3 600	2 100	190	0
	8.	29 930	19 290	10 850	5 700	1 850	740	0
	9.	22 985	13 715	9 730	5 930	2 940	1 430	0
	10.	22 225	14 255	10 355	5 500	2 750	730	0
	11.	29 750	18 750	11 850	8 500	4 435	365	0
	Átlagos várakozási ktg.	**24 641**	**16 316**	**10 033**	**5 624**	**2 672**	**853**	**0**

Az eredményeket grafikonon ábrázolva látható, hogy a rendre nagyobb *st* értékekhez rendre alacsonyabb átlagos várakozási költségek tartoznak, és a 0 átlagos várakozási érték az *st*>1 feltételhez tartozik (30. ábra).



30. ábra. A teszt adatsoron végzett MILP alapú optimalizációval kapott átlagos várakozási költségek az egyes állapotokban. (Saját szerkesztés)

Az állapot (*st*) a feladatcsoport bemeneti adataiból könnyen és gyorsan számítható, így mint mérőszám, a vizsgált probléma esetén alkalmas az anyagmozgatási feladatok összetettségének jellemzésére.

A kísérletek során a módszernek ugyanakkor korlátai is napvilágra kerültek, melyeket figyelembe szükséges venni az állapot érték figyemelembe vételekor. Ennek egyik legfőbb oka, hogy az átlagolás során elvesznek azok az egyes feladatokra jellemző részletek (határidő, végrehajtási idő viszonya), amik miatt várakozás következhet, be. még akkor is, ha egyébként jelentős kapacitás áll rendelkezésre. A kísérletek során az alábbi kettő különleges körülmény került meghatározásra.

- Amennyiben az összes határidő érték közel azonos az átlagos küszöb határidővel, az *St*=1 állapot ellenére sem kerülhető el a várakozás, ennek oka, hogy nincsen elegendő szórása a határidőknek.
- Amennyiben a végrehajtási idők jelentősen egyenlőtlenül oszlanak el (pl *P*=(1;2;19;20), *St*=1 állapotban várakozási idő merül fel, ha a magas végrehajtási idő alacsony határidővel áll párban.

A gyakorlati alkalmazás során figyelembe kell venni a fenti korlátozásokat. Bár a gyakorlatban ezek a szituációk csak ritkan fordulnak elő, fennálásuk esetén az *st* mérőszám alkalmazását nem javasolom.

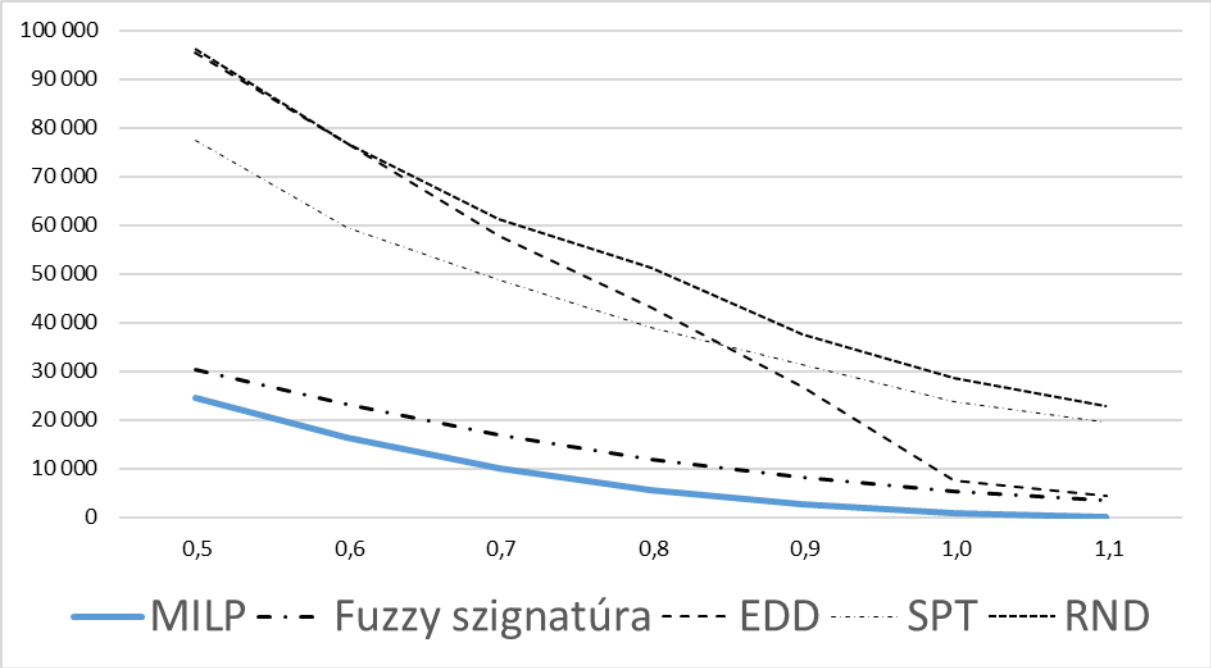
8.2 Az egyes módszerek hatékonyságának elemzése az állapot függvényében

Annak érdekében, hogy az egyes módszerek hatékonyságát az állapot függvényében elemezhessem, a fent említett 154 forgatókönyvön a korábban alkalmazott módszerekkel (MILP, Fuzzy, EDD, SPT, RND) végeztem el a sorba rendezést, és számoltam ki az átlagos várakozási költséget (3. táblázat). Az eredményeket grafikusan is és ábrázoltam, ez a 30. ábrán szemléletesen mutatja az egyes módszerek eredményessége közötti különbségeket.

2. táblázat. Az egyes optimalizációs módszerek átlagos várakozási költsége állapotonként, forintban megadva.

Módszer/Állapot	**0,5**	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**	**1,0**	**1,1**
MILP	24 641	16 316	10 033	5 624	2 672	853	0
Fuzzy szignatúra	30 395	23 192	16 925	12 017	8 203	5 314	3 467
EDD	95 422	76 788	57 924	43 011	26 715	7 699	4 377
SPT	77 366	59 609	48 778	39 068	31 345	23 812	19 442

RND	96 076	76 701	61 346	51 160	37 489	28 514	22 793



30. ábra. A 17. táblázat adatai grafikonon ábrázolva. Az optimális eredményt adó MILP és a fuzzy szignatúra görbéi közel párhuzamosak. Bár az eredményeket diszkrét állapotokban számítottam, az jobb áttekinthetőség érdekében az ábrán az azonos módszerekhez tartozó pontokat összekötöttem. (Saját szerkesztés)

A 30. ábrán látható, hogy állapottól függetlenül a legjobb eredményt a MILP biztosítja. Míg a többi módszer esetében (EDD, STP, RND) az állapotérték csökkenésével egyre nagyobb az átlagos várakozási költség eltérése a MILP-től a fuzzy szignatúra alapú módszer esetében ez közel konstans érték. Az ábrából az is leolvasható, hogy a magasabb állapotérték rendre alacsonyabb átlagos várakozási költséget eredményez, bármelyik módszer kerül alkalmazásra. Az ábrán az is látható, hogy amennyiben csak az azonos állapotú feladatcsoportokat hasonlítom össze egymással, a MILP és Fuzzy szignatúra alapú optimalizációval kapott átlagos várakozási költségek milyen közel esnek egymáshoz, a két görbe közel párhuzamos [Ferenczi, et al,2022], [Ferenczi, Lilik, 2023].

8.3 Harmadik tézis

A műhelyrendszerű termelés körülményei között végzett alapanyag-ellátási tevékenység üzemi állapotának jellemzésére mérőszámot hoztam létre. Ez a mérőszám megmutatja, hogy egy adott anyagmozgatási feladatcsoport esetén a várakozási költség minimalizálása mennyire összetett feladat, és létezik-e olyan végrehajtási sorrend, mellyel a várakozási költség elkerülhető. Kísérletekkel igazoltam, hogy az általam számszerűsített állapot (*st*) két jellemző tartományt

határoz meg: míg *st* ≤ 1esetén a várakozás nem kerülhető el (és *st* minél kisebb, a gyakorlati várakozási költség annál magasabb), addig st > 1 esetén létezik olyan végrehajtási sorrend, amivel a várakozás elkerülhető, (és *st* minél a nagyobb ez az érték a várakozási költség elkerülése annál egyszerűbb). Az üzemi állapotot jellemző mérőszám (*st*) a következő (21):

$$st = \frac{\bar{D}}{\frac{n+1}{2} * \frac{(\bar{P} + \bar{t} + \sigma_P + \sigma_t)}{K}}, \tag{21}$$

ahol az átlagos határidő $\bar{D}$, az átlagos végrehajtási idő: $\bar{P}$, átlagos végrehajtási idő szórása: σ_P, az átlagos utazási idő:$\bar{T}$, az átlagos utazási idő szórása: σ_t, a targoncák száma: *K, és a* feladatok száma: *n*.

A tézishez tartozó saját publikációk:

Ferenczi, B., Lilik, F.: Soft Computing Aided Material Handling For Functional Production System, Logisztikai Évköny 2022, Magyar Logisztikai Egyesület, Budapest. (b)

Ferenczi, B., T. Kóczy, L., Lilik, F.: Fuzzy Signature Based Model in Material Handling Management. , In Computational Intelligence and Mathematics for Tackling Complex Problems 4 (pp. 169-179). Cham: Springer International Publishing. (2022).

Ferenczi B., Lilik F.: Anyagmozgatási feladatok várakozási költségeinek optimalizálása az állapot figyelembe vételével. Logisztikai Évkönyv 2023-. Magyar Logisztikai Egyesület, Budapest.

Ferenczi, B., Koczy, L. T., Lilik, F.:State Dependent Weighting in Fuzzy Signatures Optimizing Material Handling Management Problems. Journal of Computational and Cognitive Engineering 2022, Vol. 00(00) 1–7 (2022)

9. Műhelyrendszerű termelés logisztikai feladatainak üzemállapothoz alkalmazkodó priorizációja

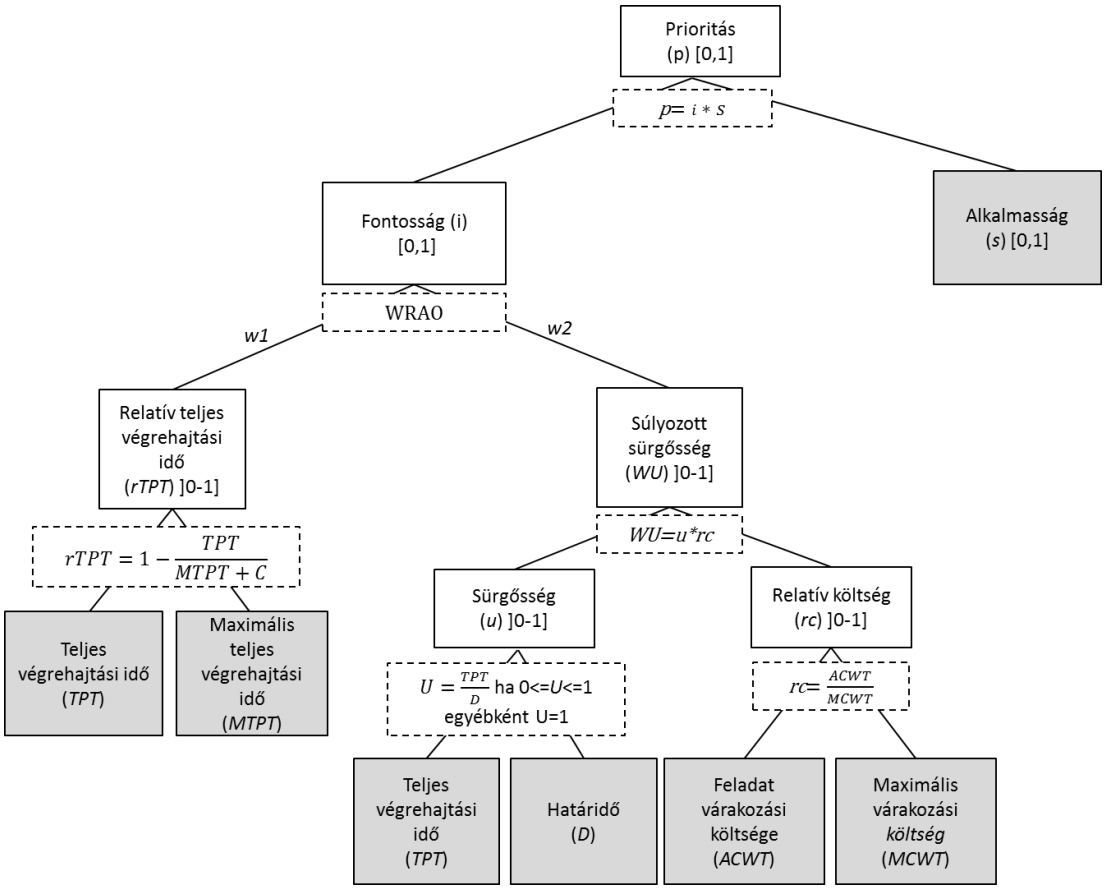
Tekintve, hogy az állapot (*st*) számítása egyszerűen és gyorsan elvégezhető akár még az optimalizációs folyamat megkezdése előtt, megvizsgáltam annak a lehetőségét, hogy ez felhasználható-e a fuzzy szignatúra alapú optimalizáció eredményének javítására. Ennek során a korábban alkalmazott fuzzy szignatúrához hasonló, ám lényegi eltéréseket tartalmazó fuzzy szignatúrával hoztam létre a probléma új modelljét. Az egyik változás, hogy az utazási időt és a feladat végrehajtáshoz szükséges időt összevontam, és mint teljes végrehajtási időt (Total Processing Time – TPT) vettem figyelembe. Mivel a teljes végrehajtási idő ugyanazon berendezés kiszolgálása esetén is más-és más lehet attól függően, hogy a feladat megkezdésekor a targonca éppen hol tartózkodik, ezzel a változással növeltem a szignatúra mélységét. Másik változás, hogy a feladatok aktuális végrehajtási idejének (ezt relatív teljes végrehajtási időnek nevezem – *rTPT*) és sürgősségének (*WU*) aggregálásakor az állapottól (*st*) függő, eltérő súlyokat alkalmaztam.

