

A Miskolci Egyetem Habilitációs Füzetek



MISKOLCI
EGYETEM
UNIVERSITY OF MISKOLC

LOGISZTIKAI RENDSZEREK OPTIMALIZÁLÁSA

Tudományos munkásság áttekintő összefoglalása

Készítette

Dr. Bányai Tamás József

aki az Informatikai Tudományok tudományágban „dr. habil.” cím
elnyerésére pályázik

Miskolc
2020

Tartalomjegyzék

1. Summary	4
2. Bevezetés.....	5
3. Kutatási eredmények a PhD fokozat megszerzése óta.....	6
3.1 Just-in-sequence ellátás tervezése	8
3.2 Üzemen belüli anyagellátási folyamatok tervezése	19
3.3 Sztochasztikus döntési fa alkalmazása termelés minőségellenőrzési folyamatainak tervezéséhez	33
3.4 Hulladékgyűjtési folyamat tervezése	39
3.5 First-mile és last-mile folyamatok optimalizálása	47
4. Összefoglalás.....	51
5. Kutatási eredmények hatása, jövőbeli tervek.....	53
6. Köszönetnyilvánítás	55
7. Tézisek alapjául szolgáló publikációk	56
8. Hivatkozások a tézisfüzetben	58

1. Summary

In the present habilitation thesis work, results of research carried out after my PhD dissertation entitled „Design methods of mobile robot-based loading unit building and sorting systems” are summarised according to the following topics:

1. Development of the structural model of different just-in-sequence supply solutions (make-to-sequence, ship-to-sequence, build-to-sequence) focusing on logistic costs. Development of a flower pollination algorithm-based heuristic optimization model of just-in-sequence supply focusing on sustainability aspects, including fuel consumption and emission.
2. Development of the mathematical model of in-plant supply processes in cyber-physical matrix production systems, including extended and real-time optimization from routing, assignment, and scheduling points of view. Development of a sequential black hole – floral pollination heuristic algorithm to optimize the described complex logistics system from sustainability (energy efficiency) point of view. Development of milkrun-based in-plant supply models and comparison of various milkrun-based supply strategies from cycle time point of view.
3. Development of a decision tree model with stochastic parameters that can determine the optimal operations depending on the quality of components to be assembled.
4. Description of application possibilities of Industry 4.0 technologies in waste collection solutions and the optimization potential in their processes. Introduction of the waste collection processes of downtowns as a cyber-physical system. Description of the model of these waste collection processes incorporating routing, assignment, and scheduling problems. Solution of the logistic problems with a binary bat algorithm, whose performance was validated with different benchmark functions.
5. Development of a new model and optimisation algorithm of first-mile/last-mile logistic processes focusing on real-time scheduling optimization possibilities.

2. Bevezetés

PhD értekezésemet „Mobilrobotos egységirakományképző és osztályozó rendszerek tervezési módszerei” címmel készítettem és védtem meg 1999-ben. Az azóta eltelt 20 évben kutatómunkám fókuszában az anyagmozgatási és logisztikai folyamatok tervezése és irányítása állt. Ezen kutatási terület műveléséhez az alapokat azon szakmai kompetencia biztosította, melyet *Cselényi József* és *Illés Béla* professzorok vezetése alatt szerzett több évtizedes oktatási és kutatás-fejlesztési tevékenység révén a Logisztikai Intézet kollektívája. Kutatómunkám során mindvégig építhettem a Miskolci Egyetem más intézeteinek támogatására, illetve az Intézet hazai és nemzetközi kapcsolataira, így számos, hazai és nemzetközi intézményt érintő kutatásban vehettem részt. Ezen kapcsolatok közül ki szeretném emelni *Kulcsár Béla* professzor szakmai támogatását, aki a Budapesti Műszaki Egyetem Építő- és Anyagmozgató Gépek Tanszékének akkori vezetőjeként hasznos tanácsaival segítette munkámat.

Húsz év távlatából visszatekintve úgy érzem, hogy kutatómunkám megkezdésekor már érezhető volt a negyedik ipari forradalom előszele, hiszen a just-in-time beszállítói és termelési rendszerek elterjedése, a virtuális vállalati és egyéb kooperációs formák megjelenése előrevetítette az infokommunikációs megoldásokra épülő nagyméretű logisztikai hálózatok kialakulását. Ez olyan optimalizálási megoldások alkalmazását tette szükségessé, melyek révén a kor gazdasági, társadalmi, műszaki és környezeti kihívásainak megfelelő nagyméretű logisztikai hálózatok alakíthatók ki és működtethetők [1]. Így kezdtem el foglalkozni a nagyméretű logisztikai rendszerek tervezési módszereinek vizsgálatával és kerültem egyre közelebb az NP-nehéz feladatok megoldása során hatékonyan alkalmazható heurisztikus és metaheurisztikus optimalizálási módszerekhez. Kutatómunkám kitűzött célja olyan heurisztikus és metaheurisztikus optimalizálási módszerek alkalmazása, továbbfejlesztése és kidolgozása volt, melyek révén biztosítható nagy komplexitású logisztikai rendszerek optimális kialakítása és működtetése, akár valós idejű irányítási igények esetében is. Kutatásaim során az üzemen belüli anyagellátási folyamatok fejlesztését, valamint az üzemen kívüli ellátási láncok optimális kialakítását támogató modelleket és módszereket dolgoztam ki. Jelen tézisfüzetben ezen két nagy területre fókuszálva mutatom be legfontosabb eredményeimet.

3. Kutatási eredmények a PhD fokozat megszerzése óta

A technológia, a gyártási folyamat, az egyes technológiai helyeken folyó gyártási és/vagy szerelési tevékenység összehangolt kivitelezésének és integrációjának fontos eszköze az anyagáramlás és az ahhoz kapcsolódó információáramlás, melyek együttesen a logisztika két alappillérét alkotják. A negyedik ipari forradalom kapcsán az információ kiemelt szerephez jut [2], és a komplex termelési és szolgáltatási rendszerek megjelenése egyre összetettebb logisztikai megoldásokat igényel mind az üzemen belüli anyagellátási rendszerek [3], mind az üzemen kívüli, földrajzilag elkülönült lokációkban elhelyezkedő objektumok közötti supply chain megoldások optimális kialakításának és működtetésének vonatkozásában [4]. Az egyre diverzifikáltabb vásárlói igények kielégítése a versenyszféra szereplőit arra kényszeríti, hogy folyamataikat optimalizálják, azaz költséghatékony megoldások révén tudják biztosítani a minél nagyobb fokú rendelkezésre állást és szállítókészséget. Az elmúlt húsz év tudományos munkásságát jelen téziszűzetben öt olyan súlyponti terület bemutatásán keresztül szeretném felvázolni, melyek áttekintést adnak beszerzési, termelési, elosztási és inverz logisztikai folyamatokat egyaránt érintő kutatásaim eredményeiről.

A **beszerzési logisztika** területén végzett kutatásaim közül jelen téziszűzetben az autóiipari szektorban egyre nagyobb jelentőségre szert tevő **just-in-sequence ellátás tervezési módszereinek kidolgozását** célzó munkám eredményeit mutatom be. Ennek oka az, hogy a just-in-time filozófia a diverzifikált vásárlói igények kielégítését célzó törekvések révén egyre inkább szükségessé tette olyan új ellátási stratégiák kidolgozását, melyek révén a megfelelő minőségű alkatrészek szerelőrendszerekbe történő beérkeztetése közvetlenül a szerelősorra lehetséges [5].

A **termelési logisztika** területéről két kutatási területet kívánok kiemelni. Ezen egyik ilyen terület a **kiber-fizikai termelési környezetben megvalósuló mátrixgyártás logisztikai feladataihoz kapcsolódó anyagkiszolgálási feladatok optimális kialakítását** és a **milkrun-alapú anyagellátás** vizsgálatát célzó munkám, mely során azt vizsgáltam, hogy milyen lehetőségek vannak a mátrixgyártásban lévő rugalmas technológiai objektumok (gyártó- és szerelőállomások) autonóm anyagmozgató berendezésekkel történő kiszolgálásának optimalizálására. A másik ilyen termelési logisztikai vonatkozással bíró terület a **sztochasztikus döntési fa alkalmazása a termelés**

minőségellenőrzési folyamatainak tervezéséhez. Ezen kutatás jól kiegészíti azt az *Illés Béla* professzor által végzett kutatómunkát, mely a minőségbiztosítás és a logisztika szinergikus kapcsolatát tárta fel [6].

Az **elosztási logisztika** területén az infokommunikáció technológiák elterjedése gyökeresen átalakította az értékesítési csatornákat [7], egyre inkább előtérbe kerülnek az e-commerce és e-business megoldások, melyeket a legtöbb végfelhasználó csak az e-boltok meglétével azonosít. A valóságban azonban az elektronikus piacterek térnyerése révén egyre hatékonyabb és rugalmasabb ellátási láncok alakulnak ki, melyekben a **first-mile és last-mile folyamatok optimalizálása** központi feladatként jelentkezik.

Az **inverz logisztikai folyamatok** optimális kialakítása a fenntarthatóság egyik fontos feltétele. A negyedik ipari forradalom kapcsán ezen inverz logisztikai folyamatok is jelentős változásokon mennek keresztül [8], melyek során a hagyományos inverz logisztikai folyamatok kiber-fizikai folyamatokká alakulnak át. Ezen területen végzett kutatásaimból a zárt láncú gazdaság fontos részét képező **kommunális hulladékgyűjtési rendszer kiber-fizikai környezetben történő kialakításához** kapcsolódó kutatásaimat mutatom be.

Az alábbiakban bemutatásra kerülő kutatási eredmények szorosan kapcsolódtak a Logisztikai Intézetben folyó kutatás-fejlesztési munkákhoz és fontos részét képezték a logisztikai rendszerek optimalizálása heurisztikus módszerekkel szakmai műhely kialakításának. A kutatások szorosan kötődtek intézeti és egyetemi OTKA alapkutatási projektekhez, ipari megbízások megvalósításához és nemzetközi TEMPUS és INCO-COPERNICUS projektekhez.

3.1 Just-in-sequence ellátás tervezése

A 90-es években hazánkba települő multinacionális cégek nem csupán korszerű gyártástechnológiákat honosítottak meg, hanem olyan termelési és logisztikai megoldásokat is megvalósítottak, melyek tervezésébe a Miskolci Egyetem Logisztikai Intézete is aktívan bekapcsolódhatott az elmúlt két évtizedben. Ezen kutatások egyik fókuszában a just-in-time termelési és beszállítói rendszerek tervezése és irányítása állt. Számos kutatás-fejlesztési és innovációs projekt került megvalósításra ezen a területen és azok eredményei beépültek az intézet által oktatott tantárgyakba és tankönyvekbe [9]. A negyedik ipari forradalom megjelenésével párhuzamosan a megnövekedett és diverzifikált vásárlói igények hatékony kielégítése a just-in-time beszállítói rendszerek fejlődéséhez vezetett és főként az autóipar és a mechatronikai összeszerelő ipar területén megjelentek a just-in-sequence (JIS) beszállítói rendszerek, melyek új kihívások elé állították a vállalatokat.

Ezen kihívások keltették fel érdeklődésemet a just-in-sequence beszállítási folyamatok iránt. Célul tűztem ki ezen napjainkban is nagyon dinamikusan fejlődő és nagy logisztikai és technológiai kihívást jelentő terület tervezési feladatainak megismerését és azok nagy méretére és komplexitására való tekintettel olyan heurisztikus algoritmusokon alapuló tervezési és irányítási módszerek kidolgozását, mely azok működését gazdasági és környezeti szempontból kedvezően befolyásolják [S1,S2].

A szakirodalom szerint a just-in-sequence ellátási stratégia alapjait a just-in-time filozófia képezi [10], azzal a különbséggel, hogy a cél nem csupán az, hogy a megfelelőségi elv alapján a megfelelő alkatrészek, a megfelelő mennyiségben és minőségben, a megfelelő helyről, a megfelelő helyre jussanak el, hanem az adott technológiai hely által igényelt sorrendben jelenjenek meg. Természetesen ezen különbség véleményem szerint akár el is hanyagolható, hiszen amennyiben a just-in-time alkatrészellátást igénylő termelő- vagy szerelőegység esetében a sorozatnagyságot egységnyiinek vesszük (one piece flow), azaz minden egyes alkatrészre külön megadjuk azt, hogy mikor álljon rendelkezésre az adott munkahelyen, akkor magát a just-in-sequence ellátási stratégia megvalósulását tapasztalhatjuk [S3,S4].

A just-in-sequence ellátási stratégiáknak a szakirodalomban három alapvető változata ismert: pick-to-sequence, ship-to-sequence és build-to-sequence stratégiák. A pick-to-sequence stratégia esetében a szerelősori igényeknek megfelelő kommissiók összeállítása egy szerelősori tárolóból történik. A ship-to-

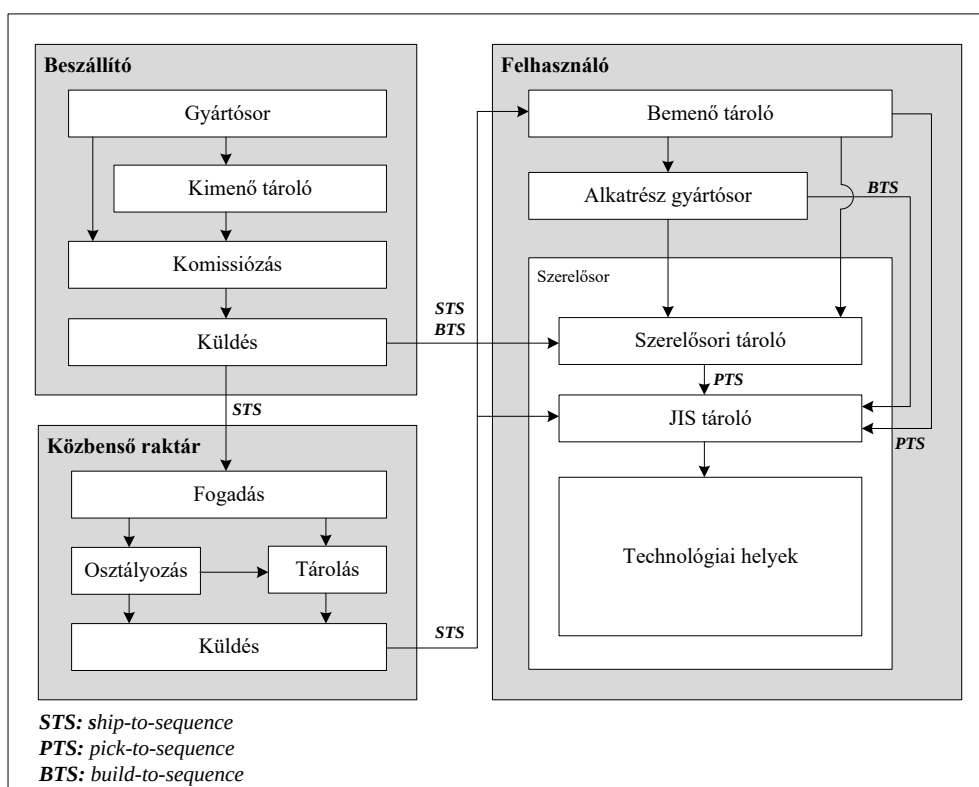
sequence stratégia esetében a szerelősori igényeknek megfelelő komissiók összeállítása már a felhasználási helyen kívül, a beszállítónál megtörténik. A build-to-sequence stratégia esetében a szerelősori igényeknek megfelelő komissiókba szükséges alkatrészek előállítása a szerelősori igények sorrendjében történik.

Mint ahogy az a három stratégia megfogalmazásából is kitűnik, a JIS ellátás megvalósításának két alapfeltétele van: vagy rendelkezésre kell állni egy olyan megfelelő készletnek, melyből a megfelelő ellátási szekvenciák kialakíthatóak, vagy az igényelt ellátási sorrendnek megfelelően gyárthatóak a szükséges alkatrészek [11].

A just-in-sequence ellátási rendszerek kialakításának feltételei szinte teljesen megegyeznek a lean filozófia alapelveivel, hiszen az alapvető cél mindkét esetben a veszteségek és azok okainak feltárása, a rendszerben meglévő felesleges elemek azonosítása és hasznossá tétele, vagy rendszerből történő eltávolítása. Ez jelentheti esetünkben a felesleges készletek megszüntetését, mely alapvetően a muda típusú veszteségek körébe sorolható, de okozhat egyéb mura és muri típusú veszteséget is [12]. Ez a készletcsökkentés különösen abban az esetben kihívás, amikor egy már just-in-time ellátást kell továbbfejleszteni just-in-sequence típusúvá, hiszen ekkor egy már egyébként is alacsony szinten lévő készletet kívánunk tovább csökkenteni költségeink redukálása céljából az ellátási biztonság további veszélyeztetése nélkül.

A pick-to-sequence ellátási stratégia nem feltétlenül tekinthető a teljes ellátási láncra vonatkozóan just-in-sequence típusú ellátásnak, hiszen mivel a felhasználás által igényelt megfelelő sorrendben összeállított komissiók elkészítése általában a felhasználónál lévő (jellemzően alapanyagraktári vagy szerelősori) készletekből történik, ezért csupán a szerelő munkahelyek ellátása tekinthető just-in-sequence elv szerint megvalósulónak és lehetséges, hogy az alapanyag tárolóba, vagy szerelősori tárolóba történő beszállítás sem just-in-time sem just-in-case elveket nem követ. Így ezen esetben célszerű vizsgálni a komissiók készzésére szolgáló készletek létrejöttét eredményező beszállítási folyamatokat is, hiszen csak így kaphatunk valós képet az ellátás valós jellegéről. A ship-to-sequence ellátási stratégia esetében a komissiók összeállítása nem a felhasználó telephelyén történik, hanem vagy a beszállítónál, vagy egy közbenső raktárban, esetleg cross docking létesítményben. Ez az ellátási stratégia már inkább megfelel a just-in-sequence elveknek, hiszen nem hozunk létre a pull rendszerekre nem jellemző nagy készleteket a felhasználónál, hanem azt eltoljuk az ellátási lánc korábbi pontjaira. A harmadik ellátási

stratégia a build-to-sequence, mely esetében a felhasználó által igényelt komissiók összeállításához szükséges termékek legyártása az igény felmerülése szerinti mennyiségben és sorrendben történik, így talán ez a modell közelíti meg leginkább a just-in-sequence elv just-in-time filozófián alapuló megvalósulását. Ezen okok miatt az egyes just-in-sequence ellátási stratégiák vizsgálatához egy olyan modellstruktúrát érdemes megalkotni, melyben megfogalmazhatóak a mindhárom ellátási stratégia jellemzésére alkalmas paraméterek és ezek összevetésével értékelhetőek az egyes módszerek. A bemutatott modellben (1. ábra) az ellátási lánc három fontos eleme található meg: a beszállító, a közbelső raktárak és a felhasználó.



1. ábra: Just-in-sequence beszállítás általános egyszerűsített modellje [S4]

A beszállító esetében a gyártást követően vagy közvetlenül elkészítésre kerülnek a kiszállításhoz szükséges komissiók, vagy az áru egy kimenő tárolóba kerül, amennyiben a kiszállításra szánt komissiók elkészítése még nem szükséges. A beszállítótól az áru vagy közvetlenül a felhasználóhoz kerül, vagy egy közbelső tárolóhelyre, mely a just-in-time alapú ellátási stratégiák esetében elterjedt megoldás. A közbelső raktárban a fogadást követően vagy a felhasználó által igényelt komissiók összeállítása, vagy a beérkezett áruk tárolása történik meg, majd a megfelelő időpontban megtörténik a felhasználó által igényelt áruk kiszállítása. A felhasználónál az áru három helyen jelenhet

meg: a bemenő tárolóban, a szerelősori tárolóban, vagy optimális esetben közvetlenül a szerelősori just-in-sequence tárolóban. Ezen röviden felvázolt folyamat esetében amennyiben sikerül megfogalmazni azon paramétereket, melyek alapján az egyes ellátási stratégiákat jellemezni tudjuk, akkor megfogalmazhatóak azok főbb jellemzői. Ennek érdekében meghatároztam a ship-to-sequence, pick-to-sequence és build-to-sequence ellátási stratégiák főbb költségkomponenseit az egyes stratégiai változatok esetében. Az alábbiakban a ship-to-sequence stratégia esetében kerülnek bemutatásra a kidolgozott főbb ellátási stratégiai változatok és az egyes költségkomponensek közötti kapcsolatok.