9.1. Az anyagmozgatási feladatcsoport állapotától függő fuzzy szignatúra

Az állapotfüggő szignatúra struktúrája a 31. ábrán látható, melynek bemenő paraméterei a következők:

- Teljes végrehajtási idő (total processing time, *TPT*): a végrehajtási és a közlekedési idő összege.
- Maximális teljes végrehajtási idő (maximal total processing time, *MTPT*): a halmazban található feladatokhoz tartozó teljes végrehajtási idők maximuma.
- Az adott feladathoz tartozó végrehajtási határidő (deadline, *D*).
- Az adott feladathoz tartozó gép fajlagos várakozási költsége (actual cost of waiting time: *ACWT*)
- A csoportban található legmagasabb fajlagos várakozási költség (maximal cost of waiting time*: MCWT*).
- A feladat végrehajthatósága: az adott targonca végre tudja-e hajtani a feladatot vagy nem (suitability, *s*).

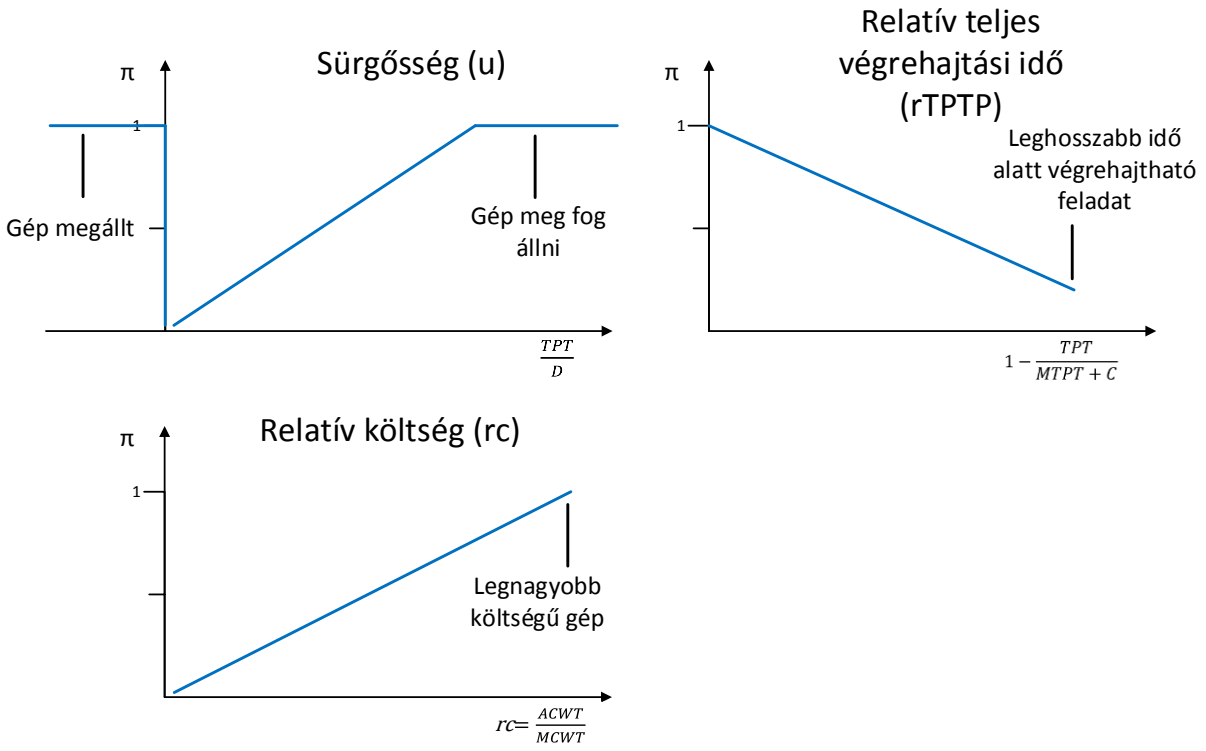
Az alkalmazott aggregációs operátorok a szaggatott vonallal keretezett négyzetekben találhatók.



31. ábra. Az új szerkezetű fuzzy szignatúra. Az aggregációs operátorok szaggatott keretben láthatók. A bemeneti adatok szürke háttérrel vannak megjelenítve, w_1 és w_2 pedig az aggregációs operátorban alkalmazott súlyok. (Saját szerkesztés)

A szignatúra bemeneti értékeihez tartozó tagsági függvények a 31. ábrán láthatók. Az aktuálisan vizsgált feladat prioritását (*p*) az adott feladat fontosságának (*i*) és a feladatot értékelő targonca alkalmasságának (*s*) szorzata adja. Ez a művelet garantálja a biztos végrehajthatóságot. Ez azt jelenti, hogy abban az esetben, ha az éppen vizsgált feladat a legfontosabb a halmazban, de a feladatot kereső targonca azt nem tudja végrehajtani, akkor annak szempontjából ennek a feladatnak a prioritása 0, azaz a targonca csak olyan feladatot kaphat, amit végre tud hajtani.

A feladat fontossága (*i*) a relatív teljes végrehajtási idő (*rTPT*) és a súlyozott sürgősség (*WU*) súlyozott átlaga. Ennek számítására a WRAO aggregációs operátort használom, melynek egyenlete 5.1.2. szakaszban található. Az alsóbb ágak súlyainak (w_1, w_2) állapotfüggő meghatározása a 9.2. fejezetben olvasható.



32. ábra. Az alkalmazott tagsági függvények jelleggörbéje. (Saját szerkesztés)

A relatív teljes végrehajtási idő a *MILP* modellben alkalmazott értékhez hasonlóan a végrehajtási idő és az utazási idő összegének (*TPT*) a legidőigényesebb feladat időszükségletéhez (*MTPT*) viszonyított értéke 1-ből kivonva. Az 1-ből történő kivonás biztosítja, hogy a legkisebb időigényű feladat kapja a legnagyobb értéket (a szakértői tudásban alkalmazott „leggyorsabban végrehajtható feladatot kell először végrehajtani" stratégia szerint). Mivel a legidőigényesebb feladat önmagához viszonyított aránya éppen 1, az 1-ből történő kivonás itt 0-t eredményezne, azaz ez a feladat akkor sem kerülne kiválasztásra, ha csak egyedül lenne a halmazban, be kellett vezetnem egy kis értékű C módosítót, ami kizárja, hogy a számítás eredménye 0 legyen.

A súlyozott sürgősség (*WU*) a sürgősség (*u*) relatív költséggel (*rc*) súlyozott értéke. Ez azt jelenti, hogy nagy *WU* értéket azok a feladatok kaphatnak, amelyek egyszerre sürgősek és magas várakozási érték tartozik hozzájuk, míg, ha egy feladat nagyon sürgős is, de annak végre nem hajtása nem okoz észrevehető költséget, akkor a végrehajtásra történő kiválasztásban kis értéket kap.

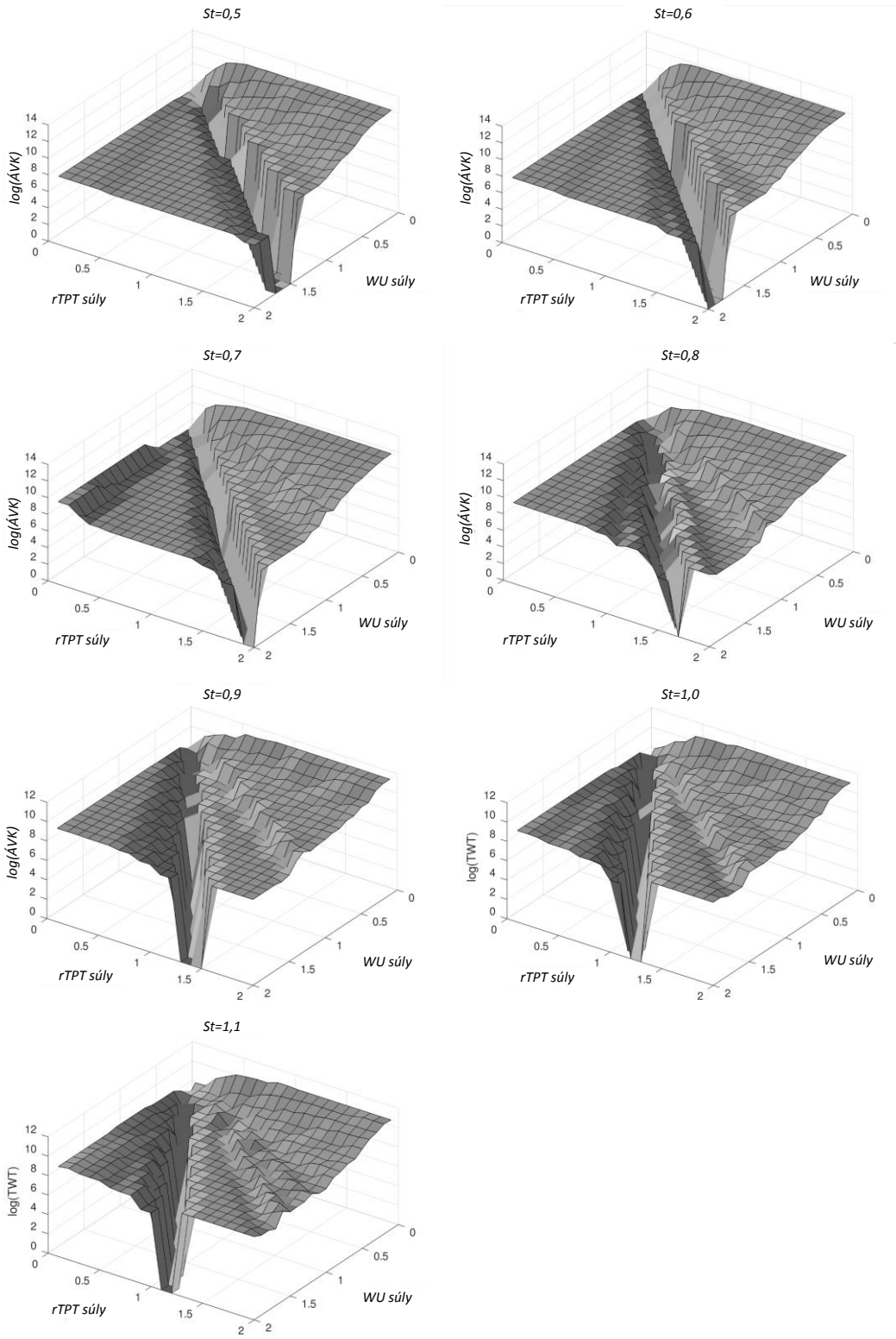
A sürgősség (*u*) értéke számszerűsíti, hogy az adott feladat teljes végrehajtási ideje hogy aránylik a hozzá tartozó határidőhöz. Ha a feladat nem végezhető el határidőn belül, akkor a relatív sürgősség értéke 1, de ha a végrehajtására jelentős tartalékidő áll rendelkezésre, *u* értéke alacsony lesz.

9.2 Az alkalmazott súlyok megállapítása (állapotfüggő súlyozás)

Bukovics belvárosi bérházak fuzzy szignatúra alapú állapotértékelő modelljében [[Bukovics et al., 2020] dinamikusan változó súlyokat alkalmaz [Bukovics et al., 2021]. Az általa alkalmazott fuzzy szignatúrában az egyes ágakhoz tartozó csomópontok súlyai a rendszer bemeneti adatainak értékétől függően dinamikusan változnak. Ötletét felhasználva a 7.4. fejezet módszerét a relatív teljes végrehajtási idő és a súlyozott sürgősség dinamikus súlyozásával fejlesztettem tovább. Az egymással nem összevethető tényezők súlyozása annak érdekében, hogy azok a valódi fontosságuknak megfelelő mértékben vegyenek részt a végeredmény kialakításában, összetett döntési helyzetekben gyakran alkalmazott módszer. A menedzsmenttudományok gyakran alkalmaznak olyan, több tényezőt összevető komplex értékelési rendszert, ahol az egyes tényezők egymással nem összehasonlíthatók, és nem is azonos súllyal szerepelnek a döntésben [Kavas; 2013],[Scott-Westbrook 2000],[Duleba 2006]. A döntésben érintett paraméterek korábban ismeretlen súlyának megállapítására a szakirodalom az analitikus hierarchiafolyamatot (AHP) [Peng, 2012], a Churchmann-Ackoff folyamatot [Szentesi et al., 2018] és a Guilford folyamatot [Rodrigues, et al., 2004] ajánlja, melyekkel lehetővé válik a szakértői tudásban lévő preferenciák egzakt számszerűsitése. Tekintve, hogy a vizsgált környezetben a targoncavezetők – mint helyi szakértők – jellemzően a tapasztalataikon alapuló döntéseket hoznak és nem tudnak súlyokat rendelni az egyes tényezőkhöz (pontosabban azonos súllyal kezelték az egyes paramétereket, bár tény, hogy eltérő feladatösszeállítások esetén képesek voltak eltérő stratégiák alkalmazására), ezért a fenti módszerek nem célravezetők.