Ship-to-sequence beszállítási stratégiák

Ship-to-sequence ellátás esetében a szükséges alkatrészek az igény sorrendjében kerülnek beszállításra. A ship-to-sequence stratégiák esetében az alstratégiáknak három jellegzetes csoportját különböztethetjük meg (2. ábra).

STS1, STS2, STS3: Ezen ellátási stratégiák esetében a beszállító a felhasználó által igényelt alkatrészeket nem a felhasználó által igényelt sorrendben állítja elő, hiszen nem build-to-sequence módszerről van szó. Az előállított alkatrészek egy adott tárolási folyamat után kerülnek komissiózásra és közvetlenül beszállításra a felhasználó bemeneti, szerelősori vagy JIS tárolójába. Ugyan a beszállítótól érkező komissiók optimális esetben kerülhetnek közvetlenül a JIS tárolóba is, azonban általában egy megelőző tárolón keresztül érkeznek oda, melynek fő oka a JIS tároló foglaltsága lehet.

STS4, STS5, STS6: Ezen ellátási stratégiák esetében a beszállító a felhasználó által igényelt alkatrészeket nem a felhasználó által igényelt sorrendben állítja elő, az összeállított komissió közbenső raktárba vagy cross docking létesítménybe kerül, ahol elkészült a felhasználói igénynek megfelelő komissió és megtörténhet a beszállítás a felhasználó megfelelő tárolóiba.

STS7, STS8, STS9: A beszállító a felhasználó által igényelt alkatrészeket nem a felhasználó által igényelt sorrendben állítja elő, az összeállított komissió közbenső raktárba vagy cross docking létesítménybe kerül, ahol az ott tárolt alkatrészekkel kiegészülve készül el a felhasználói igénynek megfelelő komissió és történik meg a beszállítás. Ezen ellátási stratégiák abban az esetben alkalmazhatóak jól, amikor a beszállító nem tudja a teljes alkatrész igényt előállítani, így azt ki kell egészíteni a közbenső szinten tárolt készletekből.

	Folyamatelem	Ship-to-sequence ellátási stratégia								
		STS1	STS2	STS3	STS4	STS5	STS6	STS7	STS8	STS9
Beszállító	Felhasználó által igényelt alkatrészek gyártása (outsourcing)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Legyártott alkatrészek tárolása	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Felhasználó által igényelt alkatrészekből komissió összeállítása	○	○	○						
	Közbenső raktárba vagy cross dockingba történő szállításhoz komissió összeállítása				○	○	○	○	○	○
	Küldés felhasználóhoz	○	○	○						
	Küldés közbenső raktárba vagy cross docking létesítménybe				○	○	○	○	○	○
Közbenső raktár / cross docking	Beszállítótól érkező alkatrészek fogadása				○	○	○	○	○	○
	Beérkezett alkatrészek komissiózása a felhasználói igényeknek megfelelően				○	○	○	○	○	○
	Raktárban lévő alkatrészek komissiózása a felhasználói igényeknek megfelelően						○	○	○	○
	Beérkezett alkatrészek tárolása, amennyiben nincs igény közvetlen kiszállításra									
	Felhasználói igényeknek megfelelő komissiók küldése				○	○	○	○	○	○
Felhasználó	Beérkező alkatrészek fogadása a bemenő tárolóban			○			○			○
	Beérkező alkatrészek tárolása bemenő tárolóban			○			○			○
	Felhasználó által igényelt alkatrészek legyártása saját erőforrásokkal (insourcing)									
	Alkatrészek fogadása szerelősori tárolón		○			○			○	
	Felhasználó technológiai helyein igényelt alkatrészek tárolása szerelősori tárolón		○			○			○	
	Alkatrészek fogadása just-in-sequence tárolón	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Felhasználó technológiai helyein igényelt alkatrészek tárolása just-in-sequence tárolón	○	○	○	○	○	○	○	○	○

2. ábra: Ship-to-sequence ellátási stratégia folyamatelemei az egyes stratégiai változatok esetében [S4]

Az egyes ellátási stratégiák esetében érdemes megjegyezni, hogy alkalmazásuknak fontos feltétele, hogy a beszállítók rendelkezzenek a just-in-time beszállításhoz szükséges feltételekkel, melyek alapvetően az integrált információfeldolgozás, a gyártásszegmentálás és a termeléssel szinkron beszerzés meglétét jelentik [13,14].

Integrált adatfeldolgozás alatt a felhasználó és a beszállító közötti integrált vállalatirányítási rendszeren keresztül megvalósuló folyamatos kommunikációt

kell érteni, melynek több időhorizonton kell megvalósulnia azért, hogy a beszállító is tervezni tudja alkatrész gyártási folyamatát és a termeléssel szinkron beszerzés, valamint és a gyártásszegmentálás is megfelelően ütemezhető legyen. A közbelső raktárak és a cross docking létesítmények ugyan pufferként szolgálva segíthetnek a felhasználónál jelentkező igények és a beszállítónál rendelkezésre álló gyártási kapacitások közötti eltérésekből adódó ciklusidő aszinkronitások kiegyenlítésében, de alapvetően ragaszkodni kell ezen ellátási stratégiák esetében a just-in-time elv megvalósításához.

Just-in-sequence ellátás tervezése

A just-in-sequence ellátás tervezésére kidolgozott modell [S5] döntési változói a következők: potenciális beszállítók hozzárendelése az egyes beszállítási szekvenciákhoz és a hozzárendelt beszállítások ütemezése. A felhasználó részéről az igények a termelési vezérprogramból származtathatóak le, akár egy egyszerű MRP I. segítségével. Vezessük be a következő paramétereket:

- m a szekvenciák száma, ahol $i = 1 \dots m$,
- n_i a megrendelések száma az i . szekvenciában, ahol $j = 1 \dots n_i$
- p a potenciális beszállítóktól rendelhető termékféleségek száma, ahol $k = 1 \dots p$,
- Ξ_i az i . szekvenciához rendelt termékek halmaza,
- $d_{i,j}$ az i . szekvencia j . rendelésének típusa,
- $q_{i,j}$ az i . szekvencia j . rendelésének mennyisége,
- s_α α . beszállító, ahol $\alpha = 1 \dots \xi$,
- $a_{\alpha,k}^{\min}$ a k . termékből az α . beszállítótól rendelhető minimális mennyiség,
- $a_{\alpha,k}^{\max}$ az α . beszállítónál rendelkezésre álló mennyiség a k . termékből,
- Θ_k a k . termék potenciális beszállítóinak halmaza:

$$\exists(k \in \Xi_i): a_{\alpha,k}^{\min} \leq \sum_{j=1}^{n_i} q_{ij} \leq a_{\alpha,k}^{\max} \rightarrow \alpha \in \Theta_k \quad (1.1)$$

- Ψ_i az i . szekvencia potenciális beszállítóinak halmaza:

$$\forall(k \in \Xi_i): \alpha \in \Theta_k \rightarrow \alpha \in \Psi_i \quad (1.2)$$

- $c_{\alpha,k}$ a k . termék költsége az α . beszállító esetében,
- $e_{\alpha,k}$ fajlagos energiafelhasználás a k . termék α . beszállítótól való beszállítása esetén.

Az autóiparban is egyre nagyobb hangsúlyt kapnak a zöld ellátási láncok [15], így az egybeszállító rendszer esetében az optimalizálás célfüggvénye az energiafelhasználás minimalizálása és az ellátási költség minimalizálása:

$$C_s = \mu_1 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{\alpha=1}^{\xi} e_{\alpha,k} x_{\alpha,i,j} + \mu_2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{\alpha=1}^{\xi} c_{\alpha,k} x_{\alpha,i,j} \rightarrow \min. \quad (1.3)$$

ahol μ_1 és μ_2 a két célfüggvény súlyozási paraméterei, $x_{\alpha,i,j}$ a döntési változó, mely az α . beszállító i . szekvencia j . rendeléséhez tartozását definiálja:

$$\mu_1 + \mu_2 = 1 \quad \wedge \quad \mu_1, \mu_2 \geq 0 \quad (1.4)$$

Több-beszállító rendszer esetében az egybeszállító rendszer kiegészül a szekvenciaképzés költségével is, hiszen amennyiben egy szekvencia több beszállítótól kerül beszerzésre, akkor vagy a felhasználónál, vagy az ellátási lánc egy közbelső fázisában (konszignációs raktár vagy crossdocking létesítmény) szükséges a termelési vezérprogramból származtatott szekvenciák képzése:

$$C_m = \mu_1 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{\alpha=1}^{\xi} e_{\alpha,k} x_{\alpha,i,j} + \mu_2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{\alpha=1}^{\xi} c_{\alpha,k} x_{\alpha,i,j} + c_{seq}(n_\alpha) \rightarrow \min. \quad (1.5)$$

ahol $c_{seq}(n_\alpha)$ a szekvenciaképzés költsége, mely a szekvenciában lévő termékek számának a függvénye.

Korlátozás 1: A beszállítók száma korlátozott:

$$\forall i = 1 \dots m: \sum_{\alpha=1}^{\xi} \sum_{j=1}^{n_i} x_{\alpha,i,j} \leq \xi^{max} \quad (1.6)$$

ahol ξ^{max} az egy szekvenciához maximálisan rendelhető beszállítók száma. Egybeszállító rendszer esetén $\xi^{max}=1$, míg több-beszállító rendszer esetén $\xi^{max} > 1$.

Korlátozás 2: Minden egyes szekvencia számára definiálható egy olyan szűk időkorlát melyen belül kell azoknak teljesülni:

$$\forall i = 1 \dots m, j = 1 \dots n_i, \alpha = 1 \dots \xi:$$

$$t_i^{min} \leq t_{\alpha,i}^{min} = \min_j t_{\alpha,i,j}^{min} \wedge t_i^{max} \geq t_{\alpha,i}^{max} = \max_j t_{\alpha,i,j}^{max}, \quad (1.7)$$

$$t_{\alpha,i,j}^{min} \leq t_{\alpha,i,j}^{sch} \wedge t_{\alpha,i,j}^{sch} \leq t_{\alpha,i,j}^{max}, \quad (1.8)$$

ahol

- t_i^{min} és t_i^{max} az i . szekvencia beszállítási idejére vonatkozó alsó és felső korlát,
- $t_{\alpha,i}^{min}$ és $t_{\alpha,i}^{max}$ az α . beszállító szállítási idejére vonatkozó alsó és felső korlát az i . szekvencia esetében,
- $t_{\alpha,i,j}^{min}$ és $t_{\alpha,i,j}^{max}$ az α . beszállító szállítási idejére vonatkozó alsó és felső korlát az i . szekvencia j . terméke esetében,

- $t_{\alpha,i,j}^{sch}$ az α . beszállító ütemezett beszállítási ideje az i . szekvencia j . terméke esetében.

Korlátozás 3: A beszállítást végző járművek szállítási kapacitása korlátozott:

$$\forall i = 1 \dots m, \alpha = 1 \dots \xi: \sum_{j=1}^{n_i} w(d_{i,j}, q_{i,j}) \leq w_{\alpha}^{max} \quad (1.9)$$

ahol $w(d_{i,j}, q_{i,j})$ az i . szekvencia j . rendeléséhez tartozó termék tömege az α . beszállító esetében, mely függvénye a mennyiségnek és a típusnak.

Korlátozás 4: Az α . beszállítónál a k . termékből rendelkezésre álló mennyiségnek meg kell haladnia a k . termékből α . beszállítóhoz rendelt mennyiséget:

$$\forall \alpha = 1 \dots \xi: \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} x_{\alpha,i,j} q_{i,j} \leq a_{\alpha,k}^{max} \quad (1.10)$$

Az optimalizálási feladat első döntési változója a hozzárendelési mátrix, mely a potenciális beszállítók szekvenciákhoz és rendelésekhez társítását definiálja, mint egy bináris mátrix:

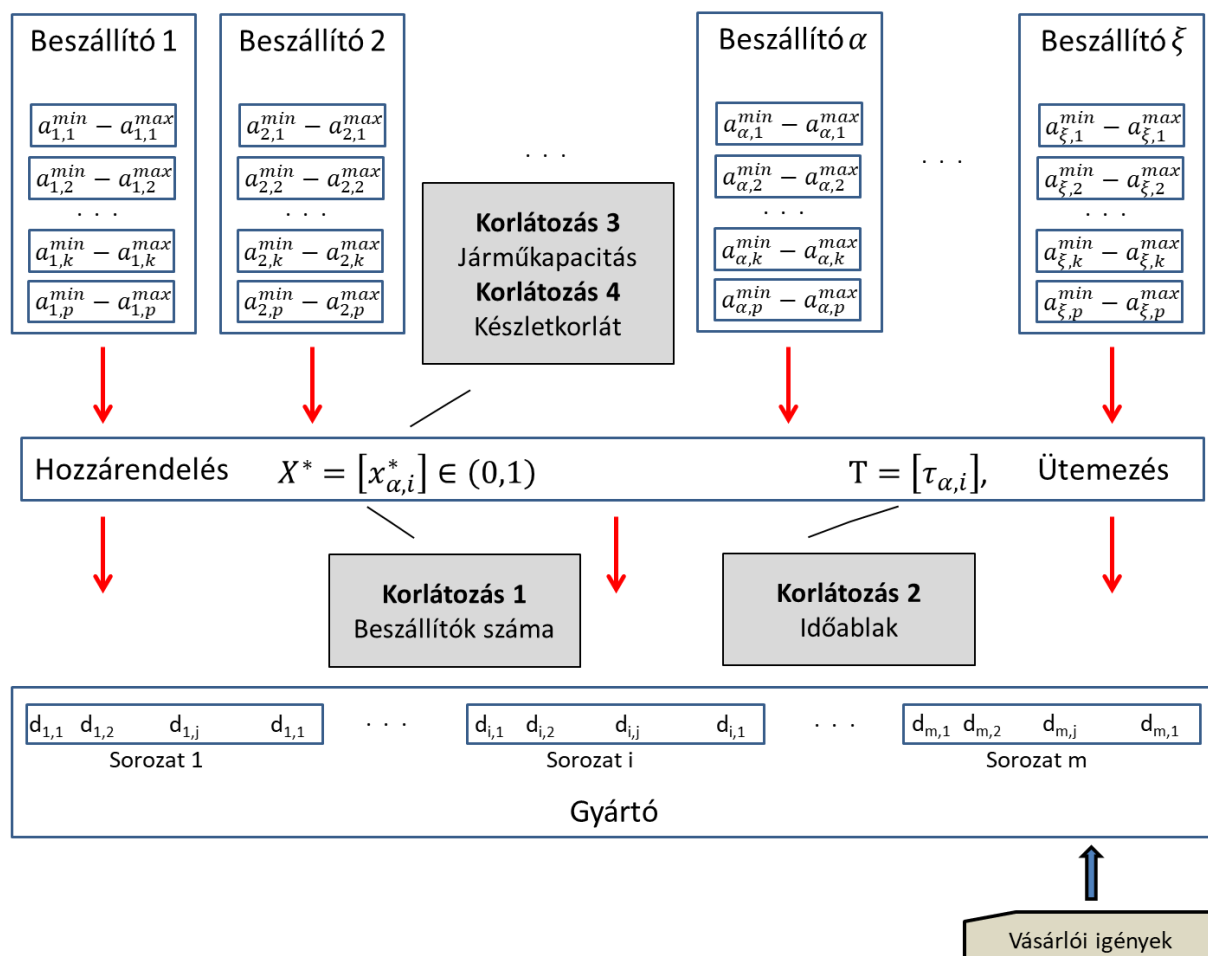
$$X = [x_{\alpha,i,j}] \in (0,1) \quad (1.11)$$

A másik döntési változó az ütemezést definiáló mátrix $T = [\tau_{\alpha,i}]$, mely megadja, hogy melyik beszállító, melyik szekvenciát, mikor szállítja. Amennyiben egy szekvenciát több beszállító szállít, akkor a kiegészítő szekvenciaképzési időt is figyelembe kell venni. Ebben az esetben az i . szekvencia alsó és felső korlátját csökkenteni kell ezzel a szekvenciaképzési idővel:

$$t_i^{min*} = t_i^{min} - \tau_{\alpha,i} \quad \wedge \quad t_i^{max*} = t_i^{max} - \tau_{\alpha,i} \quad (1.12)$$

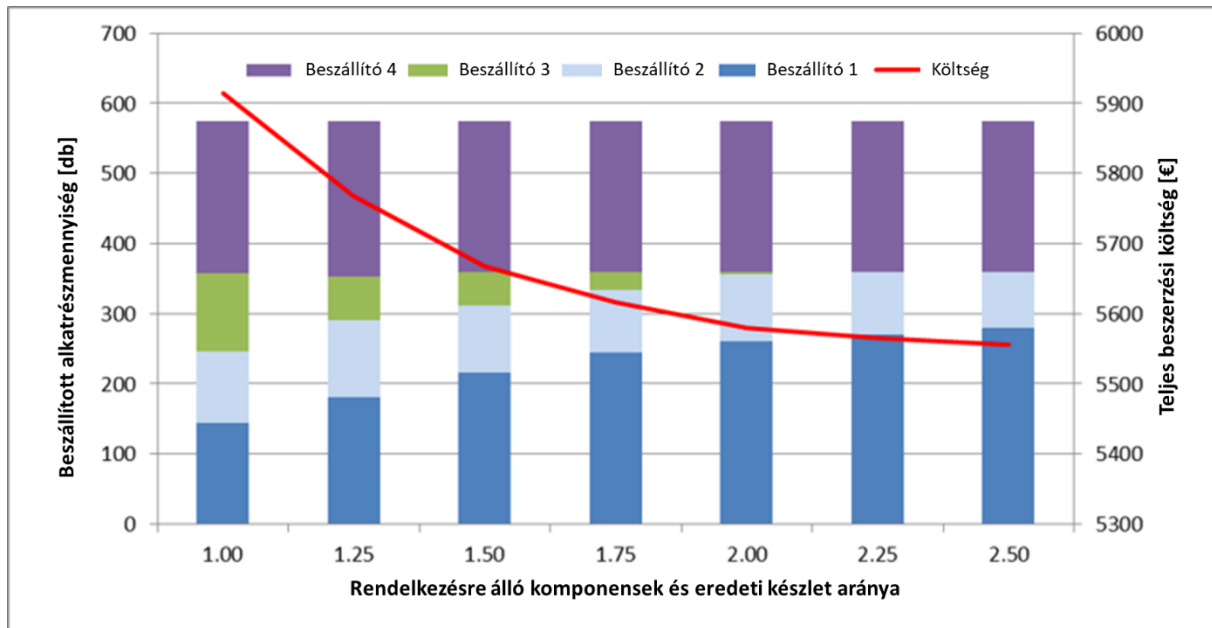
A bemutatott just-in-sequence beszállítás modelljét egy beszállító esetében a 3. ábra szemlélteti. A fentiekben bemutatott optimalizálási feladat megoldása annak NP-nehéz volta miatt heurisztikus módszerrel ajánlott. Néhány heurisztikus módszer tesztfüggvények segítségével történő összehasonlítását követően választottam a flower pollination algoritmust, mely a pollenek külső ágensek (rovarok, szél, madarak, emlősök, víz) segítségével történő mozgását modellezi és a következő főbb szabályokon alapszik [16]:

- az optimalizálási feladat egyes megoldásait virág pollenek reprezentálják,
- az állapottérben a globális keresés a biotikus porzás Lévy-repüléssel kerül leírásra,
- a lokális keresést az abiotikus porzás és az önporzás írja le,
- a globális és lokális keresés dinamizmusát a biotikus, abiotikus és önporzás valószínűségeinek változtatása révén szabályozzuk.