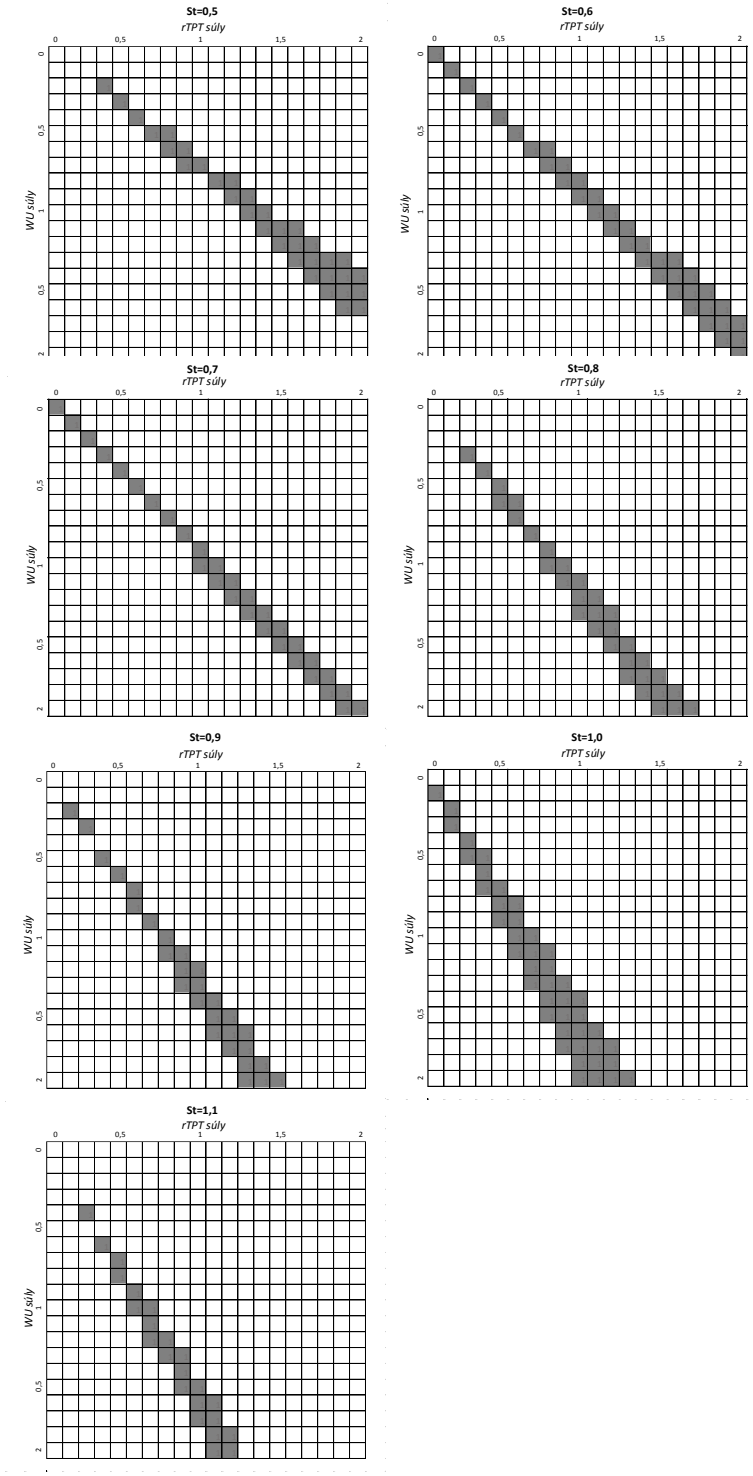
Ellentétben a valós szakértői döntésekkel, ahol nem lehetséges az egyes döntések eredményét összehasonlítani azonos feladatcsoport más döntésen alapuló végrehajtásának eredményével, esetemben lehetőség van a különböző döntési algoritmusok és stratégiák szimulációjára, így a lehetséges súlykombinációk hatásának vizsgálatára. Ez azt jelenti, hogy az egyes állapotokban sikeres súlyok (vagy súlyarányok) kísérleti úton is meghatározhatók. Erre vonatkozóan vizsgálatokat végeztem. A kísérletek során az egyes súlyok 0,1 és 2 közötti értékeket vehettek fel, 0,1-es osztásközökkel, így összesen 400 súlypárt (a súlypárokat az összes lehetséges kombinációban) vizsgáltam meg. Minden állapotban minden forgatókönyvcsoport esetében megvizsgáltam, hogy az egyes súlypárok alkalmazása mekkora átlagos várakozási költséget eredményez. A vizsgálataim eredményei a 33. ábrán láthatók. Az ábrán háromdimenziós grafikonokon jelenik meg az x és y tengelyeken mért súlyokhoz tartozó átlagos várakozási költség (ÁKV). A grafikonok így topografikus megjelenítésben mutatják azokat a

„koordinátákat”, melyek alkalmazásával az adott állapot esetében a legjobb eredmény érhető el (a völgyek a legjobb, míg a csúcsok a legrosszabb eredményt adó súlypárokat mutatják). A jobb láthatóság érdekében a függőleges tengelyt (teljes várakozási költség) logaritmikusan skáláztam.



33. ábra. A súlypárok által eredményezett átlagos várakozási költségek (ÁVK) háromdimenziós ábrázolása a vizsgált állapotok (st) esetében (a z tengely logaritmikusan skálázott). Az alkalmazásra javasolt súlypárokat a „völgyek" jelölik ki. [Ferenczi, et al,2022].

Az egyes állapotokhoz tartozó legalkalmasabb súlypárokat két dimenzióban ábrázolja a 34. ábra. Ezen az ábrán azoknak a koordinátapároknak az elhelyezkedése látható, melyek a legjobb eredményt biztosítják (az árkok helyzete felülnézetből).



34. ábra. Az egyes állapotokhoz tartozó, legalacsonyabb várakozási költséget eredményező súlypárok ábrázolása. [Ferenczi, et al,2022].

Megfigyelhető, hogy a 34. ábrán kijelölt területek jó közelítéssel tulajdonképpen eltérő meredekségű egyenesek. Ez azt jelenti, hogy nem a súlyok pontos értékeinek, hanem azok arányának van jelentősége. Az *st*=0,5 értékű állapot esetében például az 1 – 0,8 és a 2 – 1,6 *rTPT – WU* súlypárok alkalmazása azonosan az elérhető legjobb eredményhez vezet, de ugyanilyen eredményt ad még számos olyan súlypár is, melyek aránya *rTPT:WU*=1,25. Értékében nem, de jellegében ez minden megvizsgált állapot esetében ugyanígy alakul, emiatt a súlyozáshoz nem konkrét értékekre, hanem az alkalmazott súlyok arányára tettem javaslatot. Ezeket a javaslataimat tartalmazza a 11. táblázat.

11. táblázat. Az rTPT és WU súlyok javasolt aránya a számszerűsített üzemállapot függvényében. [Ferenczi, et al,2022].

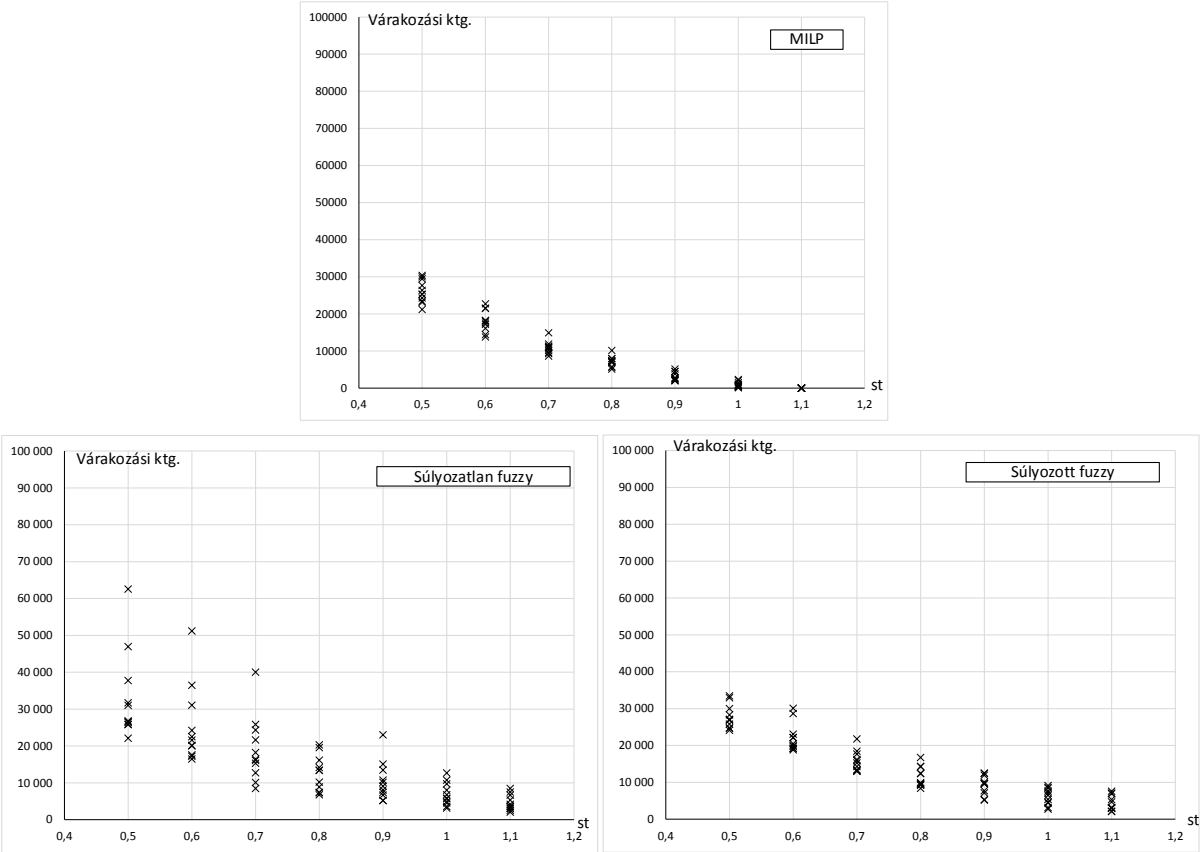
Állapot (*st*)	**Súlyarány (*rTPT:WU*)**
0,5	1,25
0,6	1
0,7	0,95
0,8	0,75
0,9	0,65
1	0,5
1,1	0,5

9.3 Az egyes optimalizációs módszerek hatékonyságának összehasonlítása.

A javított módszer ellenőrzése érdekében teszteket végeztem melyhez a 8.2 fejezetben már alkalmazott tesztforgatókönyvek alapján. A létrehozott 22 tesztforgatókönyvből 11-et véletlenszerűen kiválasztottam, melyekkel elvégeztem a legjobb eredményt biztosító súlyarányok meghatározást, majd a teszteket a másik 11 forgatókönnyvel végeztem el. Minden állapothoz tizenegy eltérő feladatcsoportot használtam, az eredti (*st*=0,5) forgatókönyvek szisztematikus módosításával. Az összes forgatókönyv esetében elvégeztem a következő priorizációs eljárásokat.

- Kevert egész értékű lineáris programozás (MILP).
- Fuzzy szignatúra alapú algoritmus
- Fuzzy szignatúra alapú algoritmus, állapotfüggő súlyozással

Az egyes módszerekkel végzett optimalizációk eredményeit a 35. ábra tartalmazza.

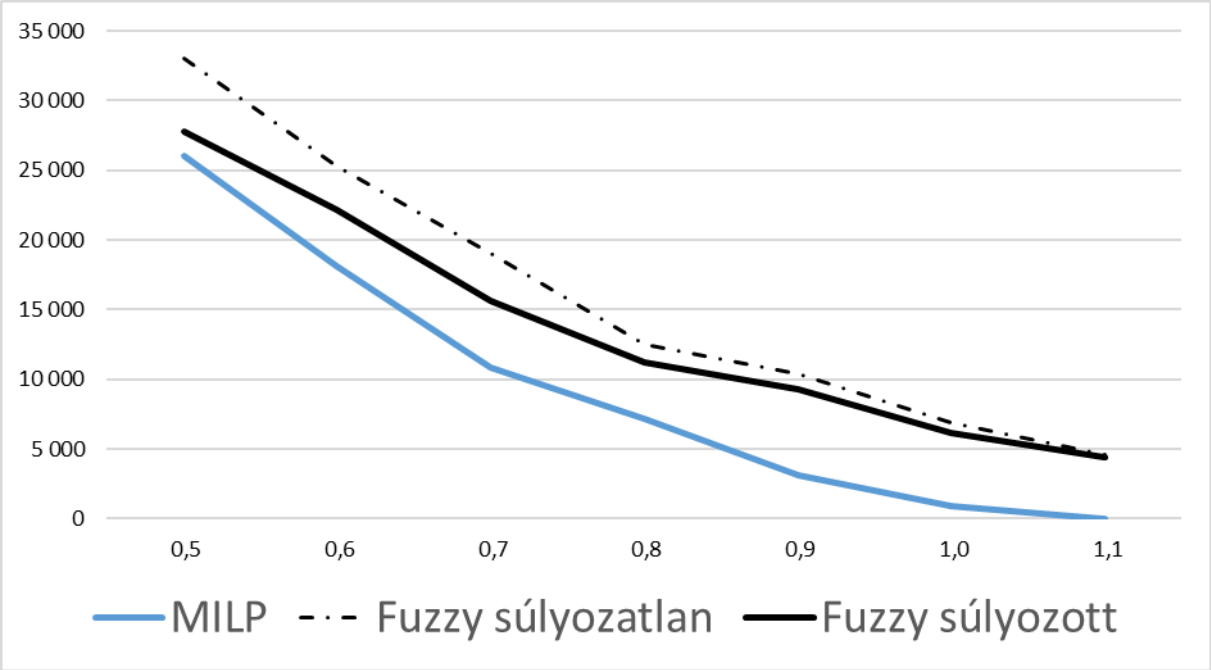


35. ábra. A hatékonyság mérési kísérlet során egyes optimalizációs eljárásokkal kapott várakozási költség értékek ábrázolása. [Ferenczi, et al,2022].