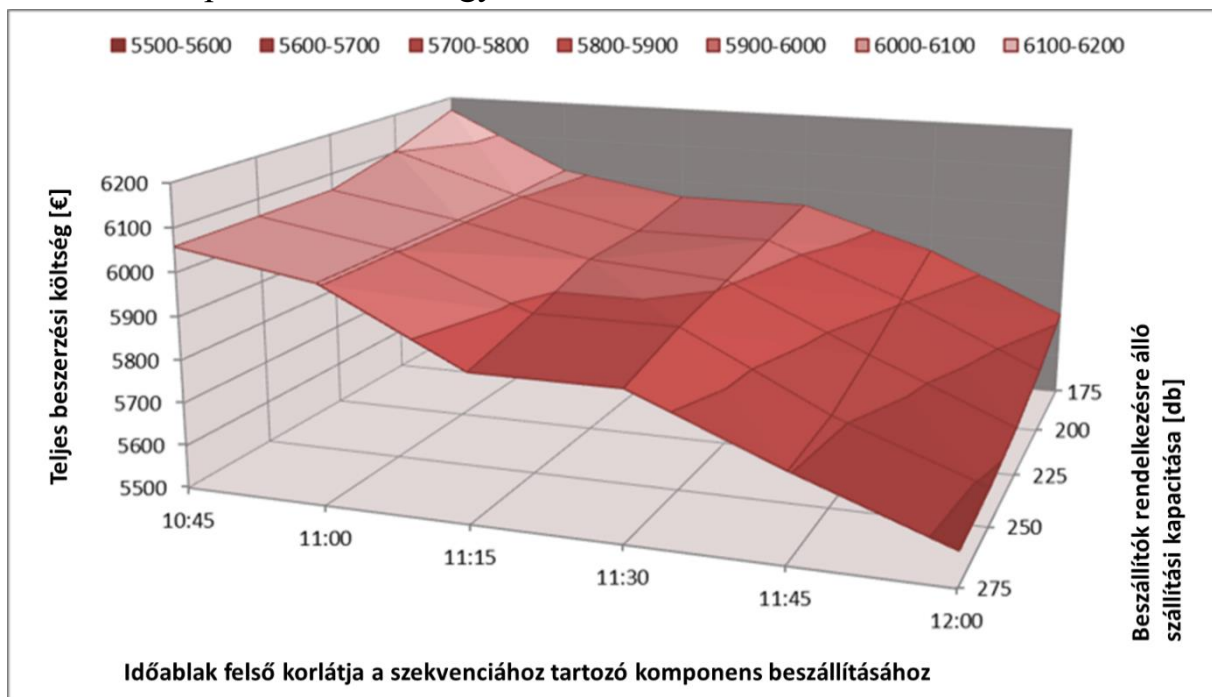
3. ábra: Az egybeszállítós rendszer modellje (egy szekvenciát egy beszállító szállít be) [S5]

Több esettanulmány segítségével végeztem el a fentiekben bemutatott modell vizsgálatát úgy, hogy adottak voltak a felhasználó által igényelt beszállítási szekvenciák, a beszállítók szállítási kapacitása és raktárkészlete korlátos, a különböző alkatrészek rendelkezésre állása az idő függvényében dinamikusan változik és az egyes komponensek fajlagos beszerzési ára is adott. Az esettanulmányokban a fajlagos beszerzési költségek nem függtek a rendelt mennyiségtől és tartalmazták a beszerzéshez kapcsolódó termelési és logisztikai költségeket. Az esettanulmány azt mutatta, hogy a rendelkezésre álló alkatrészek arányának növekedése átstrukturálja a beszállított alkatrészek arányát is. A rendelkezésre álló alkatrészek mennyisége hatással van a teljes beszerzési költségre; a beszállítók rendelkezésre-állásának növekedése lehetőséget ad olcsóbb beszállítók bevonására az egyes szekvenciák teljesítése érdekében. Hasonló hatások figyelhetők meg az idő- és kapacitáskorlátok bevezetésével és szigorításával (4. ábra).



4. ábra: A rendelkezésre álló termékek hatása az optimális beszállítói struktúrára és a beszerzési költségre [S5]

Az idő- és kapacitáskorlátok együttes hatását az 5. ábra szemlélteti.



5. ábra: Az időkorlátozás és a szállítási kapacitás együttes hatása az optimális beszállítói struktúrára és a beszerzési költségre [S5]

Mint azt a fenti esettanulmányok is bizonyították, a folyamatparaméterek jelentős hatással vannak a just-in-sequence beszállítói rendszer teljesítményére, ezért elengedhetetlen a teljesítőképesség növelése érdekében a folyamatot befolyásoló paraméterek pontos ismerete és optimalizálása.

Új tudományos eredmény

Kidolgoztam a just-in-sequence beszállítás három alapvető típusának (make-to-sequence, ship-to-sequence, build-to-sequence) költségét befolyásoló főbb logisztikai tevékenységek strukturális modelljét. Kidolgoztam egy olyan matematikai modellt, mely alkalmas a just-in-sequence beszállítás teljesítményének növelésére alkalmas rendszerparaméterek optimalizálására. Az NP-nehéz optimalizálási probléma megoldására a flower pollination heurisztikát alkalmaztam, ahol az állapottérben a globális keresés a biotikus porzás, míg a lokális keresés az abiotikus porzás és az önporzás modellezése révén kerül megoldásra [S1-S5].

3.2 Üzemen belüli anyagellátási folyamatok tervezése

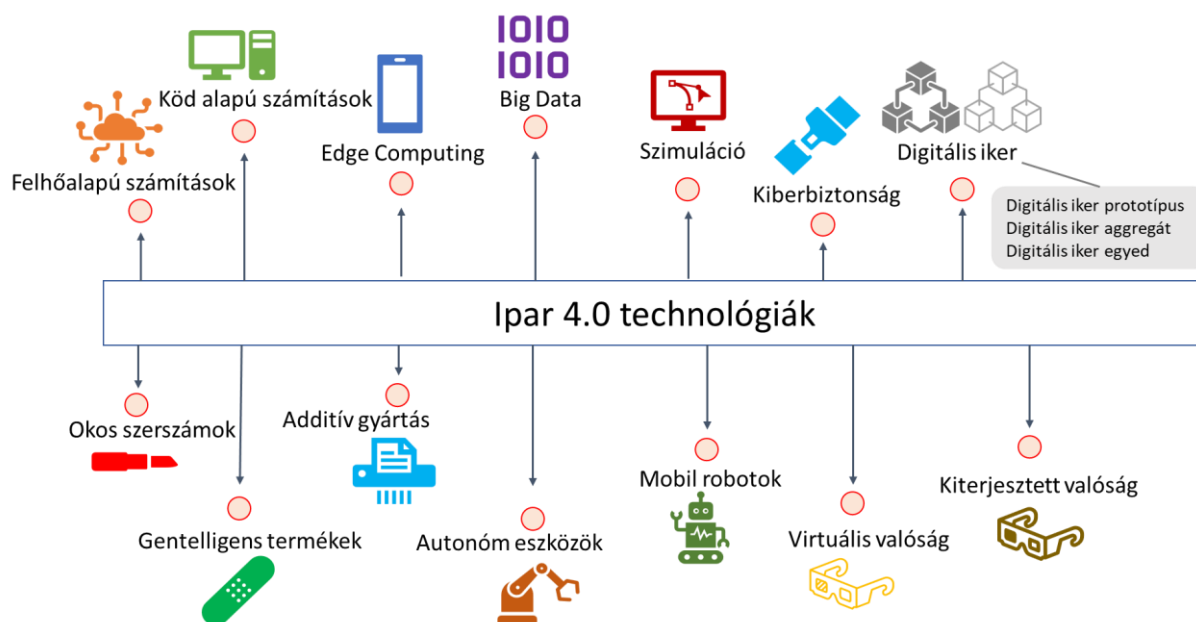
A dinamikusan változó vásárlói igények kielégítése céljából a termelési és szolgáltatási tevékenységet végző vállalatok Ipar 4.0 képességeinek fejlesztése elengedhetetlenül fontos hatékonyságuk növelése és kapacitásuk bővítése érdekében. Ezen cél elérése érdekében szükséges a digitalizáció, a vertikális és horizontális integráció erősítése, valamint a felhő alapú szolgáltatások széles körű elterjesztése [17].

A negyedik ipari forradalom a technológiai fejlődés egy olyan időszakaként jellemezhető, amikor az információs és telekommunikációs technológiák, valamint az automatizálás integrációja révén a termelési és szolgáltatási tevékenységek, valamint azok üzleti modelljei jelentősen átalakulnak. A termelés különböző területein (például gépipar, élelmiszeripar) a szenzorok és szenzorhálózatok, termelő berendezések, munkadarabok, szerszámok és az IT rendszerek a teljes értéklánc mentén összekapcsolódnak [18].

Az Ipar 4.0 Nemzeti Technológiai Platform Szövetség álláspontja szerint az Ipar 4.0 lehetővé teszi a vevői igényekre történő gyorsabb reagálást, az egyedi igényeknek megfelelő termékek gazdaságos és hatékony előállítását, illetve megalapozza és felgyorsítja az új üzleti modellek adaptálását, az új gyártási eljárások gyors bevezetését. A termelési feladatokat a humán erőforrásoktól egyre inkább átvevő termelő berendezések fogják végezni, amelyek az automatizált működés mellett a rendelkezésre álló valós idejű információk alapján döntéshozatalra és a termelési folyamatok optimalizálására is képesek [S6]. Ilyen jellegű fejlesztések révén a vállalatok számára lehetőség nyílik költségeik csökkentésére, versenyképességük javítására, gyártási és logisztikai folyamataik optimalizálására. Ezt ismerte fel a Miskolci Egyetem Logisztikai Intézetének kollektívája is és már *Cselényi József* professzor vezetésével is végzett a negyedik ipari forradalom kihívásaira választ kereső kutatásokat. *Illés Béla* professzor, mint az Ipar 4.0 Nemzeti Technológiai Platform Szövetség Gyártás és Logisztika Munkacsoportjának vezetője ezen kutatásokat tovább intenzifikálta és kiterjesztette a Logisztika 4.0 területére.

A termelővállalatoknak egyre inkább alkalmazniuk kell hatékonyságuk, megbízhatóságuk és termelékenységük növelése érdekében a kiber-fizikai rendszerek megoldásait, ezért kihívásnak tekintetem ezen kutatási terület megismerését. Statisztikai kimutatások szerint 2019 év végén a multinacionális vállalatok kb. 75%-a hagyományos rendszereit IoT megoldásokkal kiber-fizikai rendszerré alakította és kiber-fizikai környezetben működteti. Ez olyan korszerű

termelési rendszerek és azokhoz kapcsolódó úgynevezett Ipar 4.0 technológiák (6. ábra) bevezetését is szükségessé teszi, melyek révén az egyedi vásárlói igények tömeggyártás hatékonyságával való kielégítése lehetséges.



6. ábra: Ipar 4.0 technológiák [saját szerkesztés]

Mátrixgyártás

A KUKA AG egy olyan új, mátrixgyártásnak nevezett gyártási struktúrát dolgozott ki, mely alkalmas a gyártási rendszerekben jelentkező erőforrásproblémák kezelésére. Egy mátrixgyártási rendszerben szabadon konfigurálható gyártó- és/vagy szerelőcellák vannak grid-layoutban elrendezve és az egyes gyártó/szerelő erőforrások között az anyagkezelési feladatokat vezető nélküli targoncák végzik. A mátrixgyártás számos olyan technológiai megoldást tartalmaz, mely részét képezi az IoT technológiáknak: szabványosított, rugalmasan konfigurálható gyártó- és/vagy szerelőcellák, üzemben belüli anyagmozgató rendszerek, szimulációs [19] és digitális iker megoldások az előrejelzések és az optimalizálási folyamatok hatékonyságának növelésére, intelligens szerszámok és gentelligens termékek, melyek életciklusadataik gyűjtésével és a környezetükbe integrált szenzorok segítségével teljes életciklusuk folyamataira hatást gyakorolnak. Ezen korszerű mátrix struktúrájú megoldások a feladatok nagyfokú flexibilitása miatt egy olyan anyagáramlási rendszert igényelnek, mely alkalmas a gyártórendszerben dinamikusan változó anyagkezelési feladatok kielégítésére. Kutatómunkám során jelentős figyelmet szenteltem a mátrix gyártás logisztikai folyamatainak tervezésére és kutatásom során német, kubai és kínai kutatókkal együtt végezhettem munkámat és készíthettem közös publikációt. A szakirodalmi források jelentős része ugyan a

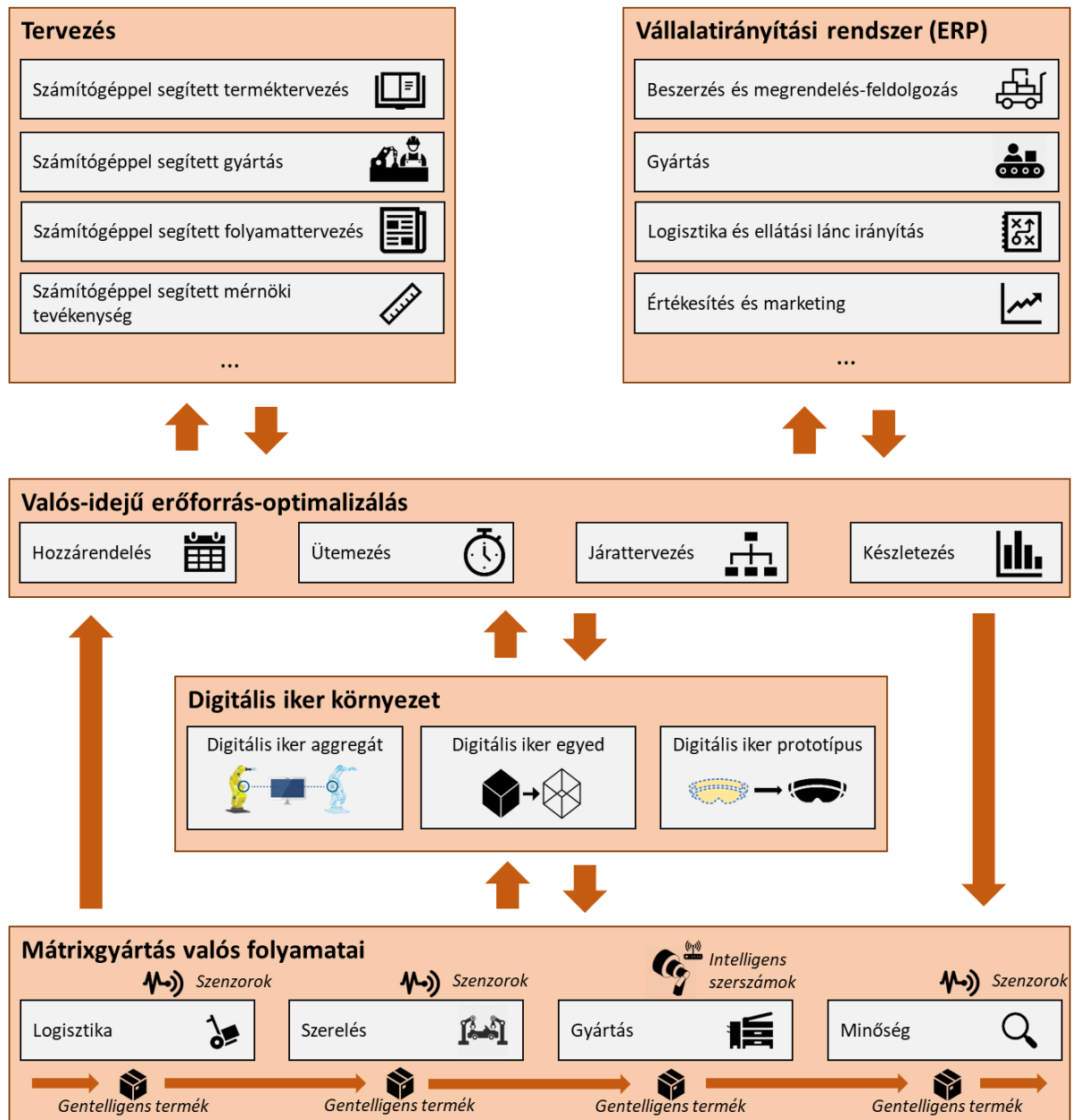
hagyományos és rugalmas gyártórendszerek mellett foglalkozik a moduláris gyártás [20], a hibrid gyártás [21], a holonikus gyártás [22] és a virtuális vállalatok [23] anyagáramlási folyamatainak tervezésével és irányításával, azonban csak csekély számú szakirodalom áll rendelkezésre a mátrixgyártás üzemen belüli folyamatainak tervezésére vonatkozóan, ezért is tartom indokoltnak ezen terület kutatását.

Mint ahogy azt a mátrixgyártás koncepciója definiálja, a logisztikai rendszer alkalmas autonóm eszközök segítségével az összes mátrix cella előre definiált időtartományon belüli anyagellátási feladatainak megvalósítására [24]. A mátrixgyártás anyagellátási rendszerének irányítási algoritmusa a vállalatirányítási rendszer és a gyártás fizikai folyamatai között helyezkedik el úgy, hogy a tervezés során támogatást kaphat különböző digitális iker megoldásoktól (7. ábra).

A mátrixgyártás anyagellátási rendszerének modelljében két különböző anyagellátási feladatot különböztethetünk meg. Az első típusba tartoznak azon igények, melyek az ERP-ben rendelkezésre állnak és előre lehet azokat ütemezni egy adott időhorizonton belül. A második csoportba azon anyagellátási feladatok tartoznak, melyeket rendszerhibák, megváltozott termelési tervek miatt kell “valós időben” a már meglévő anyagellátási folyamatba illeszteni úgy, hogy mind a már ütemezett anyagellátási feladatok, mind az új, beillesztendő anyagellátási folyamat egy adott időhorizonton belül megvalósuljanak.

A mátrixgyártás üzemen belüli anyagellátási modellje m mátrixcellával, α anyagellátási feladattal és β időablakkal rendelkezik az egyes feladatok ütemezésére. A mátrixcellák által igényelt komponensek és szerszámok egy-egy speciális tárolóban helyezkednek el, azokat egy parkolóban várakozó vezető nélküli targonca szállítja el. Ezen ellátási modell két részre bontható fel: az első rész a hagyományos járattervezés az ERP adatai alapján, míg a második rész a valós idejű járattervezés/járatmódosítás, melyhez a bemenő adatokat a kibernetikai környezet biztosítja az intelligens szerszámok, intelligens termékek és komponensek, valamint a gyártó- és szerelőcellák által. A tervezési feladat megoldásához a következő döntéseket kell meghozni: (a) a rendelkezésre álló anyagellátási feladatokból megfelelő klaszterek kialakítása; (b) az egyes klaszterekbe tartozó anyagellátási feladatokhoz ütemezés és optimális útvonal kialakítása; (c) igény esetén a járatok újratervezése és újraütemezése a valós időben keletkező anyagellátási feladatok azonnali végrehajtása érdekében. Az optimalizálási feladat döntési változója három hozzárendelési mátrix, mely a

járatok és az igények összerendelését tartalmazza klaszterezés, járattervezés és valós idejű járattervezés esetében.