A 35. ábrán minden egyes kereszt egy optimalizáció eredményeképp létrejövő teljes várakozási költséget jelent. Minden optimalizációs módszert ugyanazon az adatsoron teszteltem, így az egyes állapotokhoz tartozó pontfelhők eloszlásából látható, hogy az egyes módszerek mennyire adnak koherens eredményt. Legkisebb a szórása és az átlagos magassága a súlyozott fuzzy- és MILP alapú módszerek eredményeinek, azaz ezek garantálják legbiztosabban az alacsony várakozási költséget, így leginkább ezek tűnnek ipari használatra alkalmasnak. Az egyes módszerekhez tartozó átlagos várakozási költségek láthatók az 12. táblázatban és a 35. ábrán.

12. táblázat. Az egyes optimalizációs módszerekkel számított átlagos várakozási idők az állapotok függvényében. (Saját szerkesztés)

Állapot (*St*)/módszer	**0,5**	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**	**1,0**	**1,1**
MILP	26 049	18 126	10 865	7 134	3 132	940	0
Fuzzy súlyozatlan	33 044	25 313	19 011	12 500	10 371	6 874	4 556
Fuzzy súlyozott	27 730	22 141	15 667	11 212	9 285	6 156	4 375



35 ábra. Az egyes priorizációs eljárások átlagos várakozásiköltség-görbéje az egyes állapotok függvényében. [Ferenczi, et al,2022].

Az adatok elemzéséből az alábbi következtetéseket vontam le:

- Az állapotfüggő súlyozást alkalmazó fuzzy szignatúrával végzett optimalizáció nagyjából 10%-kal alacsonyabb várakozási költséget eredményez, mint a súlyozás nélküli megoldás, elsősorban az alacsony állapotérték tartományban, tehát a „krízisidőszakokban".
- A nem súlyozott fuzzy szignatúra alapú optimalizációval kapott átlagérték grafikonja közel párhuzamos a MILP módszer grafikonjával, annál közel konstans értékkel magasabb, amiből két következtetés vonható le:
    - A fuzzy szignatúra alapú optimalizáció átlagos hatékonysága állapottól független, tehát az alkalmazása eltérő körülmények között is célra vezető. .
    - Az eltérés mértéke a legjobb eredményt adó MILP és a fuzzy szignatúra alapú optimalizáció eredménye között veszteségként, többletköltségként értelmezhető. Ugyanakkor, mivel jól előre jelezhető, az két módszer közötti hatékonysági számítások egyik tényezőjének is tekinthető. Míg a MILP (vagy egyéb szofisztikált módszerek) jelentős pénzügyi ráfordítással vezethetők be és működtethetők, a fuzzy szignatúra alapú optimalizáció egyszerű, olcsón alkalmazható megoldást kínál. A konstans eltérés következtében a két módszer

közötti bevezetési és üzemeltetési költségek, illetve a megtakarítások jól előre jelezhetők, ami segítheti a döntéshozókat a megalapozottabb döntések meghozatalában.

- A súlyozott fuzzy egyes eredményeinek szórása alacsonyabb mint a nem súlyozotté.

9.4 Negyedik tézis

A műhelyrendszerű termelés logisztikai kiszolgálásának ütemezésére a második tézisben bemutatottnál hatékonyabb fuzzy szignatúra alapú feladatütemezési algoritmust hoztam létre, melyben hatékonyságnövekedést az egyes tényezők üzemi állapotnak megfelelő súlyozása biztosítja. Kísérletekkel kimutattam, hogy ez az algoritmus a súlyozatlan fuzzy szignatőúra alapú módszernél kedvezőbb várakozási költségeket eredményez.

A legalkalmasabb súlyok megállapítására kísérleteket végeztem, és meghatároztam az egyes állapotokban legjobban teljesítő súlyarányokat, illetve javaslatot tettem ezek alkalmazására.

A tézishez tartozó saját publikációk:

Ferenczi, B., Lilik, F.: Soft Computing Aided Material Handling For Functional Production System, Logisztikai Évköny 2022, Magyar Logisztikai Egyesület, Budapest. (b)

Ferenczi, B., T. Kóczy, L., Lilik, F.: Fuzzy Signature Based Model in Material Handling Management. , In Computational Intelligence and Mathematics for Tackling Complex Problems 4 (pp. 169-179). Cham: Springer International Publishing. (2022).

Ferenczi B., Lilik F.: Anyagmozgatási feladatok várakozási költségeinek optimalizálása az állapot figyelembe vételével. Logisztikai Évkönyv 2023-. Magyar Logisztikai Egyesület, Budapest.

Ferenczi, B., Koczy, L. T., Lilik, F.:State Dependent Weighting in Fuzzy Signatures Optimizing Material Handling Management Problems. Journal of Computational and Cognitive Engineering 2022, Vol. 00(00) 1–7 (2022)

10. Összefoglalás

A műhelyrendszerű termelés rugalmassága és relatív alacsony beruházási igénye miatt elsősorban a kis- és középvállalkozások körében elterjed termelési módszer. A termelési tevékenységhez közvetlenül kötődő anyagmozgatás, vagyis a gyártóberendezések alapanyaggal történő ellátása és a késztermék elszállítása, kulcsfontosságú a termelés folyamatosságának fenntartása érdekében. Ellentétben más termelési rendszerekkel, a műhelyrendszerű termelés esetében annak változatossága miatt, az anyagmozgatás menetrendszerű szervezése nem megvalósítható. Emiatt a rövidtávon felmerülő feladatok ütemezésének komplex feladata a helyszínen lévő dolgozókra, jellemzően a targonca vezetőkre hárul, melynek kettős következménye van. Egyrészt az emberek által meghozott komplex döntések nem feltétlenül a legjobbak, emiatt a vállalat gazdasági károkat szenved el, amennyiben a termelési kapacitásának egy részét a logisztikai kiszolgálásra várva elveszíti. Másrészről pedig a folyamatos, egyedi döntések kényszere miatt a targoncavezetőre, a logisztikai rendszer vezetőjére és a termelési dolgozókra is jelentős stressz nehezedik.

Kutatási munkám célja a műhelyrendszerű termelés operatív, vagyis rövid távú, maximum 4 óra időtávban történő anyagmozgatási tevékenységének fejlesztése volt olyan módon, hogy az ipar 4.0 elveknek megfelelően az anyagmozgatási feladatok végrehajtási sorrendjének meghatározását az ember helyett számítógép végezze, de az anyagmozgató berendezést továbbra is ember kezeli. A megoldás kidolgozás során feltételeztem, hogy rendelkezésre áll olyan valós idejű feladatirányító rendszer, ahova a munkahelyekről a mozgatási igények digitalizált formában regisztrálásra kerülnek. A beérkező igényeket egy algoritmus rendezi optimális végrehajtási sorrendbe, és osztja szét a feladatokat targoncák között. Ennek létrehozása érdekében megalkottam a szükséges logikai modellt, melyben az ismert adatok:

- Az egyes feladatok határideje
- Az egyes feladatokhoz tartozó gépek időegységre jutó várakozási költsége
- Az egyes feladatokhoz tartozó gépek közötti közlekedés időszükséglete, (a gyakorlati működés alapján feltételezhető, hogy a targonca a feladatot ott fejezi be, ahol elkezdte).
- Az egyes feladatokhoz előre meghatározott végrehajtási normaidők.
- Az egyes targoncák mely feladatokat tudják ellátni.

A cél, hogy minden feladat végrehajtásra kerüljön úgy, hogy az összes várakozási költség minimális legyen. Az aktuális feladatokat irányított gráf formájában reprezentáltam, ahol a csúcsok az egyes feladatok befejezett állapotát, az élek pedig az odautazás és a végrehajtás

idejét jelentik. A döntés, hogy az egyes targoncák mely csúcsokat milyen sorrendben keresik fel (hajtják végre a feladatokat). A változó egy olyan háromdimenziós mártix, aminek az egyik dimenziója, hogy melyik munkahelyről indul a targonca, a másik, hogy hova érkezik (ezt a feladatot hajtja végre), a harmadik pedig, hogy melyik targonca hajtja végre a feladatot (ez alapján a harmadik dimenzió annyi „rétegből" áll, ahány targonca van). A változó bináris, azaz adott targonca az adott útvonalon végigmegy (1) vagy nem (0). Korlátozás, hogy egy csúcs csak egyszer kereshető fel és hogy az útvonalaknak csatlakozni kell egymáshoz. Az így megalkotott logikai modellből vegyes egész értékű lineáris programozással (MILP) megoldható matematikai modellt alkottam. Az optimalizációs algoritmus és az irányító rendszer együttes használata esetén az alábbi előnyök várhatók.

- A valós idejű feladat- és végrehajtáskövetés lehetővé teszi a teljesítmény tényszerű elemzését.
- A valós idejű, elektronikus kommunikáció lehetővé teszi, hogy a targoncavezető nagyobb területet szolgáljon ki, ezáltal kevesebb targonca szükséges.
- A komplex optimalizálási feladatok számítógéppel történő megoldása jobb eredményt biztosít, mintha ugyan ezt emberek végeznék.
- Az emberi tényező, mint bizonytalansági faktor kikerül a döntési rendszerből.
- A dolgozókra— beleértve a vezetőket is — nehezedő stressz csökken, mert a feladatvégrehajtás ütemezése objektív, utólagosan elemezhető módon történik, amit számítógép végez.

Ezek folyományaként a műhelyrendszerű termelést alkalmazó vállalkozások jelentősen növelhetik a már meglévő, univerzális, ember vezette anyagmozgató eszközökre alapuló logisztikai rendszerük hatékonyságát.

Bár az általam létrehozott MILP modell jól működik, azonban a gyakorlati használata elsősorban kis- és középvállalkozások esetében megkérdőjelezhető, mert az ilyen vállalatoknál, elsősorban a méretükből fakadóan, jellemzően nem áll rendelkezésre a szükséges szakértelem. Emellett az ilyen vállalatokra jellemző belterjes, helyismereten alapuló vállalati kultúra sem feltétlenül támogatja a szofisztikált, átlagos képesítésű felhasználó számára átláthatatlan optimalizációs módszerek alkalmazását. Amennyiben mégis megvalósul a bevezetés, szakértelem hiányában nagy a veszélye, hogy a környezeti változások nem megfelelően kerülnek átvezetésre a rendszerben, ami miatt a rendszer utasításai egyre inkább eltérnek a racionálistól, és ami végül azok figyelmen kívül hagyásához vezethet.

Ezen okok miatt egyszerűbb, emberközelibb optimalizációs módszer használatának lehetőségét vizsgáltam meg. Abból indultam, ki, hogy a helyismereten alapuló vállalati kultúrákban a helyi szakértők gondolkodási módszerének az átvétele könnyebben elfogadhatóvá teszi az új rendszert. Valós vállalati szakértők tudása alapján fuzzy szignatúra alapú szakértői rendszert hoztam létre. Az anyagmozgatási folyamatok fuzzy szignatúra segítségével végzett optimalizálásához megvizsgáltam, hogy egy műhelyrendszerű termelést folytató, irányító rendszer nélküli vállalatnál hogyan, milyen módon döntenek a feladatok végrehajtásáról a helyi szakértők, vagyis a targoncavezetők. Abból kiindulva, hogy folyamatosan változnak a feladatok, nem csinálnak végrehajtási tervet az összes feladatra, hanem az ismert feladatokat hasonlítják össze egymással és ez alapján választják ki, hogy melyik feladatot hajtják végre. A feladat végrehajtása után újra mérlegelnek, és ismét a csoportból legfontosabbnak ítélt feladatot hajtják végre. A legfontosabb feladatnak azt tartják, ami közel van, gyorsan végrehajtható, sürgős (a gyártóberendezés már megállt, vagy hamarosan megáll) és a várakozási költsége magas. Ezt a logikát követve dolgoztam ki egy feladatvégrehajtási sorrendet felállító algoritmust, melyben az egyes feladatokhoz fuzzy szignatúra alkalmazásával 0 és 1 közötti prioritás értéket rendeltem, és mindig a legmagasabb prioritásértékű feladat kerül végrehajtásra. A végrehajtás után a megmaradt feladatokat újra értékelem. A fuzzy szignatúra bemeneti adatai ugyanazok, mint a MILP modellben ismertetettek. A bemeneti paraméterekhez a szakértői logika alapján az alábbi tulajdonságokat vettem figyelembe:

- Relatív távolság: az adott feladat távolsága összehasonlítva a feladatcsoport legtávolabbi feladatával.,
- Sürgősség: az adott feladat végrehajtási ideje és határidejének aránya.
- Relatív költség: az adott feladat várakozási költsége összehasonlítva a feladatcsoport legmagasabb várakozási költségével.