7. ábra: Mátrixgyártás logisztikai folyamatainak optimalizálási struktúrája [S7]

Kutatásom során egy nemzetközi kutatócsoportban a következő főbb kutatási lépésekben vehettem részt:

- matematikai modell kidolgozása mátrixgyártás anyagellátási folyamatának tervezésére,
- heurisztikus algoritmusok tesztelése és az alkalmas algoritmus kiválasztása,
- algoritmus alkalmazása a klaszterezési és járattervezési feladat megoldására,
- modell validálása scenario analízissel.

Terjedelmi korlátok miatt ezen fejezetben a matematikai modellek közül a valós-idejű járattervezés kerül bemutatásra, majd egy a modell validálásához használt esettanulmány.

Az optimalizálás ezen fázisában a mátrixgyártás digitális példányából és az ERP-ből származó információk alapján a járatok módosítása lehetséges. Célfüggvény az energiafelhasználás minimalizálása:

$$EC = EC^{SR} + EC^{NSP} + EC^{NSD} \rightarrow \min. \quad (2.1)$$

ahol EC^{SR} a már ütemezett feladatok végrehajtásának energiafelhasználása, EC^{NSP} EC^{NSD} az új anyagellátási feladatok fel- és leadásához rendelhető energiafelhasználás.

A célfüggvény első eleme az alábbi módon számítható:

$$\forall r, \beta: \sum_{\lambda=2}^{\lambda_{max}} \xi_{s_{r\lambda-1}s_{r\lambda}} (p_{s_{r\lambda-1}}^x, p_{s_{r\lambda-1}}^y, p_{s_{r\lambda}}^x, p_{s_{r\lambda}}^y) e_r \rightarrow \min. \quad (2.2)$$

ahol λ_{max} az r . járatához rendelt anyagellátási feladatok száma, $s_{r\lambda}$ az r . járat λ . állomásához rendelt anyagellátási feladat azonosítója, p_i^x és p_i^y az i . mátrixcella koordinátái, $\xi_{s_{r\lambda-1}s_{r\lambda}}$ a $\lambda - 1$. és λ . mátrixcella közötti távolság az r . járat esetében, e_r az r . járatot megvalósító vezető nélküli targonca fajlagos energiafelhasználása.

A célfüggvény második része a következő formában definiálható:

$$EC^{NSP} = \sum_{r=1}^{r_{max}} \sum_{\psi=1}^{\psi_{max}} x_{r\lambda\psi}^P \left(\xi_{s_{r\lambda-1}\psi} (p_{s_{r\lambda-1}}^x, p_{s_{r\lambda-1}}^y, p_{\psi}^x, p_{\psi}^y) + \xi_{s_{r\lambda}\psi} (p_{s_{r\lambda}}^x, p_{s_{r\lambda}}^y, p_{\psi}^x, p_{\psi}^y) \right) e_r \quad (2.3)$$

ahol r_{max} a tervezett járatok száma a tervezési időhorizonton belül, ψ_{max} az új anyagellátási feladatok száma, $x_{r\lambda\psi}^P$ az új anyagellátási feladatok és a már megtervezett járatok hozzárendelési mátrixa. A célfüggvény harmadik tagja hasonló elven számítható a leadási pontokra vonatkozóan.

A valós idejű járattervezés során négy korlátozást kell figyelembe venni. A vezető nélküli targonca kapacitása nem léphető túl egy új anyagellátási igény bevonásával:

$$\forall r, \lambda, \beta: q_{0r} + \sum_{b=3}^{\lambda} \sum_{\alpha=1}^{\alpha_{max}} \sum_{\beta=1}^{\beta_{max}} q_{s_{rb-2}s_{rb-1}\alpha\beta}^* + q_{\psi}^{NS} + \sum_{b=\lambda+1}^{\lambda_{max}} \sum_{\alpha=1}^{\alpha_{max}} \sum_{\beta=1}^{\beta_{max}} q_{s_{rb-1}s_{rb}\alpha\beta}^* \leq C_r^{max} \quad (2.4)$$

ahol q_{0r} a szállítóeszközön lévő rakomány mennyisége a valós idejű ütemezés előtt, C_r^{max} a vezető nélküli targonca kapacitása. A már ütemezett anyagellátási

feladatok esetében a fel- és leadási időpontoknak az időablakon belül kell maradni minden mátrixcella esetében:

$$\forall r, \lambda: \quad t_{r\lambda^*}^{Pmin} \leq t_{r\lambda^*}^{P1} + t_{r\lambda^*}^{P2} + t_{r\lambda^*}^{P3} + t_{r\lambda^*}^{P4} \leq t_{r\lambda^*}^{Pmax} \quad (2.5)$$

$$\forall r, \lambda: \quad t_{r\lambda^*}^{Dmin} \leq t_{r\lambda^*}^{D1} + t_{r\lambda^*}^{D2} + t_{r\lambda^*}^{D3} + t_{r\lambda^*}^{D4} \leq t_{r\lambda^*}^{Dmax}, \quad (2.6)$$

ahol

$$t_{r\lambda^*}^{P1} = t_{0r} + \sum_{b=3}^{\lambda} \frac{\xi_{srb-2srb-1}(p_{srb-2}^x, p_{srb-2}^y, p_{srb-1}^x, p_{srb-1}^y)}{\bar{v}_r} \quad (2.7)$$

$$t_{r\lambda^*}^{P2} = \frac{\xi_{s_{r\lambda-1}\psi}(p_{s_{r\lambda-1}}^x, p_{s_{r\lambda-2}}^y, p_{s_{r\psi}}^x, p_{s_{r\psi}}^y)}{\bar{v}_r} \text{ és } t_{r\lambda^*}^{P3} = \frac{\xi_{\psi s_{r\lambda}}(p_{s_{r\lambda}}^x, p_{s_{r\lambda}}^y, p_{s_{r\psi}}^x, p_{s_{r\psi}}^y)}{\bar{v}_r} \quad (2.8)$$

$$t_{r\lambda^*}^{P4} = t_{0r} + \sum_{b=\lambda+1}^{\lambda_{max}} \frac{\xi_{srb-1srb}(p_{srb-1}^x, p_{srb-1}^y, p_{srb}^x, p_{srb}^y)}{\bar{v}_r}, \quad (2.9)$$

ahol $t_{r\lambda^*}^{Pmin}$ és $t_{r\lambda^*}^{Pmax}$ a fel- és leadási időablak alsó és felső korlátja az $s_{r\lambda^*}$ mátrixcella esetében, $t_{r\lambda^*}^{P1}$ a vezető nélküli targonca parkoló és az új ψ feladási pontot megelőző már ütemezett anyagellátási feladat közötti szállítási idő az r . járat esetében, t_{0r} szállítási idő a parkoló és az első már ütemezett mátrixcella között, $t_{r\lambda^*}^{P2}$ a szállítási idő az új ψ feladási pontot megelőző már ütemezett anyagellátási feladathoz tartozó mátrixcella és a z új feladathoz rendelt mátrixcella között, $t_{r\lambda^*}^{P3}$ a szállítási idő az új ψ feladási pont és az azt követő, már ütemezett anyagellátási feladathoz tartozó mátrixcella között, $t_{r\lambda^*}^{P4}$ szállítási idő az új ψ feladási ponttól az r . járat λ^* . már ütemezett mátrixcellájáig.

A fel- és leadási időpontoknak az időablakon belül kell maradni minden új anyagkezelési feladat esetében:

$$\forall \psi: t_{\psi}^{PNmin} \leq t_{r\lambda^*}^{P1} + t_{r\lambda^*}^{P2} \leq t_{\psi}^{PNmax} \text{ és } t_{\psi}^{DNmin} \leq t_{r\lambda^*}^{D1} + t_{r\lambda^*}^{D2} \leq t_{\psi}^{DNmax} \quad (2.10)$$

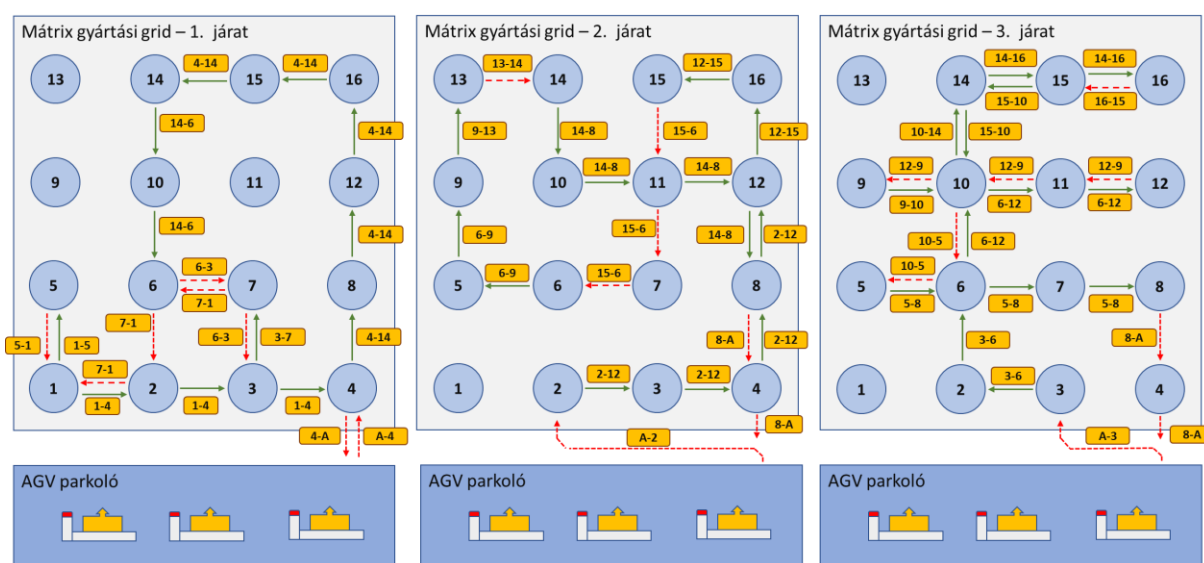
ahol t_{ψ}^{PNmin} és t_{ψ}^{PNmax} a ψ anyagellátási igény feladásához tartozó alsó és felső időkorlát, t_{ψ}^{DNmin} and t_{ψ}^{DNmax} a ψ anyagellátási igény leadásához tartozó alsó és felső időkorlát

Az előzetes járattervezés és a valós idejű járattervezés döntési változói egyrészt egész típusú hozzárendelési mátrixok, másrészt valós típusú, az egyes feladatok ütemezését definiáló mátrixok, azonban mivel a $x_{ij\alpha\beta r}^*$, $x_{r\lambda\psi}^P$ és $x_{r\lambda\psi}^D$

mátrixelemek definiálják az ütemezést is, ezért csupán egész értékű döntési változóink vannak az optimalizálási feladatban.

Az anyagellátási feladatok klaszterezésére a fekete lyuk algoritmust választottam, miután néhány tesztfüggvény (Ackley, Bukin, cross-in-tray, Easom, eggholder, three hump camel back) segítségével megvizsgáltam az elterjedtebb heurisztikus algoritmusok jóságát.

A modell validálásához több esettanulmány készült. Az alábbi példában egy 16 gyártócellát tartalmazó esetben 16 anyagellátási feladathoz kerülnek az optimális járatok meghatározásra. Az esettanulmány tartalmazza a járatok előtervezését, illetve új anyagellátási feladatok valós idejű illesztését. A valós idejű tervezés eredményének grafikus reprezentációját a 8. ábra szemlélteti.



8. ábra: Valós idejű járattervezés eredménye [S7]

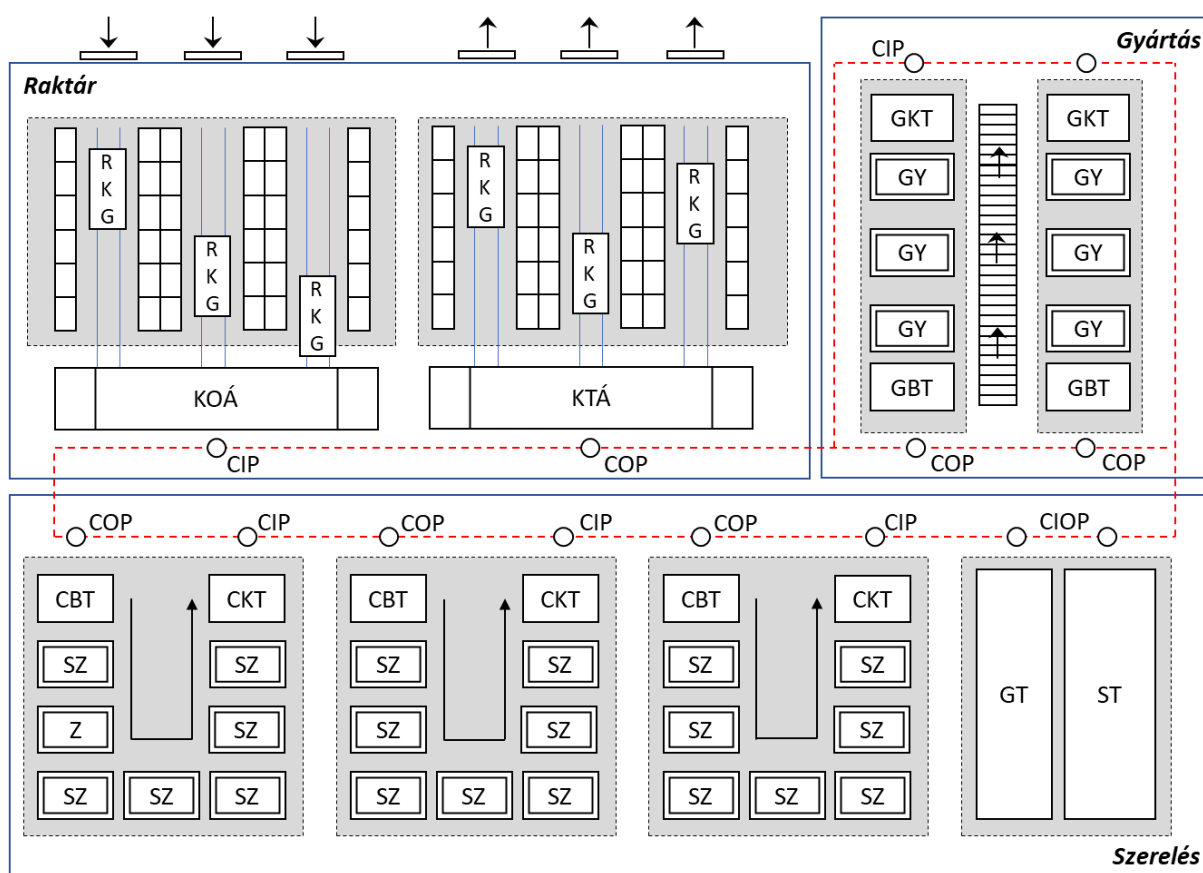
A vezető nélküli targoncák villamos energiát használnak, azonban annak előállítás módja szerint számítható egy környezetszennyezési mérték az adott szállítási feladatra vonatkozóan. Felhasználva a World Nuclear Association által közzétett kibocsátási adatokat [25], meghatározásra kerültek az egyes scenáriókban a károsanyag-kibocsátási értékek a villamos energia előállítási módjának függvényében.

Milkrun anyagellátási rendszerek tervezése

Az üzemben belüli milkrun alapú anyagellátási rendszerek számos paraméter alapján strukturálhatók. Ezen főbb paraméterek nem csupán a termelési folyamatokat, hanem az ahhoz kapcsolódó szolgáltatási tevékenységeket is leírják: termékek forrása, anyagkezelő egység típusa, milkrun járatok típusa és száma, működtetési stratégia, milkrun szintek száma, milkrun operátorok feladatai, göngyölegkezelés módja, fix vagy rugalmas hozzárendelések módja.

Ezen szempontok alapján különböző típusú milkrun megoldások definiálhatóak [26]. Mivel a gyártási folyamatok hatékonysága, rendelkezésre állása, rugalmassága nagymértékben függ a kapcsolódó anyagellátási rendszertől, ezért elengedhetetlen a milkrun megoldások leírása és vizsgálata az optimális megoldás kiválasztása érdekében [27].

Az első jellegzetes megoldás esetében a szerelési tevékenységet egy külső milkrun szolgálja ki, a check-in és check-out folyamatok pedig decentralizáltak. Ebben az esetben a szerelőhelyek (U-alakú szerelőcellák) ellátása a gyártóhelyről és/vagy a raktárból egy külső milkrun segítségével kerül megoldásra (9. ábra).



9. ábra: Szerelőhelyek milkrun alapú anyagellátása gyártóhelyekről és raktárból.

CIP=check-in-point, COP=check-out-point, KOÁ=komponens átadóhely, KTÁ=késztermék átadóhely, SZ=szerelőcella, CBT=cella bemenő tároló, CKT=cella kimenő tároló, GY=gyártóhely, GBT=gyártás bemenő tárolója, GKT=gyártás kimenő tárolója, GT=göngyöleg tároló, ST=selejtáró, RKG=raktárkiszolgáló gép [S8]

Külső milkrun esetén csupán egy operátor szükséges a működtetéshez, azonban a milkrun összeállításához szükséges raktári kommissiózási feladatok, illetve az alkatrészek és késztermékek átadása az egyes átadási pontokon egy másik

logisztikai folyamat részét képezi. Az U-alakú gyártócellákon belüli anyagkezelési feladatokat a cellaoperátorok végzik el.

A milkrun folyamatokat alkotó egyes résztevékenységek a következők: a milkrun kocsi gyorsítása, haladása és lassítása; várakozás; fel- és lerakodás; azonosítás. Az egyes tevékenységek további résztevékenységekre bonthatók, például a rakodás esetében emelés, ejtés, megtöltés, ürítés, csomagolás és mozgatás. Az 1. táblázat egy szerelőcella kimeneti tárolóján mért műveleti idők átlagát mutatja egy autóipari beszállító esetében. Szignifikáns különbség fedezhető fel a be- és kirakodás, valamint a check-in és check-out folyamatok között, hiszen míg a ki- és berakodás fizikai folyamat, addig a check-in és check-out az ahhoz kapcsolódó adminisztrációs tevékenységet fedi.

1. táblázat: Mért műveleti idők átlaga egy szerelőcella kimeneti tárolójánál

Művelet	Szükséges idő[s]	Művelet	Szükséges idő[s]
Lassítás	3,4	Teli tároló emelése	2,7
Megállás és kiszállás	4,2	Teli tároló mozgatása	13,6
Üres tároló megemelése	2,2	Teli tároló süllyesztése	2,7
Üres tároló azonosítása	6,3	Késztermék check-in	9,4
Üres tároló mozgatása	12,0	Beszállás és indulás	4,5
Üres tároló süllyesztése	2,1	Gyorsítás	3,2
Teli tároló azonosítása	7,2		

Egy külső milkrun ciklusidejét a szállítási idő, valamint a szereléshez, gyártáshoz és raktárhoz kapcsolódó ki- és berakodási idő határozza meg.

A szerelőcellák közötti szállítási idő az alábbi módon számítható:

$$t_{as,tr}^1 = \sum_{i,j \in \Gamma} l_{i,j} / v_{i,j}, \quad (2.11)$$

ahol Γ a szerelőcellák halmaza, $l_{i,j}$ a szállítási távolságok az i . és j . szerelőcella között és $v_{i,j}$ a milkrun sebessége.

A szükséges alkatrészek kirakodási ideje az U-alakú szerelőcellák bemenő tárolójánál az alábbi módon határozható meg:

$$t_{as,ul}^1 = \sum_{k \in \Gamma} n_k^{ul} (t_k^{ul} + t_k^{co}), \quad (2.12)$$

ahol t_k^{ul} a fajlagos kirakodási idő az U-alakú szerelőcellák k . bementi tárolójánál és t_k^{co} a fajlagos check-out idő ugyanitt.