A fenti tulajdonságokhoz tartozó tagsági értékeket szorzással aggregáltam, melyben a kompetencia (tehát hogy az adott targonca végre tudja-e hajtani az adott feladatot) is egy tényező. A fuzzy szignatúra segítségével ezek alapján kalkuláltam az egyes feladatok prioritásértékét, majd az algoritmust addig folytatva, amíg az utolsó feladat is végrehajtásra kerül, meghatározom a végrehajtási sorrendet. A végrehajtási sorrend ismeretében a teljes várakozási költség meghatározható. A módszer hatékonyságát valós adatokon alapuló, de mesterségesen létrehozott, egyenként 8 feladatot tartalmazó feladatcsoportokkal teszteltem. A tesztelés során elvégeztem a sorban rendezést MILP-el, a fuzzy szignatúra alapú algoritmussal, három ismert és feladatütemezésben gyakran alkalmazott eljárással (EDD, SPT, HP), illetve

véletlenszerű kiválasztással is. Az várakozási költségeket az ismerten optimumot biztosító MILP-el kapott eredményekhez hasonlítottam. Ez alapján a fuzzy szignatúra alapú sorbarendezés esetén a várakozási költségek 18%-al magasabbak a MILP-hez képest, de jelentősen alacsonyabbak mint a többi módszer esetében. Az alkalmazott fuzzy szignatúra egyszerű matematikai műveleteket alkalmaz, egyszerűen felépíthető, módosítható és a működése könnyen átlátható. Ezért, ugyan a hatékonysága némileg elmarad a lehetséges legjobb eredménytől, ugyanakkor lényegesen egyszerűbben megvalósítható megoldást jelenthet a kis és középvállalkozások számára, mint a szofisztikált optimalizációs módszerek.

A fuzzy szignatúra alapú optimalizációs algoritmus a tesztszámítások során átlagosan 18%-kal magasabb költséget eredményezett, mint a MILP, az egyes esetekben viszont hol jelentősen kisebb, hol nagyobb volt az eltérés, ami a gyakorlatban kételyeket ébreszthet a módszer használhatóságát illetően. Megvizsgáltam az instabilitás lehetséges okait, és azt találtam, hogy ezt az okozza, hogy a vizsgálat során nem vettem figyelembe, hogy a várakozási költség adott körülmények esetén történő minimalizálása mennyire könnyű vagy nehéz feladat. Tehát a várakozás elkerülhető-e egyáltalán, vagy az elérhető legalacsonyabb várakozási költség értéke mekkora nagyságrendű. Szükségesnek láttam alkalmazni egy olyan mérőszámot, amivel a feladatcsoport állapota mérhető (állapot, *st*), ezáltal az azonos állapotok vethetők össze. Miután a szakiordalomban nem találtam a feladatok ilyen állapotának számszerű mérésére használható módszert, magam dolgoztam ki azt az egyenletet, amely erre alkalmas (19. és 20. egyenlet). Az állapot mérőszáma a lehetséges eseteket két nagy csoportra osztja. Az egynél nagyobb értékű állapot esetében a várakozás várhatóan elkerülhető, minél nagyobb az állapot értéke, annál könnyebb ilyen végrehajtási sorrendet találni. Az egynél kisebb értékű állapot esetében, a várakozás nem kerülhető el. Minél kisebb az állapot értéke, annál nagyobb jelentősége van a helyes módszer megválasztásának. Az állapottartományok vizsgálatát valós adatokon alapuló, de mesterségesen létrehozott teszt adatokkal, MILP alkalmazásával végeztem el. A kísérletek rávilágítottak az állapot meghatározás bizonyos jellegzetes eseteiere is, melyeket figyelembe szükésges venni a döntéske során.

Ugyanezen adatokon teszteket folytattam a fuzzy szignatúra alapú algoritmussal és a korábban már használt egyéb módszerekkel is. Az egyik legfontosabb eredménynek azt tartom, hogy az állapotok függvényében vizsgálva a fuzzy szignatúra alapú algoritmussal elérhető átlagos várakozási költségek közel konstans értékkel térnek el a MILP-el kapottaktól (38 ábra). Ez alapján az általam megalkotott fuzzy szignatúra alapú algoritmus stabilnak tekinthető. Emellett az is jól előre jelezhető, hogy mekkora a két módszer közötti gazdaságossági különbség, ami

lehetővé teszi a döntések megalapozottabb meghozatalát, amikor a módszerek közötti választás szükségessége felmerül.

Az általam megalkotott, az állapot meghatározására szolgáló egyenlet segítségével lehetőségem nyílt, egy módosított fuzzy szignatúra alapú algoritmus létrehozására, melyben az egyes bemenő jellemzőket súlyozottan vettem figyelembe. A súlyok megállapítása dinamikusan, a számszerűsített állapot figyelembevételével történik. A legalkalmasabb súlyok megtalálására vizsgálatokat végeztem, melyek alapján javaslatot tettem az egyes állapotok esetében alkalmazandó súlyarányokra vonatkozóan. Ezzel az algoritmussal is teszteket végeztem, a tesztek eredménye azt mutatja, hogy ennek a módszernek az alkalmazásával nagyjából 10%- al kedvezőbb átlagos várakozási költség érhető el az első fuzzy szignatúra alapú módszerhez képest.

Ettől függetlenül az állapot számszerű figyelemebe vételének legnagyobb hozadékát abban látom, hogy a fuzzy szignatúra alapú megoldások eredményei az állapotértékektől függetlenül közel azonos arányban térnek el a MILP eredményektől, azaz így mindkét módszer jelentős stabilitást mutat. Az állapotfüggő súlyozást alkalmazó algoritmus elsősorban az alacsony állapot tartományban érzékelhetően jobb eredményt ad.

A kutatásaim alapján a műhelyrendszerű termelést alkalmazó kis és közép vállalkozások számára lehetőséget látok a logisztikai kiszolgálás hatékonyságának növelésére anélkül, hogy ez jelentősebb költségeket igényelne, és hogy a meglévő termelési struktúrába be kellene avatkozni.

A feldolgozott téma kapcsán további kutatási irányok is felmerültek:

A fuzzy szignatúra alapú algoritmus a kísérletek alapján meglehetősen jól eredményt adott a szakirodalomban többször megtalálható, hasonlóan egyszerűen működtethető, súlyozott késés mimilaizálására szolgáló heurisztikához képest. További teszteket igényel összetettebb módszerekkel történő összhasonlítása, melyhez ezeket adaptálni kell pontosan ugyanerre a problémára.

Az állapot képlet esetében a kísérletek során kiderült, hogy az általam vizsgált üzemi működés körülményei között megfelelően működik, de extrém szórások és eloszlások esetében korlátozott a megbízhatósága. További kutatást igényel pontosan definálni azt a határt, ameddig a módszer kielégítő megbízhatósággal mutatja az állapotot.

Az állapotfüggő súlyok meghatározása kísérleti úton történt, ami általános módszerként a lerítak szerint alkalmazható. Kutatásom következő fázisában azt fogom vizsgálni, hogy a

súlykat mely paraméterek, hogyan befolyásolják, és hogyan lehet ezeket matematikai úton meghatározni.

Hivatkozások

Agostini, Lara, and Roberto Filippini. Organizational and managerial challenges in the path toward Industry 4.0. European journal of innovation management 22.3 (2019): 406-421.

Akturk, M. S.(Yilmaz, H.): Scheduling of automated guided vehicles in a decision making hierarchy. International Journal of Production Research, 32 (1996), 577–591.

Ballagi Á.: Fuzzy szituációs térképek és alkalmazásuk intelligens mobil robotok kooperációjában és kommunikációjában. Doktori értkezés Széchenyi István Egyetem (2015)

Bertok, B., Adonyi, R., Friedler, F., Fan, L. T. Superstructure approach to batch process scheduling by S-graph representation.
In Computer Aided Chemical Engineering Vol. 29, (2011). 1105-1109. Elsevier.

Beyer, H.G., Schwefel H.P.: Evolution strategies–A comprehensive introduction. Natural computing, 1/1 (2002) 3–52,

Bektas, T. The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures. OMEGA: The International Journal of Management Science 34(3), (2006) 209–219.

Bektaş, N., Lilik, F., Kegyes-Brassai, O.:Development of a fuzzy inference system based rapid visual screening method for seismic assessment of buildings presented on a case study of URM buildings. Sustainability, 14(23), (2022) 16318.

Bose, J., Reiners, T., Steenken, D., & Voß, S. Vehicle dispatching at seaport container terminals using evolutionary algorithms. Proceedings of the 33rd annual Hawaii international conference on system sciences IEEE. (2000) 10–20.

Bukovics Ádám, Fogarasi Gergő, Kóczy T. László: Extended Fuzzy Signature Based Model for Qualification of Residential Buildings, STUDIES IN COMPUTATIONAL INTELLIGENCE 819, 2020., pp. 91-97.

Bukovics Ádám, Lilik Ferenc, Kóczy T. László: Fuzzy reasoning in condition assessment of side corridor structures, 12th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2021), 2021. szeptember 23-25, pp. 805-810.

Bukovics Á., Lilik F., Kóczy L.T.,: Liszi M.: Condition assessment of side corridors with the use of aggregations based on fuzzy inference method, 9th Euro-American Congress on Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management, REHABEND 2022, Granada, (2022) pp. 864-872.

Chaudhry, I. A., Khan, A.A.: A research survey: review of flexible job shop scheduling techniques. International Transactions in Operational Research 23/3 (2016) 551–591.

Chaudhry, I. A., Mahmood, S. Shami, M. :Simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles in flexible manufacturing systems using genetic algorithms. Journal of Central South University 18.5 (2011): 1473–1486.

Chawla, V., Chanda A., Angra S.:Scheduling of multi load AGVs in FMS by modified memetic particle swarm optimization algorithm. Journal of Project Management 3.1 (2018): 39–54.

Cheng, Y. L., Sen, H. C., Natarajan, K., Teo, C. P., Tan, K. C.: Dispatching automated guided vehicles in a container terminal.al., Supply chain optimization Springer, Boston, MA. (2005). 355–389.

Confessore, G., Fabiano, M., Liotta, G., A network flow based heuristic approach for optimising AGV movements.
Journal of Intelligent Manufacturing 24.2 (2013): 405–419.

Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., Stein, C.. Introduction to algorithms.
MIT press (2022).

Danka, S.: Bizonytalan erőforrás–korlátos projektek ütemezése
Doktori értekezés Pécsi Tudományegyetem, Pollack Mihály Műszaki és Informatikai Kar (2014)

Dantzig, G.:Linear programming and extensions.
Linear programming and extensions. Princeton university press, (2016)

Demeter, K., Losonci, D., Nagy, J., Horváth, B. Tapasztalatok az Ipar 4.0-val–egy esetalapú elemzés. Vezetéstudomány-Budapest Management Review, 50(4), (2019). 11-23.

Duleba Sz.:Közép– és felsővezetői döntéseket támogató AHP–módszer logisztikai szolgáltatók kiválasztására.
Vezetéstudomány 37.9 (2006) 54–58

Egbelu, P. J., Tancho M.A..:Characterization of automatic guided vehicle dispatching rules.
The International Journal of Production Research 22.3 359–374. (1984)

Facchini, Francesco, Salvatore Digiesi, Luiz Fernando Rodrigues Pinto. Implementation of I4. 0 technologies in production systems: opportunities and limits in the digital transformation. Procedia Computer Science 200 (2022): 1705-1714.

Felföldi L.:Anyagmozgatás az ezredfordulón. OMFB–OMIKK Budapest 1989

Garey, M., Johnson, D., Sethi, R.: The complexity of flowshop and jobshop scheduling. Mathematics of Operations Research 1(2) (1976) 117–129

Gen, M., Lin, L.:Multiobjective evolutionary algorithm for manufacturing scheduling problems: state–of–the–art survey. Journal of Intelligent Manufacturing 25.5 849–866. (2014)

Glover F., Sörensen K.: Metaheuristics. Encyclopedia of operations research and management science 62 (2013): 960–970

Goldratt, E. M. :Theory of constraints. Croton-on-Hudson, North River, (1990)

Groover, M. P.: Automation, Production Systems, and Computer- integrated Manufacturing 2nd ed. Assembly Automation 22 /3, 298–299 (2002)

Gurney, K.:An introduction to neural networks. UCL Press Limited, London, (2018)

GLPK (GNU Linear Programming Kit), h.n., é.n., URL: https://www.gnu.org/software/glpk/, utolsó letöltés: 2022.12.14.

GUSEK (GLPK Under Scite Extended Kit), h.n., é.n., URL: https://gusek.sourceforge.net/gusek.html,utolsó letöltés: 2022.12.14.

Hall, N. G., Posner M., E.,:Earliness–tardiness scheduling problems, I: weighted deviation of completion times about a common due date. Operations Research 39.5 836–846. (1991)

Harris F.W.,:How many parts to make at once. The Magazine of Management. 10 135–136. (1913)

Helsgaun, K. (2009). General k-opt submoves for the Lin–Kernighan TSP heuristic. Mathematical Programming Computation, 1, 119-163.