A rakodási idő számítása az alábbi összefüggéssel lehetséges az U-alakú gyártócellák kimeneti tárolóin

$$t_{as,l}^1 = \sum_{k \in \Gamma} n_k^l (t_k^l + t_k^{ci}), \quad (2.13)$$

ahol t_k^l a fajlagos rakodási idő a k . kimeneti tárolónál, t_k^{ci} a fajlagos check-in idő a k . kimeneti tárolónál.

A gyártócellák be- és kimeneti tárolói közötti szállítási idők számítása az alábbi módon végezhető el:

$$t_{ma,tr}^2 = \sum_{m,n \in \Theta} l_{m,n}/v_{m,n} + \sum_{q,r \in \Xi} l_{q,r}/v_{q,r}, \quad (2.14)$$

ahol Θ a gyártócellák bemeneti tárolóinak halmaza, Ξ a gyártócellák kimeneti tárolóinak halmaza, $l_{m,n}$ a gyártócellák m . és n . bemeneti tárolója közötti szállítási távolság, $v_{i,j}$ a milkrun kocs sebessége, $l_{q,r}$ a gyártócellák q . és r . kimeneti tárolója közötti szállítási távolság.

A gyártócellák bemeneti tárolóinál lévő kirakodási idők az alábbi módon számíthatók:

$$t_{ma,ul}^2 = \sum_{p \in \Theta} n_p^{ul} (t_p^{ul} + t_p^{co}), \quad (2.15)$$

ahol t_p^{ul} a fajlagos kirakodási idő a gyártócellák p . bemeneti tárolójánál és t_p^{co} a fajlagos check-out idő a p . bemeneti tárolónál.

A gyártócellák kimeneti tárolóinál lévő rakodási idők az alábbi módon számíthatók:

$$t_{ma,l}^2 = \sum_{p \in \Theta} n_p^l (t_p^l + t_p^{ci}), \quad (2.16)$$

ahol t_p^l a fajlagos rakodási idő a gyártócellák p . kimeneti tárolójánál és t_p^{ci} a fajlagos check-in idő a p . kimeneti tárolónál.

A raktár átadási pontjai közötti szállítási idők számítása:

$$t_{w,tr}^3 = \sum_{s,t \in \Psi} l_{s,t}/v_{s,t}, \quad (2.17)$$

ahol Ψ a raktár átadási pontjainak halmaza, $l_{s,t}$ a szállítási távolság az s . és t . átadási pont között és $v_{s,t}$ a milkrun sebessége ezen relációkban.

A szükséges komponensek rakodási ideje a raktárban az alábbi módon számítható:

$$t_{w,l}^3 = \sum_{w \in \Psi} n_w^l (t_w^l + t_w^{ci}), \quad (2.18)$$

ahol t_w^l a fajlagos rakodási idő a w . átadási ponton, és t_w^{ci} a fajlagos check-in idő ugyanitt. A szükséges komponensek kirakodási ideje ezen átadási pontokon hasonló módon számítható:

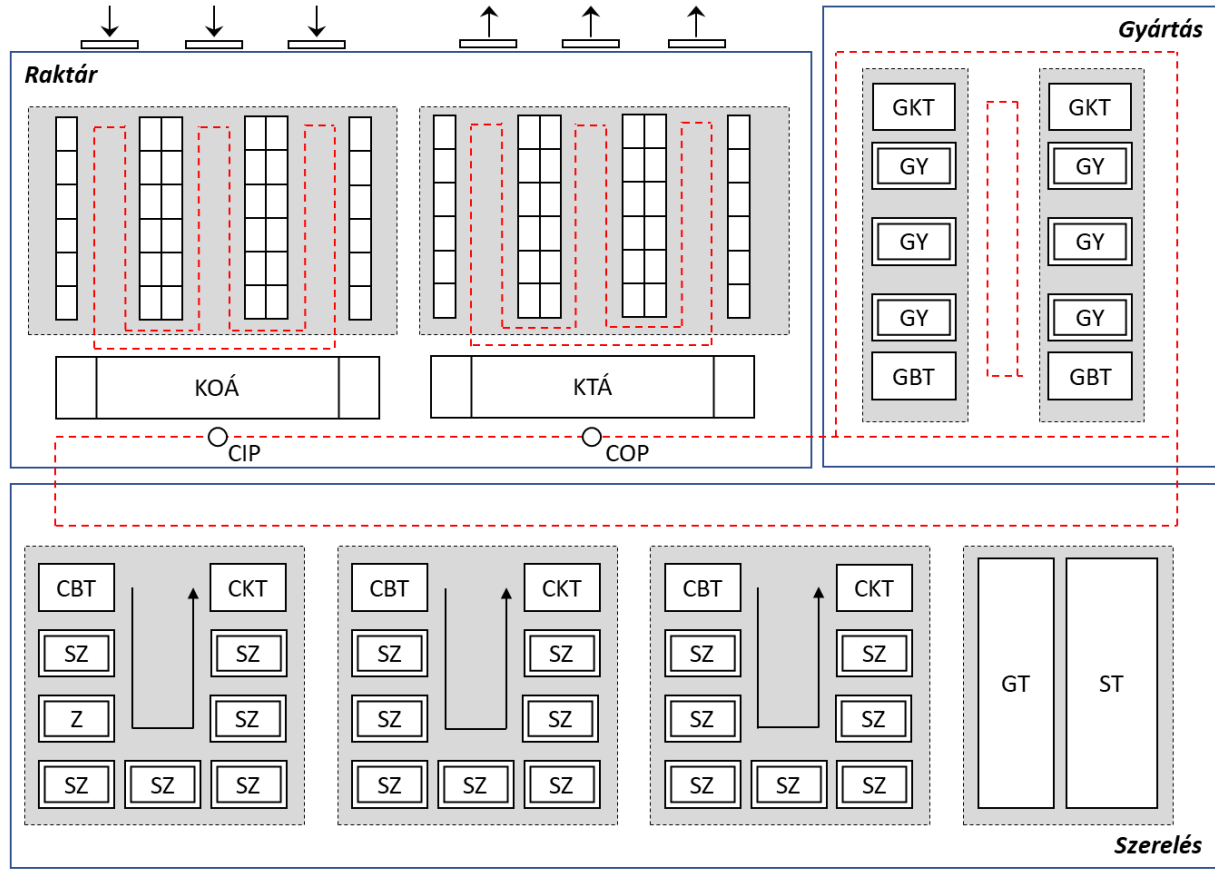
$$t_{w,ul}^3 = \sum_{w \in \Psi} n_w^{ul} (t_w^{ul} + t_w^{co}), \quad (2.19)$$

ahol t_w^{ul} a fajlagos kirakodási idő a w . átadási ponton és t_w^{co} a fajlagos check-out idő ugyanitt. A fenti összefüggések felhasználásával a külső milkrun ciklusideje az alábbi módon határozható meg:

$$\begin{aligned}
 t_{ext} = & t_{add} + \sum_{i,j,k \in \Gamma} \left(\frac{l_{i,j}}{v_{i,j}} + n_k^{ul} (t_k^{ul} + t_k^{co}) + n_k^l (t_k^l + t_k^{ci}) \right) + \\
 & + \sum_{m,n,p \in \Theta} \left(\frac{l_{m,n}}{v_{m,n}} + n_p^{ul} (t_p^{ul} + t_p^{co}) + n_p^l (t_p^l + t_p^{ci}) \right) + \sum_{q,r \in \Xi} \frac{l_{q,r}}{v_{q,r}} + \\
 & + \sum_{s,t,w \in \Psi} \left(\frac{l_{s,t}}{v_{s,t}} + n_w^{ul} (t_w^{ul} + t_w^{co}) + n_w^l (t_w^l + t_w^{ci}) \right), \quad (2.20)
 \end{aligned}$$

ahol t_{add} a gyártócsarnok – raktár, raktár – szerelőcsarnok és szerelőcsarnok – gyártócsarnok relációkban lévő szállítási, be- és kirakodási időket, valamint a selejt és göngyöleg-tárolóhoz kapcsolódó anyagkezelési időket tartalmazza.

A második jellegzetes megoldás esetében az U-alakú gyártócellák anyagellátása több milkrun járattal kerül megvalósításra (10. ábra).



10. ábra: Szerelőhelyek milkrun alapú anyagellátása gyártóhelyekről és raktárból több milkrun segítségével. A check-in és check-out folyamatok centralizáltak [S8]

A külső milkrun segítségével történik a szerelőcellák és gyártósorok anyagellátása alkatrészekkel és a késztermékek elszállítása. A két belső milkrun közül az első a gyártócellákat látja el alkatrészekkel a bemenő tárolókból, míg a gyártócellákban elkészült alkatrészeket a gyártócellák kimeneti tárolójára szállítja. A második belső milkrun a raktári feladatokat látja el, összegyűjti a raktárban a szükséges alkatrészeket és elhelyezi a raktári átadási pontokon, illetve a raktári átadási pontokon lévő késztermékeket betárolja a megfelelő raktári pozíciókba. A göngyöleg- és selejttárolók ürítését szintén a milkrun

operátorok végzik el. Ezen megoldás esetében több milkrun operátor alkalmazása szükséges.

A gyártósori belső milkrun ciklusideje a gyártócellák, illetve a ki- és bemeneti tárolók közötti szállítási és rakodási idők függvényében határozható meg. Mivel a check-in és check-out folyamatok centralizáltak, ezért azokat ezen belső milkrun esetén nem kell figyelembe venni. Így a gyártósori belső milkrun ciklusideje az alábbi módon számítható:

$$t_{ma}^4 = \sum_{i,j \in \Phi} l_{i,j}/v_{i,j} + \sum_{i \in \Phi, k \in \Xi} l_{i,k}/v_{i,k} + \sum_{i \in \Phi, m \in \Omega} l_{i,m}/v_{i,m}, \quad (2.21)$$

ahol Φ a gyártócellák halmaza, Ξ a gyártósori kimeneti tárolók halmaza és Ω a gyártósori bemeneti tárolók halmaza.

A raktári belső milkrun ciklusideje komponensek esetében az alábbi módon határozható meg:

$$t_{w,co}^5 = \sum_{i,j \in Y} l_{i,j}/v_{i,j} + \sum_{i \in Y, n \in P} l_{i,n}/v_{i,n}, \quad (2.22)$$

ahol Y a szükséges komponensek helye a raktári tárolótérben, P a komponens átadási pontok halmaza. Késztermékekre a ciklusidő hasonlóan számítható:

$$t_{w,fi}^6 = \sum_{i,j \in Y} l_{i,j}/v_{i,j} + \sum_{i \in Y, n \in P} l_{i,n}/v_{i,n}. \quad (2.23)$$

A külső milkrun ciklusideje az első esetben megfogalmazottakhoz hasonlóan számítható. A gyártócellák közötti szállítási idő számítása:

$$t_{as,tr}^7 = \sum_{i,j \in \Gamma} l_{i,j}/v_{i,j}. \quad (2.24)$$

Az U-alakú gyártócellák bemeneti és kimeneti tárolóihoz tartozó kirakodási idők meghatározása:

$$t_{as,ul}^8 = \sum_{k \in \Gamma} n_k^{ul} t_k^{ul} \text{ és } t_{as,l}^9 = \sum_{k \in \Gamma} n_k^l t_k^l \quad (2.25)$$

A gyártócellák ki- és bemeneti tárolói közötti szállítási idők számítása:

$$t_{ma,tr}^{10} = \sum_{m,n \in \Theta} l_{m,n}/v_{m,n} + \sum_{q,r \in \Xi} l_{q,r}/v_{q,r}. \quad (2.26)$$

A gyártócellák bemeneti tárolóinál a szükséges alkatrészek kirakodási idejeinek számítása:

$$t_{ma,ul}^{11} = \sum_{p \in \Theta} n_p^{ul} t_p^{ul}. \quad (2.27)$$

A gyártócellák kimeneti tárolóinál a szükséges alkatrészek rakodási idejeinek számítása:

$$t_{ma,l}^{12} = \sum_{p \in \Theta} n_p^l t_p^l. \quad (2.28)$$

A raktár átadási pontjai közötti szállítási idő:

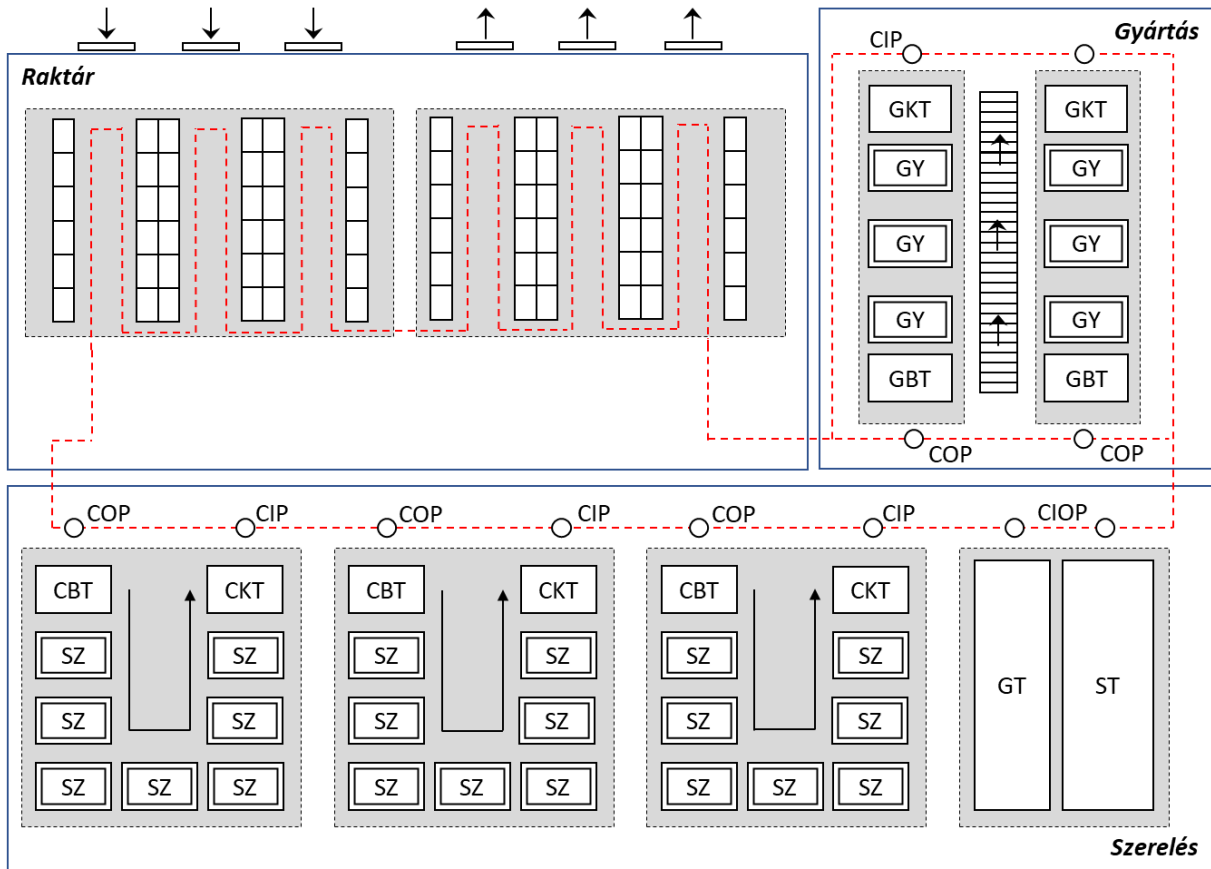
$$t_{w,tr}^{13} = \sum_{s,t \in \Psi} l_{s,t}/v_{s,t}. \quad (2.29)$$

A szükséges alkatrészek és az elkészült termékek rakodási ideje a raktári átadási pontokon az első esethez hasonló módon számítható.

Felhasználva a fenti összefüggéseket a teljes ciklusidő ezen kiszolgálási változat esetében az alábbi módon határozható meg:

$$t_{mult} = \max(t_{ma}^4; t_{add} + t_{as,tr}^7 + t_{as,ul}^8 + t_{as,l}^9 + t_{ma,tr}^{10} + t_{ma,ul}^{11} + t_{ma,l}^{12} + t_{w,tr}^{13} + t_{w,l}^3 + t_{w,ul}^3; t_{w,fi}^6 + t_{w,co}^5). \quad (2.30)$$

A harmadik modell esetében a teljes rendszer kiszolgálását egyetlen integrált milkrun végzi el (11. ábra). Az integrált milkrun végzi a gyártó- és szerelőcellák komplett anyagellátását, így ebben az esetben egyetlen milkrun operátor szükséges.



11. ábra: Szerelőhelyek milkrun alapú anyagellátása integrált milkrun segítségével. A check-in és check-out folyamatok decentralizáltak [S8]

Az előzőekben vázolt összefüggések felhasználásával az integrált milkrun ciklusideje az alábbi módon határozható meg:

$$t_{int} = t_{w,co}^5 + t_{w,fi}^6 + t_{as,tr}^7 + t_{as,ul}^8 + t_{as,l}^9 + t_{ma,tr}^{10} + t_{ma,ul}^{11} + t_{ma,l}^{12}. \quad (2.31)$$

A fentiekben bemutatott milkrun-alapú anyagellátási modellek segítségével három jellegzetes stratégia került megfogalmazásra. A fenti modellek esetében a ciklusidők alapján eldönthető, hogy mely stratégia mely gyártási környezetben

alkalmazható gazdaságosan. Természetesen a fentiekben ismertetett paraméterek mellett figyelembe vehetőek olyan jellemzők, mint kapacitás-kihasználtság, rugalmasság, rendelkezésre állás és működtetési költség. Felhasználva a 2. táblázat által összefoglalt bemenő paramétereket, egy adott termelési környezetben a következő eredmények adódnak. A számított ciklusidő külső milkrun esetében 914 s, több milkrun esetében 987 s, míg integrált milkrun esetében 1039 s. Az optimális megoldás kiválasztását befolyásolja még a milkrun operátorok száma és további, korábban említett paraméter. A külső milkrun rendelkezik a legkisebb ciklusidővel, azonban számos kiegészítő anyagmozgató és anyagkezelő berendezés szükséges a teljes folyamat működtetéséhez [28].

2. táblázat: Kiértékeléshez használt paraméterek (milkrun sebessége 1,2 m/s, rendelések felvétele 125 s, gyártási milkrun ciklusideje 235 s) [S8]

Műveleti idő [s]	Szállítás	Rakodás	Check-in/Check-out
Gyártás	$t_{ma,tr} = 72.0$	$t_{ma,l} = 27$ $t_{ma,ul} = 31$	$t_{ma,ci} = 14$ $t_{ma,co} = 16$
Szerelés	$t_{as,tr} = 68.4$	$t_{as,l} = 21$ $t_{as,ul} = 18$	$t_{as,ci} = 20$ $t_{as,co} = 22$
Raktár	$t_{w,tr} = 60$	$t_{w,l} = 40$ $t_{w,ul} = 50$	$t_{w,ci} = 78$ $t_{w,co} = 56$
Egyéb	$t_{add} = 102$		
Gönygöleg/selejt	$t_{bwp,tr} = 27$	$t_{bwp,l/ul} = 45$	$t_{bwp,ci/co} = 30$

Új tudományos eredmény

Kidolgoztam a mátrixgyártás rugalmas anyagellátási rendszerének matematikai modelljét, amely a valós idejű járattervezés problémáját fogalmazza meg az energiahatékonyság minimalizálása szempontjából. A matematikai modell kapacitás- és időkorlátokat vesz figyelembe. Az optimalizálási feladat megoldására egy hibrid heurisztikát dolgoztam ki, mely integrálja a black hole algoritmust és a flower pollination algoritmust a klaszterképzési és járattervezési feladatok megoldása céljából. Az algoritmus segítségével elvégeztem a valós idejű járattervezési feladat optimalizálását és bemutattam, hogy a különböző villamosenergia előállítási módok milyen hatással vannak az optimalizált rendszer virtuális üvegházhatású gáz kibocsátására. Kidolgoztam egy olyan módszert, melynek segítségével elvégezhető egy ismert termelési környezetben a különböző milkrun-alapú anyagellátási stratégiák ciklusidő-alapú összehasonlító elemzése [S6-S8].