Hillier F.S, Liebermann G.J..:Introduction to operations research McGraw-Hill New York (1995)

Ioannou, G., Kritikos M. N, :Optimization of material handling in production and warehousing facilities. Operational Research 4.3 317–331. (2004)

Jackson J R. :Scheduling a production line to minimize maximum tardiness. Research Report 43, Management Science Research Projects University of California, Los Angeles, USA (1955)

Yongkuk J, Tarun K. A., Flores-Garcíaa, E., Wiktorssona, M., A reinforcement learning model for material handling task assignment and route planning in dynamic production logistics environment. Procedia CIRP 104 (2021): 1807-1812.

Kanet, John J., Xiaoming Li. A weighted modified due date rule for sequencing to minimize weighted tardiness.
Journal of Scheduling 7 (2004): 261-276.

Kavas, L.: A helikopter típusváltással kapcsolatos gondolatok és a kiválasztást megalapozó elvárások. Repüléstudományi közlemények 1 93–98.(2013).

Kim, J., Choe, R., Ryu, K. R.: Multi-objective optimization of dispatching strategies forsituation-adaptive AGV operation in an automated container terminal., Proceedings of the 2013 Research in Adaptive and Convergent Systems on - RACS ’13, 1–6. (2013).

Kóczy L. T., Tikk D.: Intelligens rendszerek, Typotex, Budapest, (2000)

Kóczy, L. T., Vámos, T., Biró, G.. Fuzzy signatures. Proceedings of Eurofuse-SIC, 99, 25-28. (1999)

Kovács, G., Kot,S.: Facility layout redesign for efficiency improvement and cost reduction. Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics 16.1 (2017): 63–74.

Kumar, S. A., Suresh N.: Production and operations management. New Age International, (2006).

Ludwig, T. D.,Goomas, D. T. Real-time performance monitoring, goal-setting, and feedback for forklift drivers in a distribution centre. Journal of Occupational and Organizational Psychology, 82(2), (2009), 391-403.

Lilik, F. Nagy, S. Kovács, M. Szujó S. K. Kóczy, L. T. :Interpolative decisions in the fuzzy signature based image classification for liver CT 2021 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Luxemburg, (2021), 1-6,

Malus A, Kozjek D, and Vrabič R. Real-time order dispatching for a fleet of autonomous mobile robots using multi-agent reinforcement learning. CIRP annals (2020); 69: 397-400.

Frits, M., Bertok, B. Scheduling custom printed napkin manufacturing by P-graphs. Computers & Chemical Engineering, 141, (2020). 107017.

Frits, M., Bertok, B. Routing and scheduling field service operation by P-graph.
Computers & Operations Research, 136, (2021). 105472.

Masa, P., Hoen K., Wallinga, H. :A high-speed analog neural processor,
IEEE micro 14.3, (1994), 40-50

Medikondu, N., Narayanarao, K. Rangajanardhana, G. :Scheduling of Machines and Automated Guided Vehicles in FMS Using Gravitational Search Algorithm Applied Mechanics and Materials, Vol. 867, PP. 307–313. (2017)

Mendis, B. S. U. Gedeon, T. D. Botzheim J. Koczy, L. T. :Generalised Weighted Relevance Aggregation Operators for Hierarchical Fuzzy Signatures, 2006 International Conference on Computational Inteligence for Modelling Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents Web Technologies and International Commerce (CIMCA'06), Sidney, 2006, 198-198

Méndez, C. A., Cerdá, J., Grossmann, I. E., Harjunkoski, I., Fahl, M., State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes.
Computers & chemical engineering, 30(6-7), (2006). 913-946.

Méndez, C.A., Henning, G.P., Cerdá, J. An MILP continuous-time approach to short-term scheduling of resource-constrained multistage flowshop batch facilities,
Computers & Chemical Engineering, Volume 25, Issues 4–6, (2001), 701-711, ISSN 0098-1354, https://doi.org/10.1016/S0098-1354(01)00671-8.

Mendis, B. S. U., Gedeon, T. D..: Aggregation selection for hierarchical fuzzy signatures: A comparison of hierarchical owa and wrao. In Proceedings of IPMU vol 8 (2008) 1377-1383

Miller, C.E.; Tucker, A.W. Zemlin, R.A:. Integer programming formulation of traveling salesman problems. Journal of Association for Computing Machinery, Vol. 7, 326–329 (1960)

Mitsuo G., Lin, L..:Multiobjective evolutionary algorithm for manufacturing scheduling problems: state-of-the-art survey. Journal of Intelligent Manufacturing 25.5 (2014): 849-866.

Mohan, J., Lanka, K., Rao, A. N.:A review of dynamic job shop scheduling techniques. Procedia Manufacturing, 30, 34–39. (2019)

Mousavi, M., Yap, H. J., Musa, S. N., Tahriri, F., Md Dawal, S. Z.: Multi-objective AGV scheduling in an FMS using a hybrid of genetic algorithm and particle swarm optimization. PloS one, 12/3, (2017).

Munisamy, S. Timber terminal capacity planning through queuing theory.
Maritime Economics & Logistics, 12, (2010). 147-161.

Nageswararao, M., Narayanaraobd, K. and Ranagajanardhana, G. :Simultaneous Scheduling of Machines and AGVs in Flexible Manufacturing System with Minimization of Tardiness Criterion. Procedia Materials Science, 5, (2014), 1492–1501

Nagy Sz., Lilik, F., Sziová, B., Kovács, M., Kóczy L. T.,: On the Applicability of Fuzzy Rule Interpolation and Wavelet Analysis in Colorectal Image Segment Classification,
Fuzzy Approaches for Soft Computing and Approximate Reasoning: Theories and Applications, Cham, Springer International Publishing (2021), 243-255.

Ojaghi, Y., Khademi, A., Yusof, N. M., Renani, N. G., bin Syed Hassan, S. A. H.: Production layout optimization for small and medium scale food industry. Procedia Cirp, 26, (2015), 247–251.

Panwalkar, S., Iskander, W.: A Survey of Scheduling Rules. Operations Research 25(1) (1977), 45–61

Peng, J.: Selection of logistics outsourcing service suppliers based on AHP.
Energy Procedia, 17 (2012), 595–601.

Pessl, Ernst, Sabrina Romina Sorko, Barbara Mayer. Roadmap Industry 4.0–implementation guideline for enterprises. International Journal of Science, Technology and Society 5.6 (2017): 193-202.

Prezenszki J: Logisztika I., Budapesti Műszaki Egyetem, Budapest, (2002.)

Proia, S. , Carli,, R. Cavone, G. , Dotoli, M. Literature Review on Control Techniques for Collaborative Robotics in Industrial Applications, in IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering, 2021.

Qiu, L., Hsu, W. J., Huang, S. Y., Wang, H.:Scheduling and routing algorithms for AGVs: a survey. International Journal of Production Research, 40(3), (2002), 745-760.

Qu T, Lei S P, Wang Z Z, Nie D X, Chen X, and Huang G Q. Iot-based real-time production logistics synchronization system under smart cloud manufacturing. International journal of advanced manufacturing technology (2016); 84: 147-164.

Rashidi, H, Farzam M, Fereshteh. A. P.: Automated Guided Vehicles-A Review on Applications, Problem Modeling and Solutions. International Journal of Transportation Engineering 8.3 (2021): 261-278.

Reveillac, J. M.: Modeling and simulation of logistics flows 1: theory and fundamentals. John Wiley & Sons, Hoboken, (2017).

Rodrigues, A. M., Stank, T. P., Lynch, D. F. Linking strategy, structure, process, and performance in integrated logistics.
Journal of Business logistics, 25(2), (2004). 65-94.

Russel, R. S., Taylor. B. W. :Operations management, creating value along the supply chain, John Willey and Sons. USA (2009).

Rushton, A. , Croucher, P., Baker, P. :The Handbook of Logistics and Distribution Management. Kogan Page Limited, London, (2017)

Sabuncuoglu, I., Hommertzheim, D. L. Experimental investigation of an FMS due-date scheduling problem: Evaluation of machine and AGV scheduling rules. International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 5(4), (1993), 301-323.

Scott, C., Westbrook, R.: New strategic tools for supply chain management.
International Journal of Physical Distribution & Logistics Management. 21(1), (1991), 23-33.

Sculli, D., Tsang. K. K. :Priority dispatching rules in a fabrication/assembly shop.
Mathematical and Computer Modelling 13.3 (1990), 73–79.

Sels, V., Gheysen, N., Vanhoucke, M. : A comparison of priority rules for the job shop scheduling problem under different flow time-and tardiness-related objective functions.
International Journal of Production Research, 50(15), (2012). 4255-4270.

Sipser, M.: The history and status of the P versus NP question. In Proceedings of the twenty–fourth annual ACM symposium on Theory of computing Victoria British Columbia, Canada (1992, July). 603–618

Smith, A. E., Coit, D. W., Baeck, T., Fogel, D., Michalewicz, Z. : Penalty functions. Handbook of evolutionary computation, 97(1), (1997). C5.

Sörensen, K., Glover, F,.: Metaheuristics. In S.I. Gass and M. Fu, editors, Encyclopedia of Operations Research and Management Science, Springer, New York, (2013) 960–970

Sós, E., Földesi, P.:Fuzzy QFD assessment of logistics coherence. In 2022 IEEE 6th International Conference on Logistics Operations Management (2022, June). 1-6.

Szentesi, S., Tamás, P., Illés, B. :Application of churchman-ackoff weighting method for procurement of consignment seller dietary supplements manufacturing companies. Academic Journal of Manufacturing Engineering, 16(1),(2018).

Taghaboni, F. Tanchoco, J. M. A., , Comparison of dynamic routing techniques
for automated guided vehicle systems. International Journal of Production Research, 33, (1995) 2653–2669.

Temesi J, Varró Z,:Operációi kutatás. Akadémiai Kiadó Zrt. Budapest (2014)

Vöröskői K. Stratégiai szintű csomagolási döntések modellezése az ellátási láncban. Doktori Disszertáció Széchenyi István Egyetem, Győr, (2019)

Wahl, F., Breslein, M., & Elser, B.. On-demand forklift hailing system for Intralogistics 4.0. Procedia Computer Science, 200, (2022) 878-886.

Winkelhaus S and Grosse E H. Logistics 4.0: A systematic review towards a new logistics system. International Journal of Production Research 58: (2020); 18-43.

Wook, B.J., Kim, K.H.: A polled dispatching strategy for automated guided vehicles in port container terminals. Management Science and Financial Engineering 6.2 (2000), 47-67.

Yalaoui, F., Chu, C. Parallel machine scheduling to minimize total tardiness. International journal of production economics, 76(3), 265-279. (2002).

Zadeh, L.,A. :Fuzzy sets. Information and control, vol. 8, (3), (1965). 338-353

Zandin, Kjell B. Maynard's industrial engineering handbook. McGraw–Hill Education, New-York (2001).

Zhang, J., Ding, G., Zou, Y., Qin, S., Fu, J.. Review of job shop scheduling research and its new perspectives under Industry 4.0. Journal of Intelligent Manufacturing, 30(4), (2019) 1809-1830.

Saját publikációk

Ferenczi B, Németh P: Funkcionális elrendezésű termelési rendszer logisztikájának automatizált irányítása in XIX. ENELKO – XXVIII. SzámOk Konferencia, Tusnádfürdő, Románia 2018 Október

Ferenczi B, Németh P. :Műhelyrendszerű termelés anyagmozgatásának optimalizálására alkalmazható stratégiák elemzése, In: Bihari, Erika; Molnár, Dániel; Szikszai-Németh, Ketrin (szerk.) Tavaszi Szél 2019 Konferencia = Spring Wind 2019: Konferenciakötet III. (2019) (a)

Ferenczi B, Németh P: Műhelyrendszerű termelés anyagmozgatásának optimalizálása lineáris programozás alkalmazásával In: Koncz, István; Szova, Ilona (szerk.) PEME XVIII. PhD - Konferencia : A PEME XVIII. PhD - Konferenciájának előadásai (2019) (b)

Ferenczi B, Németh P : Műhelyrendszerű termelés anyagmozgatási igényének meghatározása sorbanállási modell alkalmazásával In: Kreatív ipar-digitális gazdaság (2019) (c)

Ferenczi B, Németh P: Műhelyrendszerű termelés anyagmozgatási igényeinek sajátosságai. TÉR-GAZDASÁG-EMBER 2019 VII/2-3 145-161 (2019)

Ferenczi, B. ; Németh, P. Műhelyrendszerű termelés anyagmozgatásának optimalizálása In: Dr. Sebestyén-Pál, György; Dr. Szabó, Loránd; Dr. Biró, Károly-Ágoston (szerk.) ENELKO 2019 SzámOkt 2019 : XX. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia, XXIX. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia Kolozsvár, Románia : Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) (2019) pp. 159-164. , 6 p. (e)

Ferenczi B., Németh P.,: Műhely rendszerű termelés logisztikai kiszolgálásának automatizálási lehetőségei International journal of engineering and management sciences / műszaki és menedzsment tudományi közlemények (2498-700X): 5 1 210-221 (2020)

Ferenczi, B., Németh, P.: Műhelyrendszerű termelés anyagmozgatásának optimalizálása. In: Horváth, Balázs; Horváth, Gábor (szerk.) XI. Nemzetközi Közlekedéstudományi Konferencia Közlekedés a Járvány után: folytatás vagy újrakezdés" (2021)

Ferenczi, B., Koczy, L. Lilik, F.. Fuzzy signature based model in material handling management, ESCIM 2021 Book of abstracts (2021)

Ferenczi, B., Lilik, F.: Fuzzy Signature Based Organization of the Material Handling, in Functional Production Systems, TÉR-GAZDASÁG-EMBER (2064-1176): 9 3-4 145-158 (2021)

Ferenczi, B., Lilik, F.: Soft Computing Aided Material Handling For Functional Production System, Logisztikai Évköny 2022, Magyar Logisztikai Egyesület, Budapest. (b)

Ferenczi, B., T. Kóczy, L., Lilik, F.: Fuzzy Signature Based Model in Material Handling Management. , In Computational Intelligence and Mathematics for Tackling Complex Problems 4 (pp. 169-179). Cham: Springer International Publishing. (2022).