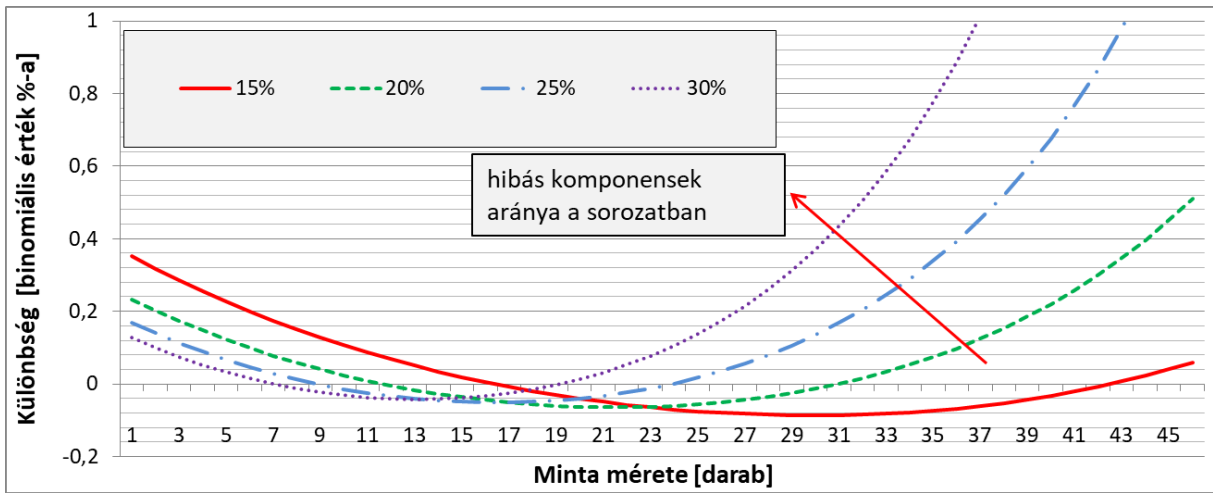
3.3 Sztochasztikus döntési fa alkalmazása termelés minőségellenőrzési folyamatainak tervezéséhez

A gyártási folyamatokon belüli döntések egyre komplexebbekké válnak a gazdaság és a piac globalizációja révén [29,30]. Az egyes gyártók közötti verseny főként a termékek minőségének, árának és rendelkezésre állásának vonatkozásában érzékelhető. A Miskolci Egyetem Logisztikai Intézetében *Illés Béla* professzor végzett az elmúlt évtizedekben komoly kutatásokat a logisztika és a minőségmenedzsment kapcsolatára vonatkozóan és vizsgálta a logisztikai minőséget befolyásoló tényezőket [31]. Az ő kutatási eredményeire támaszkodva kezdtem el foglalkozni a logisztikai döntéseket támogató módszerekkel [S9,S10], így például azzal a kérdéssel, hogyan lehetséges a késztermékek várható minőségének meghatározása és a kapcsolódó minőségellenőrzési folyamatok optimális kialakítása a készterméket felépítő komponensek minőségének függvényében, hiszen a késztermékek minőségét alapvetően befolyásolja az azt felépítő komponensek minősége, így fontos, hogy a gyártási folyamatokon belül megfelelő minőségellenőrzési és minőségbiztosítási intézkedések valósuljanak meg [S11]. Kutatómunkám során egy olyan döntéstámogató módszert dolgoztam ki, mely Winston [32] döntési fáján alapulva alkalmas az optimális mintavételezési és javítási paraméterek meghatározására egy bizonytalan minőségű komponenseket tartalmazó gyártó- vagy szerelőrendszerben. A kidolgozott módszert egy nyomtatott áramköröket gyártó vállalat példáján keresztül ismertetem.

A gyártó nyomtatott áramköröket készít hullámforrasztásos technológiával N sorozatnagysággal. Sajnos a hullámforrasztásnál nem elhanyagolható a selejtes termék előállítása, mivel számos hibaforrása lehet a hullámforrasztott termékeknek (forraszhíd képződés, nyitott kötés, megemelt elemek). A gyártás historikus adataiból levonhatók olyan következtetések, melyek szerint a sorozatok p_{Q_1} százalékban tartalmazznak M_{Q_1} darab hibás nyomtatott áramkört, s ezen sorozatok 1. osztályúak, míg sorozatok p_{Q_2} százalékban tartalmazznak M_{Q_2} darab hibás nyomtatott áramkört, s ezen sorozatok 2. osztályúak.

A nyomtatott áramkörök egy automatizált szerelőhelyre kerülnek, ahol azokból tesztberendezéseket szerelnek össze. A szerelési költséget befolyásolja a nyomtatott áramkörök minősége, hiszen a tesztberendezés szerelés utáni ellenőrzését követően a nyomtatott áramkört ki kell szerelni, tesztelni és javítani kell. A szerelési költség 1.osztályú sorozat esetében $c_{Q_1}^A$ míg 2.osztályú sorozat

esetében $c_{Q_2}^A$. Legyen a teszt költség c^T és a 2.osztályú sorozat javítási költsége c^R . Ugyan a binomiális eloszlásfüggvény jó közelítése a hipergeometrikus eloszlásfüggvénynek abban az esetben, ha a minta kisebb mint 10%, azonban a minta dinamikus mérete miatt előnyösebb hipergeometrikus eloszlást használni. Mint ahogy azt a 12. ábra is mutatja, a két eloszlásfüggvény értéke közötti különbség szinte exponenciálisan növekszik nagyobb minta méret esetén. A két eloszlásfüggvény közötti különbség függ a hibás alkatrészek számától is. Amennyiben a hibás alkatrészek aránya alacsony, akkor a binomiális eloszlás jobban közelíti a hipergeometrikus eloszlást nagy minta esetén, ezért lehetséges a hipergeometrikus eloszlás alkalmazása jelen modellben.



12. ábra: Binomiális és hipergeometrikus eloszlás közötti különbség a minta nagyságának és a hibás komponensek számának függvényében [S11]

Annak a valószínűsége, hogy egy n -próbás visszatevés nélküli teszt k hibás alkatrészt eredményez egy 1. osztályú, N darabból álló, M_{Q_1} hibás alkatrészt tartalmazó sorozatban:

$$p(n_D = k | Q_1) = \frac{\binom{M_{Q_1}}{k} \binom{N-M_{Q_1}}{n-k}}{\binom{N}{n}}. \quad (3.1)$$

Annak a valószínűsége, hogy egy n -próbás visszatevés nélküli teszt k jó alkatrészt eredményez egy 1. osztályú, N darabból álló, M_{Q_1} hibás alkatrészt tartalmazó sorozatban:

$$p(n_{ND} = k | Q_1) = \frac{\binom{M_{Q_1}}{n-k} \binom{N-M_{Q_1}}{k}}{\binom{N}{n}}. \quad (3.2)$$

Annak a valószínűsége, hogy egy n -próbás visszatevés nélküli teszt k hibás alkatrészt eredményez egy 2. osztályú, N darabból álló, M_{Q_2} hibás alkatrészt tartalmazó sorozatban:

$$p(n_D = k|Q_2) = \frac{\binom{M_{Q_2}}{k} \binom{N-M_{Q_2}}{n-k}}{\binom{N}{n}}. \quad (3.3)$$

Annak a valószínűsége, hogy egy n -próbás visszatevés nélküli teszt k jó alkatrészt eredményez egy 2. osztályú, N darabból álló, M_{Q_2} hibás alkatrészt tartalmazó sorozatban:

$$p(n_{ND} = k|Q_2) = \frac{\binom{M_{Q_2}}{n-k} \binom{N-M_{Q_2}}{k}}{\binom{N}{n}}. \quad (3.4)$$

Annak a valószínűsége, hogy k hibás alkatrészt eredményez az 1. osztályú sorozat:

$$p(n_D = k \cap Q_1) = p(Q_1) \frac{\binom{M_{Q_1}}{k} \binom{N-M_{Q_1}}{n-k}}{\binom{N}{n}}. \quad (3.5)$$

Annak a valószínűsége, hogy k hibás alkatrészt eredményez a 2. osztályú sorozat:

$$p(n_D = k \cap Q_2) = p(Q_2) \frac{\binom{M_{Q_2}}{k} \binom{N-M_{Q_2}}{n-k}}{\binom{N}{n}}. \quad (3.6)$$

Annak a valószínűsége, hogy k jó alkatrészt eredményez az 1. osztályú sorozat:

$$p(n_{ND} = k \cap Q_1) = p(Q_1) \frac{\binom{M_{Q_1}}{n-k} \binom{N-M_{Q_1}}{k}}{\binom{N}{n}}. \quad (3.7)$$

Annak a valószínűsége, hogy k jó alkatrészt eredményez a 2. osztályú sorozat:

$$p(n_{ND} = k \cap Q_2) = p(Q_2) \frac{\binom{M_{Q_2}}{n-k} \binom{N-M_{Q_2}}{k}}{\binom{N}{n}}. \quad (3.8)$$

Annak a valószínűsége tehát, hogy k hibás alkatrészt eredményez egy n -próbás visszatevés nélküli teszt:

$$p(n_D = k) = \frac{p(Q_1) \binom{M_{Q_1}}{k} \binom{N-M_{Q_1}}{n-k} + p(Q_2) \binom{M_{Q_2}}{k} \binom{N-M_{Q_2}}{n-k}}{\binom{N}{n}} \quad (3.9)$$

Annak a valószínűsége, hogy k jó alkatrészt eredményez egy n -próbás visszatevés nélküli teszt

$$p(n_{ND} = k) = p \frac{p(Q_1) \binom{M_{Q_1}}{n-k} \binom{N-M_{Q_1}}{k} + p(Q_2) \binom{M_{Q_2}}{n-k} \binom{N-M_{Q_2}}{k}}{\binom{N}{n}}. \quad (3.10)$$

Mindaddig, amíg az n -próbás teszt k hibás alkatrészt eredményez, a posteriori valószínűsége a 2. osztályú sorozatnak a következő formában írható fel:

$$p(Q_2|n_D = k) = \frac{p(n_D=k \cap Q_2)}{p(n_D=k)} = \frac{p(Q_2) \binom{M_{Q_2}}{k} \binom{N-M_{Q_2}}{n-k}}{p(Q_1) \binom{M_{Q_1}}{k} \binom{N-M_{Q_1}}{n-k} + p(Q_2) \binom{M_{Q_2}}{k} \binom{N-M_{Q_2}}{n-k}}. \quad (3.11)$$

Mindaddig, amíg az n -próbás teszt k hibás alkatrészt eredményez, a posteriori valószínűsége az 1. osztályú sorozatnak a következő formában írható fel:

$$pp(Q_1|n_D = k) = \frac{p(n_D=k \cap Q_1)}{p(n_D=k)} = \frac{p(Q_1) \binom{M_{Q_1}}{k} \binom{N-M_{Q_1}}{n-k}}{p(Q_1) \binom{M_{Q_1}}{k} \binom{N-M_{Q_1}}{n-k} + p(Q_2) \binom{M_{Q_2}}{k} \binom{N-M_{Q_2}}{n-k}}. \quad (3.12)$$

Mindaddig, amíg az n -próbás teszt k jó alkatrészt eredményez, a posteriori valószínűsége a 2. osztályú sorozatnak a következő formában írható fel:

$$p(Q_2|n_{ND} = k) = \frac{p(n_{ND}=k \cap Q_2)}{p(n_{ND}=k)} = \frac{p(Q_2) \binom{M_{Q_2}}{n-k} \binom{N-M_{Q_2}}{k}}{p(Q_1) \binom{M_{Q_1}}{n-k} \binom{N-M_{Q_1}}{k} + p(Q_2) \binom{M_{Q_2}}{n-k} \binom{N-M_{Q_2}}{k}}. \quad (3.13)$$

Mindaddig, amíg az n -próbás teszt k jó alkatrészt eredményez, a posteriori valószínűsége az 1. osztályú sorozatnak a következő formában írható fel:

$$pp(Q_1|n_{ND} = k) = \frac{p(n_{ND}=k \cap Q_1)}{p(n_{ND}=k)} = \frac{p(Q_1) \binom{M_{Q_1}}{n-k} \binom{N-M_{Q_1}}{k}}{p(Q_1) \binom{M_{Q_1}}{n-k} \binom{N-M_{Q_1}}{k} + p(Q_2) \binom{M_{Q_2}}{n-k} \binom{N-M_{Q_2}}{k}}. \quad (3.14)$$

Az egyes sorozatok várható szerelési költsége tesztelés és javítás nélkül a következő összefüggéssel számítható:

$$c^{DA} = p_{Q_1} c_{Q_1}^A + p_{Q_2} c_{Q_2}^A. \quad (3.15)$$

Az egyes sorozatok várható szerelési költsége javítás esetén a következő összefüggéssel számítható:

$$c^{IDA} = c_{Q_1}^A + c^R. \quad (3.16)$$

Az egyes sorozatok várható szerelési költsége tesztelés és javítás esetén a következő összefüggéssel számítható:

$$p(n_{ND} = k) c^{ATR} = \sum_{k=0}^n p(n_D = k) \cdot \min \left(\begin{array}{l} p(Q_1|n_D = k) (c_{Q_1}^A + n c^T) + \\ p(Q_2|n_D = k) (c_{Q_2}^A + n c^T); c_{Q_1}^A + c^T + c^R \end{array} \right). \quad (3.17)$$

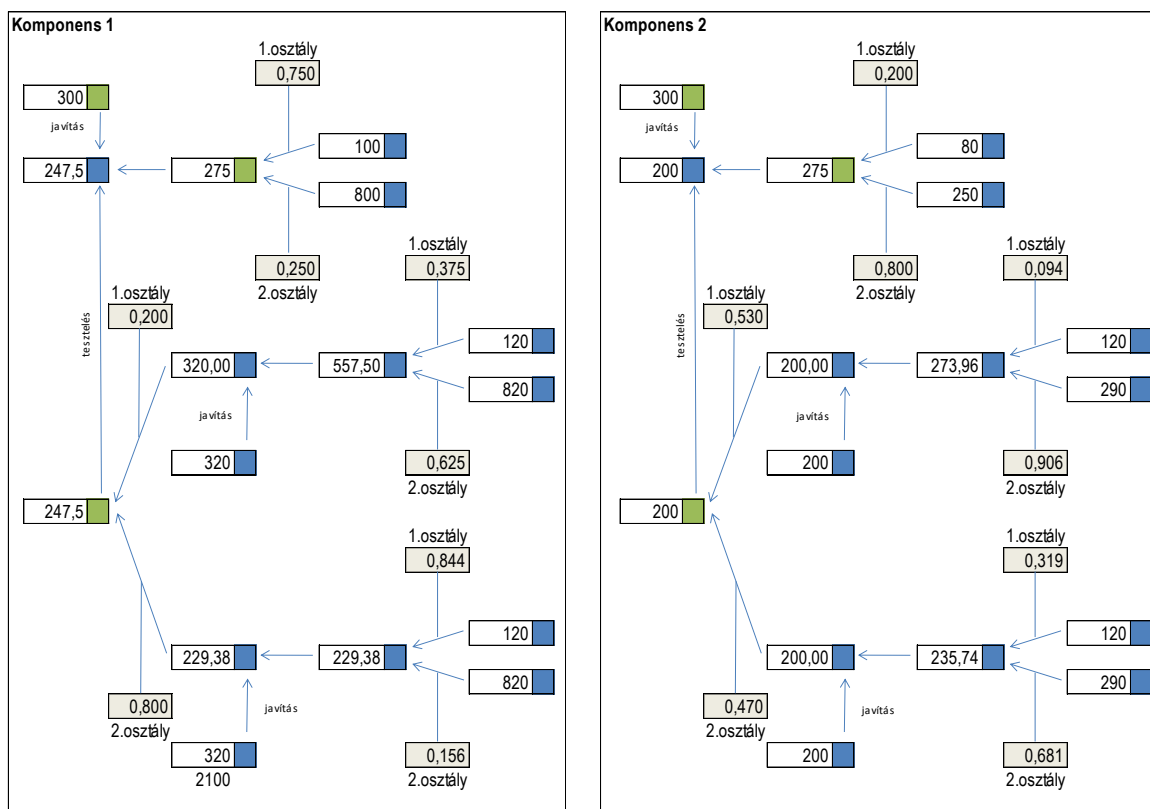
Ezek alapján a várható költség:

$$c^{opt} = \min(c^{DA}; c^{IDA}; c^{ATR}). \quad (3.18)$$

A fentiekben bemutatott modell alapján a hipergeometrikus eloszlásfüggvényt tartalmazó döntési fa segítségével lehetséges az optimális tesztelési és mintavételezési stratégia kialakítása a teljes szerelési folyamat költségeinek csökkentése érdekében.

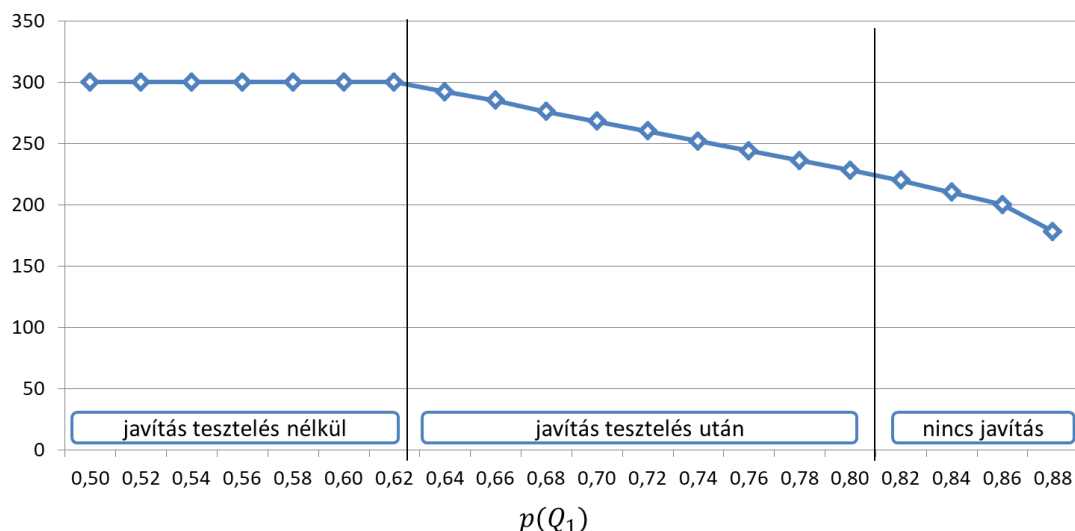
A fentiekben bemutatott módszert egy két alkatrészből álló termék példáján keresztül validáltam. Nagyobb méretű feladatra nem volt szükség a validáláshoz, hiszen a feladat mérete nem befolyásolja a módszer alkalmazhatóságát.

A 13. ábra a minőséghez kapcsolódó paramétereket hipergeometrikus eloszlásfüggvénnyel leíró döntési fa felépítését mutatja be. Ezen döntési fa alapján az egyes alkatrészekre meghatározható az optimális minőségellenőrzési stratégia, amely jelen esettanulmány esetében a tesztelés utáni javítást eredményezte.



13. ábra: A két alkatrésze vonatkozó döntési fa [S11]

Ahogy azt a 14. ábra mutatja, a költség függvénye az 1. osztályú sorozatok a priori valószínűségének, és két olyan szignifikáns pont található, ahol az optimális stratégia változik.



14. ábra: Teljes költség az 1. osztályú sorozatok a priori valószínűségének függvényében [S11]

Jelen esettanulmányban az első pont, ahol az optimális stratégia változik a $p_{Q_1} = 0.62$ pont. Ezen érték alatt az optimális stratégia az összes alkatrész javítása. A $p_{Q_1} = 0.82$ fölött nem szükséges javítás az 1. osztályú sorozatok nagy aránya miatt, míg a két érték között kell optimalizálással eldönteni, hogy melyik a jobb stratégia a mintavételezésre és a javításra.

Új tudományos eredmény

Kidolgoztam egy olyan döntéstámogató modellt, mely Winston [32] döntési fáján alapulva alkalmas az optimális mintavételezési és javítási paraméterek meghatározására egy bizonytalan minőségű komponenseket tartalmazó gyártó- vagy szerelőrendszerben. A minőséghez kapcsolódó paraméterek modellezésére hipergeometrikus eloszlásfüggvényt alkalmaztam. A modell alapján elvégzett számításokkal meghatározható, hogy mely paraméterek esetében milyen mintavételezési és javítási stratégiát kell követni a teljes költség csökkentése érdekében [S9-S11].

3.4 Hulladékgyűjtési folyamat tervezése

Az emberek nagyvárosokba történő vándorlása vezetett oda, hogy évente mintegy 60 millió emberrel növekszik a nagyvárosi lakosság létszáma. Ez a létszámnövekedés nagymértékben hozzájárul a lakossági hulladék gyűjtésével és feldolgozásával kapcsolatos problémák növekedéséhez. Nagyvárosi környezetben számos olyan feladattal kell szembesülni a kommunális hulladékok gyűjtése során, melyeknek nagyfokú rendelkezésreállás mellett kell rugalmasan, költséghatékonyan és környezetbarát módon működniük.

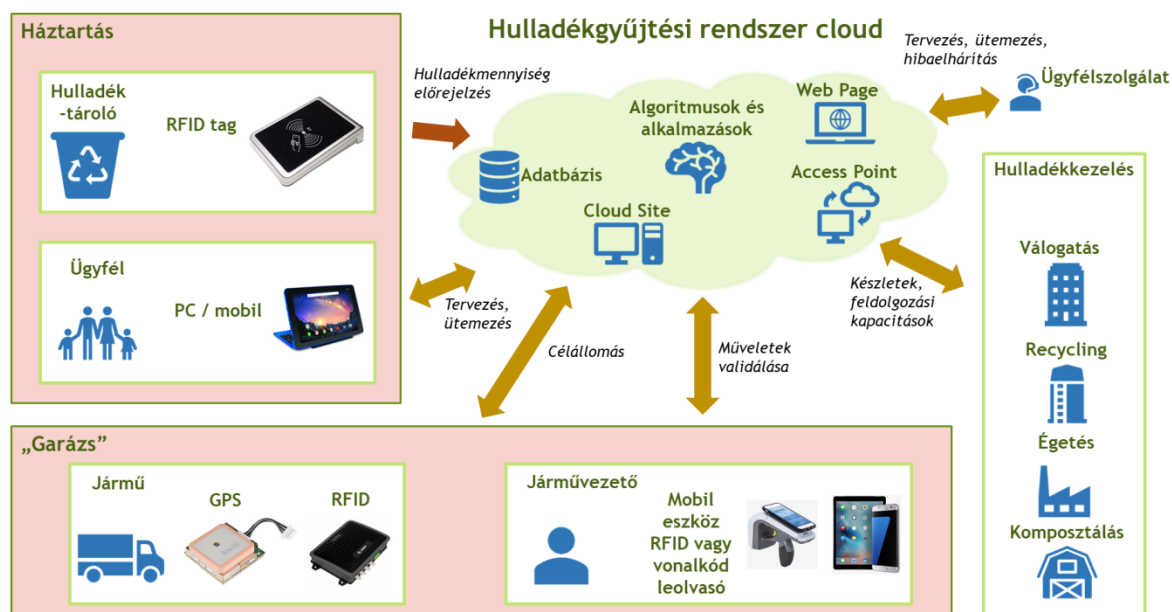
A hulladékgyűjtés logisztikai kérdéseinek vizsgálatával foglalkozó kutatási irányt *Mang Béla* és *Cselényi József* professzorok alapozták meg, akiknek a vezetésével intenzív alap- és alkalmazott kutatási tevékenység folyt a Logisztikai Intézetben [33,34]. Ezen kutatásokba kapcsolódtam be és vehettem részt számos nemzetközi projektben és ipari K+F munkában és az ott elért eredményeket számos publikációban jelentettem meg [S12-S14].

Jelen kutatási munkám keretében azt vizsgáltam, hogy az Ipar 4.0 technológiák használata révén hogyan lehetséges a kommunális hulladékgyűjtési rendszerek optimális kialakítása és működtetése [S15]. Kutatómunkám során kidolgoztam a kommunális hulladékgyűjtés kiber-fizikai rendszerként való működésének modelljét. Ezen modell alapján kidolgoztam egy olyan optimalizálási módszert, mely révén biztosítható a rendszer hatékony működtetése.

Kommunális hulladékgyűjtés, mint kiber-fizikai rendszer

Kutatómunkám során két különböző hulladékgyűjtési rendszert vizsgáltam. Első esetben hagyományos gyűjtési rendszerről beszélünk, míg második esetben a hagyományos rendszer alakul át kiber-fizikai rendszerré Ipar 4.0 technológiák alkalmazása révén a gyűjtőrendszer teljesítőképességének, rugalmasságának, rendelkezésre állásának növelése érdekében. Hagományos gyűjtési rendszerekben a hulladékgyűjtés folyamata előre rögzített, független a hulladékgyűjtő edényekben lévő hulladék mennyiségétől [35]. Ebben az esetben nehéz a szállító járművek kapacitáskihasználását tervezni. Ipari környezetben lévő megoldások igazolták, hogy érdemes a hulladékgyűjtő konténereket hulladékmennyiség mérő szenzorokkal és vezeték nélküli kommunikációval ellátni, hiszen ebben az esetben a szolgáltatónak valós idejű hozzáférése van az aktuális hulladékmennyiségekhez és így jobban kihasznált járatokat tud tervezni hulladékgyűjtési folyamataihoz [36]. A valós idejű hulladékmennyiség monitoring révén a napi és heti fluktuációk is nyomon követhetőek, ezáltal a

folyamat költségei és környezetterhelése is csökkenthető. A 15. ábra egy általam kidolgozott kiber-fizikai hulladékgyűjtési rendszer modelljét szemlélteti, mely tartalmazza a hulladékok forrásait, a technológiai és logisztikai szolgáltatókat.



15. ábra: Kiber-fizikai hulladékgyűjtési rendszer és elemei: ügyfelek, gyűjtő járművek, hulladékfeldolgozók, vevőszolgálat [S15]

A hulladékgyűjtő tartályok távfelügyelete vagy valós idejű monitoringgal oldható meg WI-FI kapcsolattal, vagy késleltetett off-line formában, ahol az összegyűjtött adatokat RFID olvasó gyűjti össze. Az összegyűjtött adatokat fel kell tölteni a felhőbe. Ugyan számos technológia létezik a kommunális hulladékok ártalmatlanítására, semlegesítésére, azonban az általam kidolgozott modellben az égetés és az újrahasznosítás technológiáját helyeztem előtérbe azok korlátozott feldolgozási kapacitása miatt. A rendelkezésre álló feldolgozási kapacitások szintén a felhőben találhatóak meg a valós-idejű monitoring eredményeként. A hulladékfeldolgozók és az ügyfelek közötti kapcsolatot a hulladékgyűjtő járművek teremtik meg, melyek az ügyfeleknél keletkezett hulladékot a feldolgozóba szállítják. A bemutatásra kerülő modellben a tervezés célja egy olyan környezetbarát módon, költséghatékonyan üzemelő gyűjtési rendszer kialakítása és működtetése, mely szinkronizálja a rendelkezésre álló feldolgozási kapacitásokat az összegyűjtendő hulladékmennyiséggel és a gyűjtési folyamattal.

A kommunális hulladékgyűjtési rendszer modelljében m darab háztartás és n darab feldolgozó üzem található. A keletkezett háztartási hulladékok elszállítására q darab jármű áll rendelkezésre. A feldolgozó üzem tárolókapacitása adott. A tervezés során a következő döntéseket kell meghozni:

háztartások hozzárendelése a gyűjtő járművek egyes járataihoz, gyűjtőjáratok ütemezése a rendelkezésre álló hulladékmennyiség és a feldolgozó üzem feldolgozási kapacitásának függvényében. Ezen integrált hozzárendelési és ütemezési feladat NP-nehéz probléma.

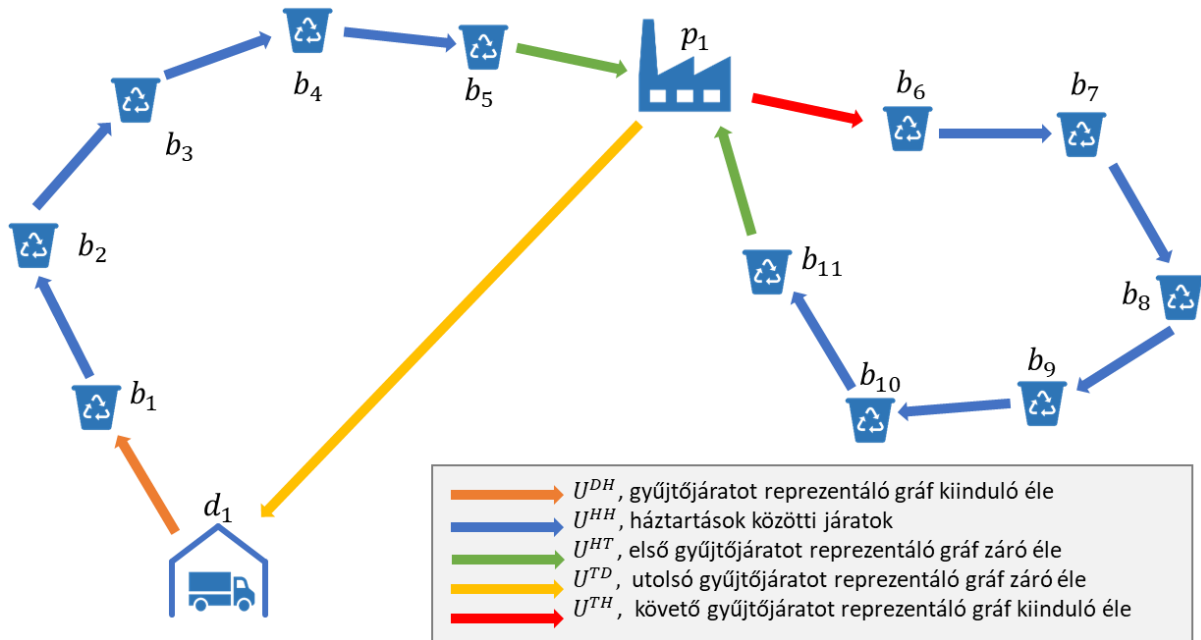
A kiber-fizikai gyűjtési rendszer layoutja a következő változókkal írható le:

- b_i az i . vevő pozíciója, ahol $i \in (1, 2, \dots, m)$;
- p_j a j . feldolgozóhely pozíciója, ahol $j \in (1, 2, \dots, n)$;
- d_k a k . járműtelep pozíciója, ahol $k \in (1, 2, \dots, q)$.

A tervezés célfüggvénye a gyűjtési folyamat energiafelhasználásának minimalizálása:

$$\min U = U^{DH} + U^{HH} + U^{HT} + U^{TD} + U^{TH}, \quad (4.1)$$

ahol U^{DH} a hulladékgyűjtő jármű energiafelhasználása a járműtelep és a körjáratban lévő első háztartás között, U^{HH} a hulladékgyűjtő jármű energiafelhasználása az egyes háztartások között, U^{HT} a hulladékgyűjtő jármű energiafelhasználása a körjáratban lévő utolsó háztartás és a feldolgozóüzem között, U^{TD} a hulladékgyűjtő jármű energiafelhasználása a feldolgozóüzem és a járműtelep között, U^{TH} a hulladékgyűjtő jármű energiafelhasználása a feldolgozóüzem és a következő körjárat első háztartása között (16. ábra).



16. ábra: Gyűjtési körút, mint gráf, ahol a csúcsok a háztartásokat, a feldolgozóüzemeket és a járműtelepet jelölik, míg az élek a gyűjtőjárat egyes szakaszait [S15]

Az energiafelhasználás a gyűjtést végző járművek gázolajfogyasztásának, a megtett távolságnak és a rakomány tömegének függvényében számítható.

Az energiafelhasználást definiáló célfüggvény első része a hulladékgyűjtő jármű energiafelhasználását definiálja a járműtelep és a körjáratban lévő első háztartás között. Az energiafelhasználás a rakatlan jármű fajlagos üzemanyag-fogyasztásának és a járműtelep és az első háztartás távolságának a függvényében számítható:

$$U^{DH} = \sum_{k=1}^q \sum_{\alpha=1}^h \sum_{i=1}^m \vartheta_{k,\alpha} \cdot l_{k,i}(d_k, b_i) \cdot x_{k,\alpha,i}^{DH}, \quad (4.2)$$

ahol $\vartheta_{k,\alpha}$ az α . jármű fajlagos üzemanyag-fogyasztása a járműtelep és a járat első háztartása között, $l_{k,i}$ a k . járműtelep és a járáshoz rendelt első háztartás közötti távolság, $x_{k,\alpha,i}^{DH}$ a k . járműtelep α . járművének i . háztartáshoz rendelését definiáló hozzárendelési mátrix egy eleme.

A célfüggvény második része a hulladékgyűjtő jármű energiafelhasználása az egyes háztartások között, kivéve a járműtelep és a körjárat első háztartása, valamint a körjárat utolsó háztartása és a feldolgozóüzem közötti relációt:

$$U^{HH} = \sum_{k=1}^q \sum_{\alpha=1}^h \sum_{\beta=1}^{n_\alpha} \sum_{\gamma=1}^{n_\beta} \sum_{i=1}^m \vartheta_{k,\alpha}^*(q_{k,\alpha,\beta,\gamma}) \cdot l_{k,\alpha,\beta}(B_{k,\alpha,\beta}) \cdot x_{k,\alpha,\beta,\gamma,i}^{HH}, \quad (4.3)$$

ahol $\vartheta_{k,\alpha}^*$ a k . járműtelep α . járművének fajlagos energiafelhasználása a háztartások között, $q_{k,\alpha,\beta,\gamma}$ a hulladékgyűjtő jármű rakománya a γ^{th} háztartás után, $l_{k,\alpha,\beta}$ a k . járműtelep α . járműve által megtett β . járat hossza az egyes háztartások között, $B_{k,\alpha,\beta}$ a k . járműtelep α . járműve által megtett β . járáshoz rendelt háztartások halmaza, $x_{k,\alpha,\beta,\gamma,i}^{HH}$ a háztartások és járatok összerendelési mátrixának egy eleme.

A célfüggvény harmadik tagja a hulladékgyűjtő jármű energiafelhasználása a körjáratban lévő utolsó háztartás és a feldolgozóüzem között:

$$U^{HT} = \sum_{k=1}^q \sum_{\alpha=1}^h \sum_{\beta=1}^{n_\alpha} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \vartheta_{k,\alpha}^*(q_{k,\alpha,\beta,n_\beta}) \cdot l_{k,\alpha,\beta,j}(b_i, p_j) \cdot x_{k,\alpha,\beta,n_\beta,i}^{HT} \cdot x_{k,\alpha,\beta,j}^T, \quad (4.4)$$

ahol $\vartheta_{k,\alpha}^*$ a k . járműtelep α . járművének fajlagos energiafelhasználása a járat utolsó háztartása és a feldolgozóüzem között, $q_{k,\alpha,\beta,n_\beta}$ a k . járműtelep α . járművének rakománya a β . járat esetében a járat által érintett utolsó háztartás után, $l_{k,\alpha,\beta}$ a k . járműtelep α . járműve által megtett β . járat hossza az utolsó háztartás és a feldolgozóüzem között, $x_{k,\alpha,\beta,n_\beta,i}^{HT}$ a háztartások és gyűjtési körutak hozzárendelési mátrixának egy eleme az utolsó háztartások esetében, $x_{k,\alpha,\beta,j}^T$ a hozzárendelési mátrix azon eleme, mely a feldolgozóüzemeket rendeli a gyűjtőjáratokhoz.

A célfüggvény negyedik tagja a feldolgozóüzem és a járműtelep közötti energiafelhasználást definiálja:

$$U^{TD} = \sum_{k=1}^q \sum_{\alpha=1}^h \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^q \sum_{\alpha=1}^h \vartheta_{k,\alpha} \cdot l_{k,j}(d_k, p_j) \cdot x_{k,\alpha,n_\beta,j}^T, \quad (4.5)$$

ahol $l_{k,j}$ a k . járműtelep és a j . feldolgozóüzem közötti távolság, $x_{k,\alpha,n_\beta,j}^T$ a hozzárendelési mátrix járműtelepek és feldolgozóüzemek összerendelését leíró elem.

A célfüggvény utolsó tagja a feldolgozóüzemek és a gyűjtőjáratokhoz elsőként rendelt háztartások közötti energiafelhasználást írja le:

$$U^{TH} = \sum_{k=1}^q \sum_{\alpha=1}^h \sum_{\beta=2}^{n_\alpha} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \vartheta_{k,\alpha} \cdot l_{k,j,i}(p_j, b_i) \cdot x_{k,\alpha,\beta,1}^{TH} \cdot x_{k,\alpha,\beta-1,j}^T \quad (4.6)$$

A fentiekben megfogalmazott integrált hozzárendelési és ütemezési feladat megoldásához idő- és kapacitáskorlátokat lehet figyelembe venni. Az időkorlátok alapvetően a háztartásokat és a feldolgozóüzemeket érintik, míg a kapacitáskorlát a szállító járművek és feldolgozóüzemek esetében bír nagy relevanciával.

Korlátozás 1: A feldolgozóüzem hulladékfeldolgozó kapacitása nem léphető túl:

$$\forall j: \sum_{k=1}^q \sum_{\alpha=1}^h \sum_{\gamma=1}^{n_\beta} \sum_{\beta=1}^{n_\alpha} \sum_{i=1}^m q_i^{HH} \cdot (x_{k,\alpha,i}^{DH} + x_{k,\alpha,\beta,\gamma,i}^{HH} + x_{k,\alpha,\beta,1}^{TH}) \cdot x_{k,\alpha,\beta,j}^T \leq c_j^{Pmax}, \quad (4.7)$$

ahol c_j^{Pmax} a j . feldolgozóüzem hulladékfeldolgozó kapacitása.

Korlátozás 2: A hulladékgyűjtő járművek kapacitása nem léphető túl:

$$\forall k, \alpha, \beta: \sum_{\gamma=1}^{n_\beta} \sum_{i=1}^m q_i^{HH} \cdot (x_{k,\alpha,i}^{DH} + x_{k,\alpha,\beta,\gamma,i}^{HH} + x_{k,\alpha,\beta,1}^{TH}) \cdot x_{k,\alpha,\beta,j}^T \leq c_{k,\alpha}^{Tmax}, \quad (4.8)$$

ahol $c_{k,\alpha}^{Tmax}$ a k . járműtelep α . járművének kapacitása, q_i^{HH} az i . háztartásban összegyűlt hulladékmennyiség.