Ferenczi, B., Koczy, L. T., Lilik, F.:State Dependent Weighting in Fuzzy Signatures Optimizing Material Handling Management Problems. Journal of Computational and Cognitive Engineering 2022, Vol. 00(00) 1–7 (2022)

Ferenczi B., Lilik F.: Anyagmozgatási feladatok várakozási költségeinek optimalizálása az állapot figyelembe vételével. Logisztikai Évkönyv 2023-. Magyar Logisztikai Egyesület, Budapest.

Mellékletek:

1. melléklet: a 7. fejezetben teszteléshez és értékeléshez használt feladatcsoportok.

Sorszám	Gép száma	Határidő (D)	Feldolgozási idő (P)	Veszteség ktg (Ft/perc)
1.	G1	10	4	5000
	G2	6	4	6000
	G3	4	3	8000
	G4	11	3	9000
	G5	9	3	7000
	G6	7	3	10000
	G7	8	2	6000
	G8	2	1	7000
2.	G1	8	3	10000
	G2	9	4	6000
	G3	4	3	9000
	G4	10	4	8000
	G5	2	1	7000
	G6	7	3	6000
	G7	6	2	7000
	G8	11	3	5000
3.	G1	11	1	10000
	G2	2	3	7000
	G3	8	3	7000
	G4	10	2	8000
	G5	4	3	6000
	G6	7	4	5000
	G7	6	4	9000
	G8	9	3	6000
4.	G1	10	3	6000
	G2	7	3	10000
	G3	9	3	8000
	G4	2	1	6000
	G5	6	3	5000
	G6	11	2	9000
	G7	8	4	7000
	G8	4	4	7000
5.	G1	7	3	7000
	G2	6	2	7000
	G3	2	3	10000
	G4	9	4	6000
	G5	10	3	5000
	G6	11	1	9000
	G7	8	3	8000
	G8	4	4	6000
6.	G1	4	3	10000
	G2	10	4	5000
	G3	6	3	8000
	G4	2	2	7000
	G5	11	4	6000
	G6	8	3	7000
	G7	9	1	9000
	G8	7	3	6000

Sorszám	Gép száma	Határidő (D)	Feldolgozási idő (P)	Veszteség ktg (Ft/perc)
7.	G1	9	3	10000
	G2	2	2	5000
	G3	10	4	6000
	G4	6	4	7000
	G5	11	3	8000
	G6	7	1	6000
	G7	8	3	9000
	G8	4	3	7000
8.	G1	7	2	9000
	G2	2	1	7000
	G3	4	3	6000
	G4	9	3	8000
	G5	11	3	5000
	G6	6	4	10000
	G7	10	4	6000
	G8	8	3	7000
9.	G1	9	3	7000
	G2	10	2	8000
	G3	2	4	6000
	G4	7	4	9000
	G5	4	3	6000
	G6	6	3	7000
	G7	11	3	5000
	G8	8	1	10000
10.	G1	2	2	5000
	G2	8	1	7000
	G3	11	3	9000
	G4	9	4	10000
	G5	10	3	6000
	G6	6	3	7000
	G7	4	4	8000
	G8	7	3	6000
11.	G1	7	3	8000
	G2	6	3	7000
	G3	11	3	10000
	G4	8	4	7000
	G5	10	4	6000
	G6	4	1	9000
	G7	2	3	5000
	G8	9	2	6000

2. melléklet: a 8.2 fejezetben tesztelésre és a 9.3 fejezetben tanítómintának használt feladatok

Állapot		st=0,5			st=0,6			st=0,7			st=0,8			st=0,9			st=1			st=1,1		
Sorszám	Gép száma	Határidő (D)	Feldolgozási idő (P)	Veszteség ktg (Ft/perc)	Határidő (D)	Feldolgozási idő (P)	Veszteség ktg (Ft/perc)	Határidő (D)	Feldolgozási idő (P)	Veszteség ktg (Ft/perc)	Határidő (D)	Feldolgozási idő (P)	Veszteség ktg (Ft/perc)	Határidő (D)	Feldolgozási idő (P)	Veszteség ktg (Ft/perc)	Határidő (D)	Feldolgozási idő (P)	Veszteség ktg (Ft/perc)	Határidő (D)	Feldolgozási idő (P)	Veszteség ktg (Ft/perc)
1.	G1	10	7	450	12	7	450	14	7	450	16	7	450	18	7	450	20	7	450	22	7	450
	G2	9	5	100	11	5	100	13	5	100	14	5	100	16	5	100	18	5	100	20	5	100
	G3	17	6	1500	20	6	1500	23	6	1500	27	6	1500	30	6	1500	34	6	1500	36	6	1500
	G4	12	7	3800	14	7	3800	17	7	3800	19	7	3800	21	7	3800	24	7	3800	26	7	3800
	G5	10	5	600	12	5	600	14	5	600	16	5	600	18	5	600	20	5	600	22	5	600
	G6	14	6	2500	17	6	2500	19	6	2500	22	6	2500	25	6	2500	28	6	2500	30	6	2500
	G7	9	8	800	11	8	800	13	8	800	14	8	800	16	8	800	18	8	800	20	8	800
	G8	13	8	200	15	8	200	18	8	200	21	8	200	23	8	200	26	8	200	28	8	200
2.	G1	9	6	800	11	6	800	13	6	800	14	6	800	16	6	800	18	6	800	20	6	800
	G2	14	8	100	17	8	100	19	8	100	22	8	100	25	8	100	28	8	100	30	8	100
	G3	10	6	600	12	6	600	14	6	600	16	6	600	18	6	600	20	6	600	22	6	600
	G4	10	7	450	12	7	450	14	7	450	16	7	450	18	7	450	20	7	450	22	7	450
	G5	12	8	2500	14	8	2500	17	8	2500	19	8	2500	21	8	2500	24	8	2500	26	8	2500
	G6	17	7	3800	20	7	3800	23	7	3800	27	7	3800	30	7	3800	34	7	3800	36	7	3800
	G7	9	5	200	11	5	200	13	5	200	14	5	200	16	5	200	18	5	200	20	5	200
	G8	13	5	1500	15	5	1500	18	5	1500	21	5	1500	23	5	1500	26	5	1500	28	5	1500
3.	G1	9	5	2500	11	5	2500	13	5	2500	14	5	2500	16	5	2500	18	5	2500	20	5	2500
	G2	17	7	3800	20	7	3800	23	7	3800	27	7	3800	30	7	3800	34	7	3800	36	7	3800
	G3	10	8	100	12	8	100	14	8	100	16	8	100	18	8	100	20	8	100	22	8	100
	G4	14	7	450	17	7	450	19	7	450	22	7	450	25	7	450	28	7	450	30	7	450
	G5	12	6	800	14	6	800	17	6	800	19	6	800	21	6	800	24	6	800	26	6	800
	G6	13	8	600	15	8	600	18	8	600	21	8	600	23	8	600	26	8	600	28	8	600
	G7	9	6	1500	11	6	1500	13	6	1500	14	6	1500	16	6	1500	18	6	1500	20	6	1500
	G8	10	5	200	12	5	200	14	5	200	16	5	200	18	5	200	20	5	200	22	5	200
4.	G1	17	8	800	20	8	800	23	8	800	27	8	800	30	8	800	34	8	800	36	8	800
	G2	10	7	100	12	7	100	14	7	100	16	7	100	18	7	100	20	7	100	22	7	100
	G3	12	5	600	14	5	600	17	5	600	19	5	600	21	5	600	24	5	600	26	5	600
	G4	9	6	200	11	6	200	13	6	200	14	6	200	16	6	200	18	6	200	20	6	200
	G5	10	8	2500	12	8	2500	14	8	2500	16	8	2500	18	8	2500	20	8	2500	22	8	2500
	G6	9	6	1500	11	6	1500	13	6	1500	14	6	1500	16	6	1500	18	6	1500	20	6	1500
	G7	14	7	3800	17	7	3800	19	7	3800	22	7	3800	25	7	3800	28	7	3800	30	7	3800
	G8	13	5	450	15	5	450	18	5	450	21	5	450	23	5	450	26	5	450	28	5	450
5.	G1	10	7	600	12	7	600	14	7	600	16	7	600	18	7	600	20	7	600	22	7	600
	G2	14	5	1500	17	5	1500	19	5	1500	22	5	1500	25	5	1500	28	5	1500	30	5	1500
	G3	13	6	200	15	6	200	18	6	200	21	6	200	23	6	200	26	6	200	28	6	200
	G4	9	8	100	11	8	100	13	8	100	14	8	100	16	8	100	18	8	100	20	8	100
	G5	10	7	3800	12	7	3800	14	7	3800	16	7	3800	18	7	3800	20	7	3800	22	7	3800
	G6	12	8	450	14	8	450	17	8	450	19	8	450	21	8	450	24	8	450	26	8	450
	G7	17	5	2500	20	5	2500	23	5	2500	27	5	2500	30	5	2500	34	5	2500	36	5	2500
	G8	9	6	800	11	6	800	13	6	800	14	6	800	16	6	800	18	6	800	20	6	800
6.	G1	10	5	200	12	5	200	14	5	200	16	5	200	18	5	200	20	5	200	22	5	200
	G2	12	6	3800	14	6	3800	17	6	3800	19	6	3800	21	6	3800	24	6	3800	26	6	3800
	G3	13	8	600	15	8	600	18	8	600	21	8	600	23	8	600	26	8	600	28	8	600
	G4	17	7	100	20	7	100	23	7	100	27	7	100	30	7	100	34	7	100	36	7	100
	G5	9	7	450	11	7	450	13	7	450	14	7	450	16	7	450	18	7	450	20	7	450
	G6	10	8	800	12	8	800	14	8	800	16	8	800	18	8	800	20	8	800	22	8	800
	G7	9	6	2500	11	6	2500	13	6	2500	14	6	2500	16	6	2500	18	6	2500	20	6	2500
	G8	14	5	1500	17	5	1500	19	5	1500	22	5	1500	25	5	1500	28	5	1500	30	5	1500
7.	G1	10	8	100	12	8	100	14	8	100	16	8	100	18	8	100	20	8	100	22	8	100
	G2	13	8	450	15	8	450	18	8	450	21	8	450	23	8	450	26	8	450	28	8	450
	G3	12	6	600	14	6	600	17	6	600	19	6	600	21	6	600	24	6	600	26	6	600
	G4	14	6	200	17	6	200	19	6	200	22	6	200	25	6	200	28	6	200	30	6	200
	G5	9	7	800	11	7	800	13	7	800	14	7	800	16	7	800	18	7	800	20	7	800
	G6	17	7	3800	20	7	3800	23	7	3800	27	7	3800	30	7	3800	34	7	3800	36	7	3800
	G7	10	5	1500	12	5	1500	14	5	1500	16	5	1500	18	5	1500	20	5	1500	22	5	1500
	G8	9	5	2500	11	5	2500	13	5	2500	14	5	2500	16	5	2500	18	5	2500	20	5	2500
8.	G1	13	8	200	15	8	200	18	8	200	21	8	200	23	8	200	26	8	200	28	8	200
	G2	10	6	600	12	6	600	14	6	600	16	6	600	18	6	600	20	6	600	22	6	600
	G3	9	5	1500	11	5	1500	13	5	1500	14	5	1500	16	5	1500	18	5	1500	20	5	1500
	G4	10	6	3800	12	6	3800	14	6	3800	16	6	3800	18	6	3800	20	6	3800	22	6	3800
	G5	14	5	450	17	5	450	19	5	450	22	5	450	25	5	450	28	5	450	30	5	450
	G6	17	7	100	20	7	100	23	7	100	27	7	100	30	7	100	34	7	100	36	7	100
	G7	12	7	800	14	7	800	17	7	800	19	7	800	21	7	800	24	7	800	26	7	800
	G8	9	8	2500	11	8	2500	13	8	2500	14	8	2500	16	8	2500	18	8	2500	20	8	2500
9.	G1	17	5	600	20	5	600	23	5	600	27	5	600	30	5	600	34	5	600	36	5	600
	G2	14	7	1500	17	7	1500	19	7	1500	22	7	1500	25	7	1500	28	7	1500	30	7	1500
	G3	9	8	3800	11	8	3800	13	8	3800	14	8	3800	16	8	3800	18	8	3800	20	8	3800
	G4	13	6	800	15	6	800	18	6	800	21	6	800	23	6	800	26	6	800	28	6	800
	G5	9	5	100	11	5	100	13	5	100	14	5	100	16	5	100	18	5	100	20	5	100
	G6	10	6	200	12	6	200	14	6	200	16	6	200	18	6	200	20	6	200	22	6	200
	G7	10	8	450	12	8	450	14	8	450	16	8	450	18	8	450	20	8	450	22	8	450
	G8	12	7	2500	14	7	2500	17	7	2500	19	7	2500	21	7	2500	24	7	2500	26	7	2500
10.	G1	9	6	450	11	6	450	13	6	450	14	6	450	16	6	450	18	6	450	20	6	450
	G2	10	8	200	12	8	200	14	8	200	16	8	200	18	8	200	20	8	200	22	8	200
	G3	9	5	2500	11	5	2500	13	5	2500	14	5	2500	16	5	2500	18	5	2500	20	5	2500
	G4	13	6	1500	15	6	1500	18	6	1500	21	6	1500	23	6	1500	26	6	1500	28	6	1500
	G5	17	7	800	20	7	800	23	7	800	27	7	800	30	7	800	34	7	800	36	7	800
	G6	10	5	100	12	5	100	14	5	100	16	5	100	18	5	100	20	5	100	22	5	100
	G7	14	8	3800	17	8	3800	19	8	3800	22	8	3800	25	8	3800	28	8	3800	30	8	3800
	G8	12	7	600	14	7	600	17	7	600	19	7	600	21	7	600	24	7	600	26	7	600
11.	G1	14	5	200	17	5	200	19	5	200	22	5	200	25	5	200	28	5	200	30	5	200
	G2	9	7	800	11	7	800	13	7	800	14	7	800	16	7	800	18	7	800	20	7	800
	G3	9	8	600	11	8	600	13	8	600	14	8	600	16	8	600	18	8	600	20	8	600
	G4	10	6	100	12	6	100	14	6	100	16	6	100	18	6	100	20	6	100	22	6	100
	G5	17	7	450	20	7	450	23	7	450	27	7	450	30	7	450	34	7	450	36	7	450
	G6	10	5	3800	12	5	3800	14	5	3800	16	5	3800	18	5	3800	20	5	3800	22	5	3800
	G7	12	6	1500	14	6	1500	17	6	1500	19	6	1500	21	6	1500	24	6	1500	26	6	1500
	G8	13	8	2500	15	8	2500	18	8	2500	21	8	2500	23	8	2500	26	8	2500	28	8	2500

3. melléklet: a 9.3 fejezetben tesztelésre használt feladatok

Állapot (*St*)		*St=0,5*			*St=0,6*			*St=0,7*			*St=0,8*			*St=0,9*			*St=1*			*St=1,1*		
	Gép száma	Határidő (*D*) perc	Feldolgozási idő (*P*) (perc)	Veszteség ktg (Ft/perc)	Határidő (*D*) perc	Feldolgozási idő (*P*) (perc)	Veszteség ktg (Ft/perc)	Határidő (*D*) perc	Feldolgozási idő (*P*) (perc)	Veszteség ktg (Ft/perc)	Határidő (*D*) perc	Feldolgozási idő (*P*) (perc)	Veszteség ktg (Ft/perc)	Határidő (*D*) perc	Feldolgozási idő (*P*) (perc)	Veszteség ktg (Ft/perc)	Határidő (*D*) perc	Feldolgozási idő (*P*) (perc)	Veszteség ktg (Ft/perc)	Határidő (*D*) perc	Feldolgozási idő (*P*) (perc)	Veszteség ktg (Ft/perc)
1	G1	10	7	450	12	7	450	14	7	450	16	7	450	18	7	450	20	7	450	22	7	450
	G2	10	5	100	12	5	100	14	5	100	16	5	100	18	5	100	20	5	100	22	5	100
	G3	9	6	1500	11	6	1500	13	6	1500	14	6	1500	16	6	1500	18	6	1500	20	6	1500
	G4	14	7	3800	17	7	3800	19	7	3800	22	7	3800	25	7	3800	28	7	3800	30	7	3800
	G5	9	5	600	11	5	600	13	5	600	14	5	600	16	5	600	18	5	600	20	5	600
	G6	12	6	2500	14	6	2500	17	6	2500	19	6	2500	21	6	2500	24	6	2500	26	6	2500
	G7	17	8	800	20	8	800	23	8	800	27	8	800	30	8	800	34	8	800	36	8	800
	G8	13	8	200	15	8	200	18	8	200	21	8	200	23	8	200	26	8	200	28	8	200
2	G1	9	6	800	11	6	800	13	6	800	14	6	800	16	6	800	18	6	800	20	6	800
	G2	14	8	100	17	8	100	19	8	100	22	8	100	25	8	100	28	8	100	30	8	100
	G3	13	6	600	15	6	600	18	6	600	21	6	600	23	6	600	26	6	600	28	6	600
	G4	12	7	450	14	7	450	17	7	450	19	7	450	21	7	450	24	7	450	26	7	450
	G5	10	8	2500	12	8	2500	14	8	2500	16	8	2500	18	8	2500	20	8	2500	22	8	2500
	G6	9	7	3800	11	7	3800	13	7	3800	14	7	3800	16	7	3800	18	7	3800	20	7	3800
	G7	10	5	200	12	5	200	14	5	200	16	5	200	18	5	200	20	5	200	22	5	200
	G8	17	5	1500	20	5	1500	23	5	1500	27	5	1500	30	5	1500	34	5	1500	36	5	1500
3	G1	17	5	2500	20	5	2500	23	5	2500	27	5	2500	30	5	2500	34	5	2500	36	5	2500
	G2	9	7	3800	11	7	3800	13	7	3800	14	7	3800	16	7	3800	18	7	3800	20	7	3800
	G3	12	8	100	14	8	100	17	8	100	19	8	100	21	8	100	24	8	100	26	8	100
	G4	10	7	450	12	7	450	14	7	450	16	7	450	18	7	450	20	7	450	22	7	450
	G5	13	6	800	15	6	800	18	6	800	21	6	800	23	6	800	26	6	800	28	6	800
	G6	14	8	600	17	8	600	19	8	600	22	8	600	25	8	600	28	8	600	30	8	600
	G7	10	6	1500	12	6	1500	14	6	1500	16	6	1500	18	6	1500	20	6	1500	22	6	1500
	G8	9	5	200	11	5	200	13	5	200	14	5	200	16	5	200	18	5	200	20	5	200
4	G1	9	8	800	11	8	800	13	8	800	14	8	800	16	8	800	18	8	800	20	8	800
	G2	10	7	100	12	7	100	14	7	100	16	7	100	18	7	100	20	7	100	22	7	100
	G3	14	5	600	17	5	600	19	5	600	22	5	600	25	5	600	28	5	600	30	5	600
	G4	12	6	200	14	6	200	17	6	200	19	6	200	21	6	200	24	6	200	26	6	200
	G5	17	8	2500	20	8	2500	23	8	2500	27	8	2500	30	8	2500	34	8	2500	36	8	2500
	G6	9	6	1500	11	6	1500	13	6	1500	14	6	1500	16	6	1500	18	6	1500	20	6	1500
	G7	10	7	3800	12	7	3800	14	7	3800	16	7	3800	18	7	3800	20	7	3800	22	7	3800
	G8	13	5	450	15	5	450	18	5	450	21	5	450	23	5	450	26	5	450	28	5	450
5	G1	10	7	600	12	7	600	14	7	600	16	7	600	18	7	600	20	7	600	22	7	600
	G2	17	5	1500	20	5	1500	23	5	1500	27	5	1500	30	5	1500	34	5	1500	36	5	1500
	G3	9	6	200	11	6	200	13	6	200	14	6	200	16	6	200	18	6	200	20	6	200
	G4	10	8	100	12	8	100	14	8	100	16	8	100	18	8	100	20	8	100	22	8	100
	G5	13	7	3800	15	7	3800	18	7	3800	21	7	3800	23	7	3800	26	7	3800	28	7	3800
	G6	9	8	450	11	8	450	13	8	450	14	8	450	16	8	450	18	8	450	20	8	450
	G7	14	5	2500	17	5	2500	19	5	2500	22	5	2500	25	5	2500	28	5	2500	30	5	2500
	G8	12	6	800	14	6	800	17	6	800	19	6	800	21	6	800	24	6	800	26	6	800
6	G1	12	5	200	14	5	200	17	5	200	19	5	200	21	5	200	24	5	200	26	5	200
	G2	13	6	3800	15	6	3800	18	6	3800	21	6	3800	23	6	3800	26	6	3800	28	6	3800
	G3	17	8	600	20	8	600	23	8	600	27	8	600	30	8	600	34	8	600	36	8	600
	G4	14	7	100	17	7	100	19	7	100	22	7	100	25	7	100	28	7	100	30	7	100
	G5	9	7	450	11	7	450	13	7	450	14	7	450	16	7	450	18	7	450	20	7	450
	G6	10	8	800	12	8	800	14	8	800	16	8	800	18	8	800	20	8	800	22	8	800
	G7	9	6	2500	11	6	2500	13	6	2500	14	6	2500	16	6	2500	18	6	2500	20	6	2500
	G8	10	5	1500	12	5	1500	14	5	1500	16	5	1500	18	5	1500	20	5	1500	22	5	1500
7	G1	10	8	100	12	8	100	14	8	100	16	8	100	18	8	100	20	8	100	22	8	100
	G2	10	8	450	12	8	450	14	8	450	16	8	450	18	8	450	20	8	450	22	8	450
	G3	9	6	600	11	6	600	13	6	600	14	6	600	16	6	600	18	6	600	20	6	600
	G4	9	6	200	11	6	200	13	6	200	14	6	200	16	6	200	18	6	200	20	6	200
	G5	13	7	800	15	7	800	18	7	800	21	7	800	23	7	800	26	7	800	28	7	800
	G6	17	7	3800	20	7	3800	23	7	3800	27	7	3800	30	7	3800	34	7	3800	36	7	3800
	G7	12	5	1500	14	5	1500	17	5	1500	19	5	1500	21	5	1500	24	5	1500	26	5	1500
	G8	14	5	2500	17	5	2500	19	5	2500	22	5	2500	25	5	2500	28	5	2500	30	5	2500
8	G1	17	8	200	20	8	200	23	8	200	27	8	200	30	8	200	34	8	200	36	8	200
	G2	10	6	600	12	6	600	14	6	600	16	6	600	18	6	600	20	6	600	22	6	600
	G3	14	5	1500	17	5	1500	19	5	1500	22	5	1500	25	5	1500	28	5	1500	30	5	1500
	G4	12	6	3800	14	6	3800	17	6	3800	19	6	3800	21	6	3800	24	6	3800	26	6	3800
	G5	9	5	450	11	5	450	13	5	450	14	5	450	16	5	450	18	5	450	20	5	450
	G6	10	7	100	12	7	100	14	7	100	16	7	100	18	7	100	20	7	100	22	7	100
	G7	9	7	800	11	7	800	13	7	800	14	7	800	16	7	800	18	7	800	20	7	800
	G8	13	8	2500	15	8	2500	18	8	2500	21	8	2500	23	8	2500	26	8	2500	28	8	2500
9	G1	14	5	600	17	5	600	19	5	600	22	5	600	25	5	600	28	5	600	30	5	600
	G2	12	7	1500	14	7	1500	17	7	1500	19	7	1500	21	7	1500	24	7	1500	26	7	1500
	G3	9	8	3800	11	8	3800	13	8	3800	14	8	3800	16	8	3800	18	8	3800	20	8	3800
	G4	10	6	800	12	6	800	14	6	800	16	6	800	18	6	800	20	6	800	22	6	800
	G5	9	5	100	11	5	100	13	5	100	14	5	100	16	5	100	18	5	100	20	5	100
	G6	13	6	200	15	6	200	18	6	200	21	6	200	23	6	200	26	6	200	28	6	200
	G7	10	8	450	12	8	450	14	8	450	16	8	450	18	8	450	20	8	450	22	8	450
	G8	17	7	2500	20	7	2500	23	7	2500	27	7	2500	30	7	2500	34	7	2500	36	7	2500
10	G1	12	6	450	14	6	450	17	6	450	19	6	450	21	6	450	24	6	450	26	6	450
	G2	10	8	200	12	8	200	14	8	200	16	8	200	18	8	200	20	8	200	22	8	200
	G3	9	5	2500	11	5	2500	13	5	2500	14	5	2500	16	5	2500	18	5	2500	20	5	2500
	G4	17	6	1500	20	6	1500	23	6	1500	27	6	1500	30	6	1500	34	6	1500	36	6	1500
	G5	9	7	800	11	7	800	13	7	800	14	7	800	16	7	800	18	7	800	20	7	800
	G6	13	5	100	15	5	100	18	5	100	21	5	100	23	5	100	26	5	100	28	5	100
	G7	14	8	3800	17	8	3800	19	8	3800	22	8	3800	25	8	3800	28	8	3800	30	8	3800
	G8	10	7	600	12	7	600	14	7	600	16	7	600	18	7	600	20	7	600	22	7	600
11	G1	17	5	200	20	5	200	23	5	200	27	5	200	30	5	200	34	5	200	36	5	200
	G2	10	7	800	12	7	800	14	7	800	16	7	800	18	7	800	20	7	800	22	7	800
	G3	9	8	600	11	8	600	13	8	600	14	8	600	16	8	600	18	8	600	20	8	600
	G4	12	6	100	14	6	100	17	6	100	19	6	100	21	6	100	24	6	100	26	6	100
	G5	10	7	450	12	7	450	14	7	450	16	7	450	18	7	450	20	7	450	22	7	450
	G6	9	5	3800	11	5	3800	13	5	3800	14	5	3800	16	5	3800	18	5	3800	20	5	3800
	G7	14	6	1500	17	6	1500	19	6	1500	22	6	1500	25	6	1500	28	6	1500	30	6	1500
	G8	13	8	2500	15	8	2500	18	8	2500	21	8	2500	23	8	2500	26	8	2500	28	8	2500