Korlátozás 3: A feldolgozóüzembe történő beszállításnak egy előre definiált időablakon belül kell esni.

$$\tau_j^{Dmin} \leq t_{k,\alpha}^{INI} + t_{k,\alpha}^{DH} + \sum_{\beta=1}^u (t_{k,\alpha,\beta,j}^{HT} + t_{k,\alpha,\beta,j}^{TH} + \sum_{\gamma=1}^{n_\beta} t_{k,\alpha,\beta,\gamma}^{TR} + t_{k,\alpha,\beta,\gamma}^{LO} + t_{k,\alpha,\beta,\gamma}^{VA}) \leq \tau_j^{Dmax}, \quad (4.9)$$

ahol $t_{k,\alpha}^{INI}$ a k . járműtelep α . járművének indulási időpontja a járműtelepről, τ_j^{Dmin} és τ_j^{Dmax} a feldolgozóüzembe történő beszállítás előre definiált időablakának alsó és felső korlátja, $t_{k,\alpha}^{DH}$ a k . járműtelep α . járművének szállítási ideje a járműtelep és az első gyűjtőjárat első háztartása között, $t_{k,\alpha,\beta,j}^{HT}$ a szállítási idő a gyűjtőjárat utolsó háztartása és a feldolgozóüzem között, $t_{k,\alpha,\beta,j}^{TH}$ a szállítási idő a feldolgozóüzem és a következő gyűjtőjárat első háztartása között, $t_{k,\alpha,\beta,\gamma}^{TR}$ a háztartások közötti szállítási idő, $t_{k,\alpha,\beta,\gamma}^{LO}$ a szállítójármű rakodási ideje, $t_{k,\alpha,\beta,\gamma}^{VA}$

az egyes háztartásoknál szükséges adminisztrációs idő, u a j . feldolgozóüzemhez rendelt gyűjtőjárat azonosítója.

Korlátozás 4: A háztartásokból történő begyűjtésnek egy előre definiált időablakon belül kell esni.

$$\tau_i^{Emin} \leq \tau^E \leq \tau_i^{Emax}, \quad (4.10)$$

ahol $\tau^E = \tau_1^E$ amennyiben az i . háztartás az első gyűjtőjárat elsőként felkeresendő háztartása, $\tau^E = \tau_2^E$ amennyiben az i . háztartás az első gyűjtőjáratban nem elsőként felkeresendő háztartás, $\tau^E = \tau_3^E$ ha az i . háztartás nem az első gyűjtőjáratához van rendelve:

$$\tau_1^E = t_{k,\alpha}^{INI} + t_{k,\alpha}^{DH} \quad (4.11)$$

$$\tau_2^E = t_{k,\alpha}^{INI} + t_{k,\alpha}^{DH} + \sum_{\gamma=2}^{n_1} t_{k,\alpha,1,\gamma}^{TR} + t_{k,\alpha,1,\gamma}^{LO} + t_{k,\alpha,1,\gamma}^{VA} \quad (4.12)$$

$$\tau_3^E = t_{k,\alpha}^{INI} + t_{k,\alpha}^{DH} + t_{k,\alpha,z,j}^{TH} + \sum_{\beta=1}^{z-1} (t_{k,\alpha,\beta,j}^{HT} + t_{k,\alpha,\beta,j}^{TH}) + \sum_{\beta=1}^{z-1} \sum_{\gamma=1}^{n_\beta} (t_{k,\alpha,\beta,\gamma}^{TR} + t_{k,\alpha,\beta,\gamma}^{LO} + t_{k,\alpha,\beta,\gamma}^{VA}) \quad (4.13)$$

Kétfajta döntési változója van a feladatnak: a hozzárendelési mátrix egy bináris mátrix, míg az ütemezési probléma változói valós számok. A hozzárendelési mátrix a háztartásokat hozzárendeli az egyes gyűjtőjáratokhoz:

$$\begin{aligned} x_{k,\alpha,i}^{DH} &\in (0,1) \wedge x_{k,\alpha,\beta,\gamma,i}^{HH} \in (0,1) \\ x_{k,\alpha,\beta,n_\beta,i}^{HT} &\in (0,1) \wedge x_{k,\alpha,\beta,1}^{TH} \in (0,1) \wedge x_{k,\alpha,\beta,j}^T \in (0,1) \end{aligned} \quad (4.14)$$

Az ütemezési mátrix $t_{k,\alpha}^{INI}$ elemei megadják a k . járműtelep α . járművének indulási időpontját, mely alapján már az egyes gyűjtőjáratok konkrét ütemezése számítható:

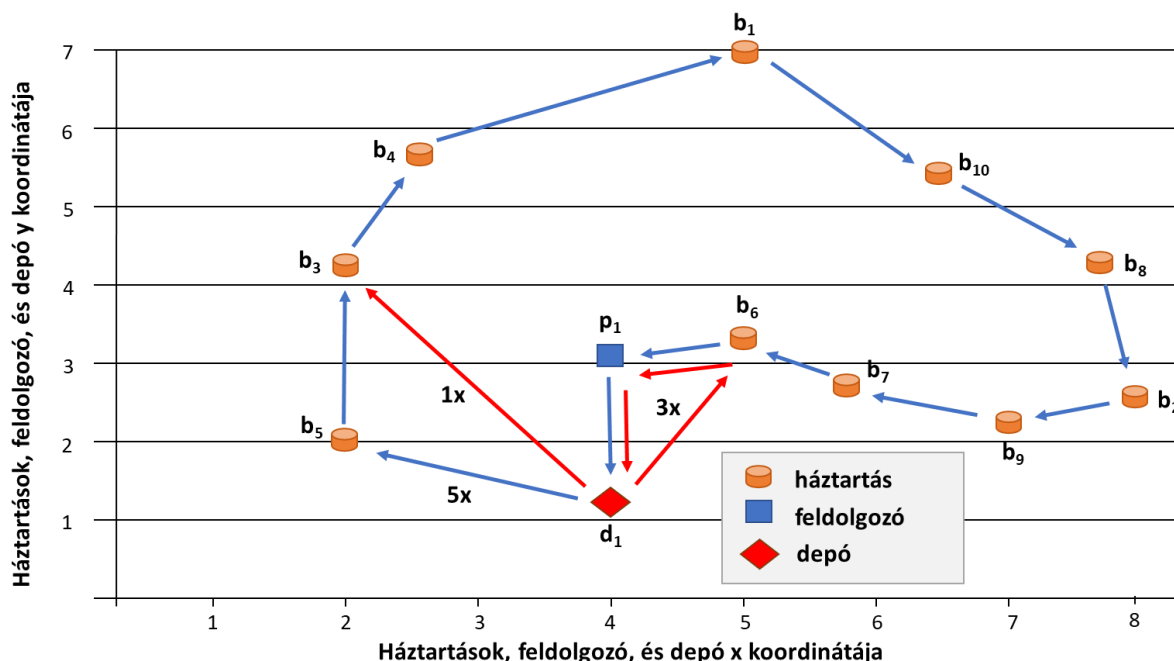
$$t_{k,\alpha}^{INI} \in \mathbb{R} \quad (4.15)$$

A fentiekben bemutatott optimalizálási feladat megoldására a részecske raj heurisztikák közül a bat algoritmust választottam tesztfüggvényeken végzett vizsgálataim eredményeként. A modellben különböző járműtípusok és különböző hulladéktároló méretek definiálhatók. Adottak az egyes háztartásokban keletkezett hulladékmennyiségek. Ezen adatok felhasználásával vizsgáltam a hagyományos és a kiber-fizikai gyűjtőrendszer különböző stratégiáit. Ismertek a feldolgozóüzem kapacitásai, a gyűjtést végző járművek kapacitásai és a hulladékgyűjtő edények kapacitásai.

Az első esetben a hulladékgyűjtési rendszer hagyományos rendszerként üzemel, a hulladékmanagement rendszernek nincs valós idejű információja a keletkezett

hulladék mennyiségéről, ezért a hulladékgyűjtés, mint periódikus gyűjtőjáratok sorozata kerül megvalósításra.

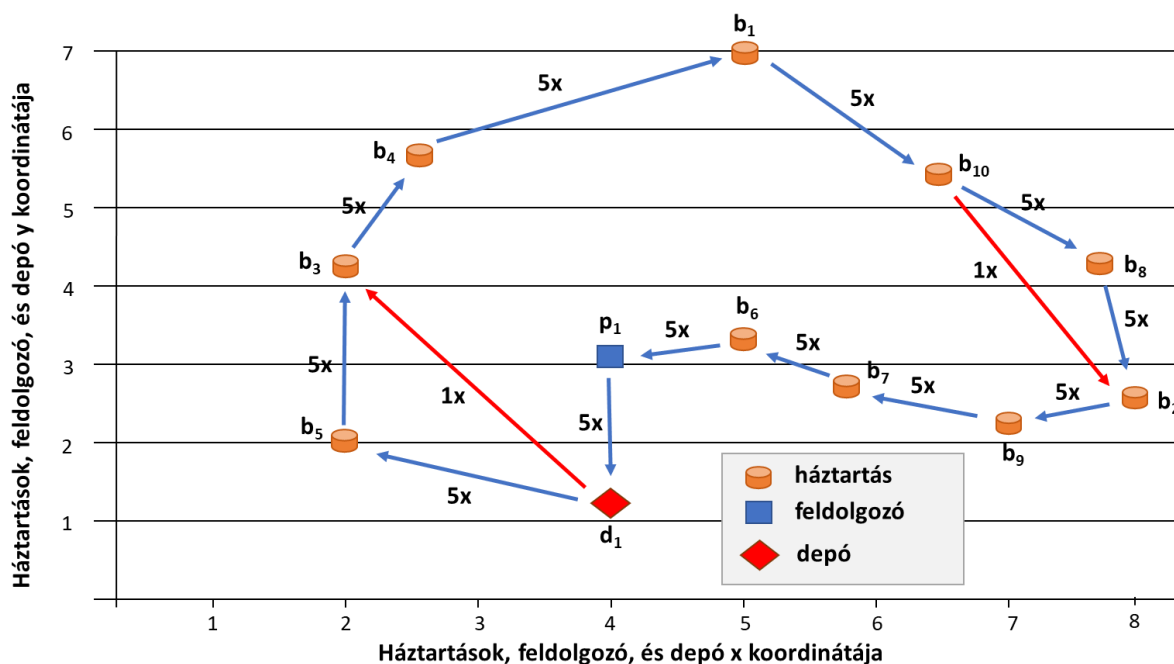
A járattervező algoritmus meghatározta az optimális *járműtelep-b₅-b₃-b₄-b₁-b₁₀-b₈-b₂-b₉-b₇-b₆-p₁-járműtelep* sorrendet, majd mivel az 3 esetben is a szállítási kapacitást meghaladja, ezért a járatokat át kell ütemezni a kapacitástúllépés megszüntetése érdekében (17. ábra).



17. ábra: Gyűjtőjáratok: mivel a járműkapacitás nem léphető át, ezért három gyűjtőjáratot kell beszúrni [S15]

Az újraütemezés után az összes járat hossza növekedett a *járműtelep-b₆-p₁-járműtelep* kiegészítő járatok miatt, azonban a szállítási kapacitások nem lettek átlépve.

A második esetben megvizsgáltam ugyanezen paraméterek esetében egy kibefizikai hulladékgyűjtő rendszer működését. Mivel a háztartásokban keletkező hulladékmennyiségről valós idejű információk állnak rendelkezésre a felhőben (15. ábra), ezért lehetséges egy olyan működtetési stratégia kidolgozása, melynek révén a hagyományos gyűjtési folyamathoz képest növelhető a szolgáltatás színvonala. A bat algoritmuson alapuló járattervező és ütemező algoritmus a 18. ábra szerinti 3 különböző gyűjtőjáratot alakította ki.



18. ábra: Gyűjtőjáratok a kiber-fizikai gyűjtőrendszerben [S15]

Mivel rendelkezésre állt valós idejű információ a keletkezett hulladék mennyiségéről, ezért a beszállított hulladék mennyisége és a rendelkezésre álló feldolgozási kapacitás szinkronizálása révén a feldolgozásra várakozó tárolt hulladékmennyiség csökkenthető.

Új tudományos eredmény

Kidolgoztam a kommunális hulladékgyűjtés kiber-fizikai rendszerének Ipar 4.0 technológiák alkalmazásán alapuló modelljét. A kiber-fizikai gyűjtőrendszert leíró matematikai modell bat algoritmuson alapuló, integrált hozzárendelési és ütemezési feladatként történő megoldásával alkalmas a hagyományos hulladékgyűjtési rendszerek szolgáltatási színvonalának javítására, a károsanyagkibocsátás csökkentésére és a rendszer energiafogyasztásának csökkentésére. A kidolgozott modellt és módszert esettanulmányokkal validáltam [S12-S15].

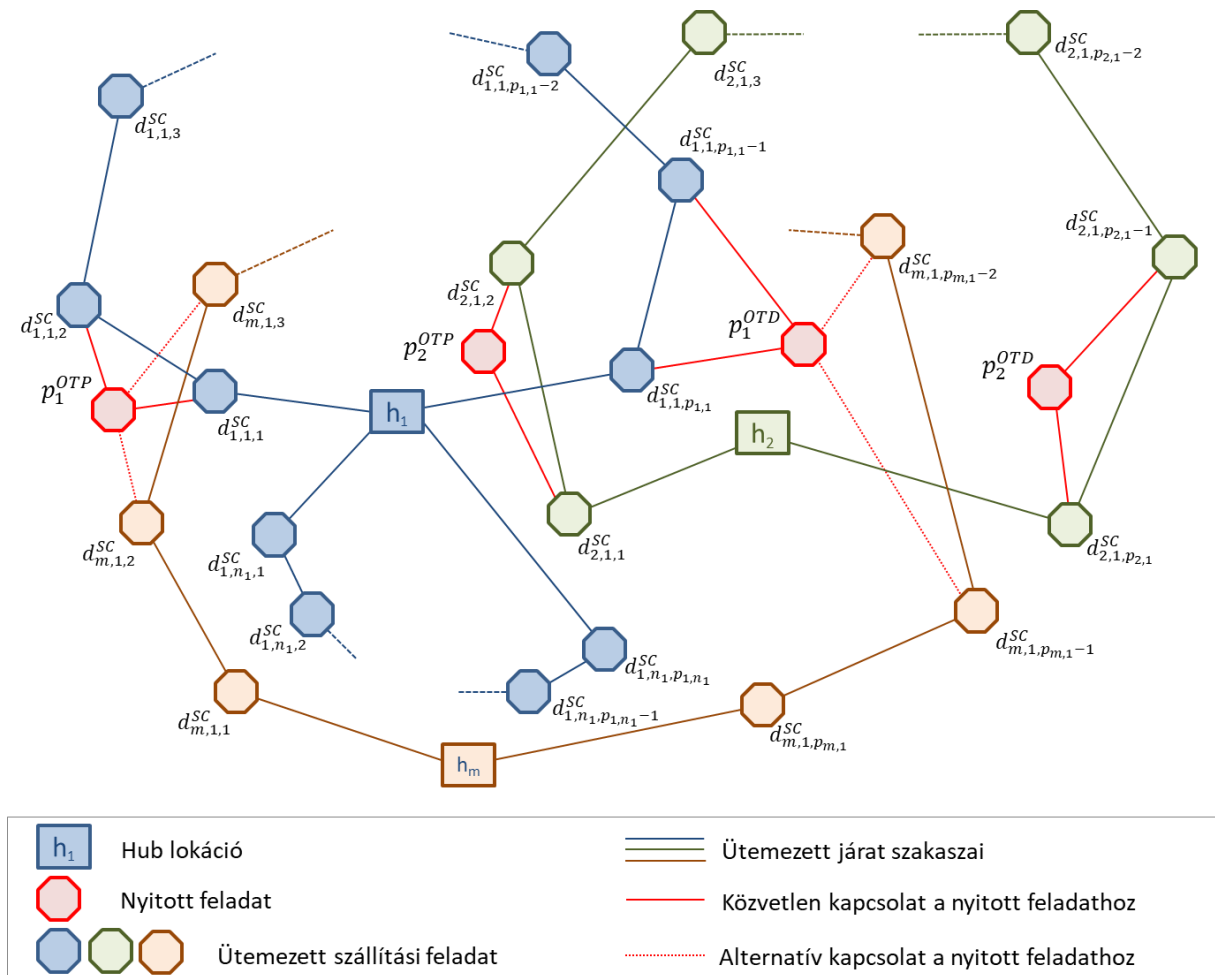
3.5 First-mile és last-mile folyamatok optimalizálása

Az energiahatékonyság és a környezetvédelmi szempontok sokáig nem játszottak központi szerepet a logisztikai folyamatok kialakításában. Az energiahatékonyság különösen érzékeny területe a first-mile és last-mile logisztikai szolgáltatási megoldásoknak, ahol az egyes szállítmányok egyedi szállítási igényekből állnak össze és ezeket kell egy definiált időablakon belül teljesíteni [37]. Jelen kutatási munkám keretében a first-mile és last-mile logisztikai folyamatok energiahatékonyság szempontjából történő optimalizálását tűztem ki célul. A Miskolci Egyetem Logisztikai Intézetében az elmúlt évtizedekben a kutatási irányok jelentős mértékben átalakultak. *Illés Béla* professzor szakmai irányítása alatt olyan új kutatási irányok jelentek meg az Intézet életében a hagyományos termelési logisztikai feladatok mellett, mint a szolgáltatási tevékenységekhez kapcsolódó komplex logisztikai folyamatok tervezési és irányítási kérdéseinek vizsgálata [38], különös tekintettel az Ipar 4.0 vonatkozásaira [39]. Ezen kutatási tevékenységhez kapcsolódva keltették fel érdeklődésemet a közvetlen és közvetett ellátási folyamatok, a valós idejű optimalizálás lehetőségei [S16], a kihelyezett gyártás tervezése speciális termelési környezetben [S17] és a first-mile/last-mile logisztikai folyamatok, így kutatásaim során célul tűztem ki olyan modellek és módszerek kidolgozását, melyek révén fokozható ezen folyamatok hatékonysága. A first mile és last mile logisztikai megoldások alapvetően a gyűjtési [40] és elosztási [41] feladatokra fókuszálnak.

A bemutatásra kerülő kutatási munkát az a tapasztalat indukálta, hogy a csomagküldő szolgálatok között nincs olyan együttműködési forma, mely lehetővé tenné a szolgáltatási feladatok megosztását az energiahatékonyabb működés érdekében. Például ha valaki fel szeretne adni egy csomagot és a TNT-t hívja, de egy DHL-es futár van a közelben, akkor a DHL-es futár viszi el a csomagot. Ez az Elon Musk erőforrás-kihasználtságot maximális szintre emelő filozófiájával egyeztethető össze, melyet egyre több, főként Y generációs vállalatvezető vesz át és azt a hozzáállást képviseli, hogy nem feltétlenül birtokolni kell feladatokat és erőforrásokat, hanem problémákat és feladatokat kell megoldani intenzív együttműködés révén, ami pedig a negyedik ipari forradalom fő céljával, rendszerekből történő minél több információ kinyerésével és hasznosításával egyeztethető össze.

Az 19. ábra által szemléltetett modellben három különböző típusú szállítási feladatot különböztethetünk meg: (1) ütemezett szállítások, melyek járatokhoz

és járművekhez rendelték; (2) olyan nyitott szállítási feladatok ismert célállomással, melyek nincsenek járatokhoz és járművekhez rendelve; (3) olyan nyitott szállítási feladatok, melyek célállomása ismeretlen. Az ellátási láncban m szolgáltató, n_i ütemezett körút és $p_{i,j}$ célállomás található, ahol i a szolgáltató azonosító, j a körút azonosító. Vannak nyitott megrendelések, melyeket fel kell venni és el kell juttatni a célállomásra. Az ellátási lánc egy hub and spoke rendszerként működik, ahol a szolgáltatók központjai, mint hubok alkalmasak arra, hogy a felvett rakományok (küldemények) tárolhatóak mindaddig, amíg a kézbesítése valamilyen okból nem lehetséges. A modell döntési változói a következők: nyitott megrendelések hozzárendelése logisztikai szolgáltatókhoz és azok egyes már ütemezett járataihoz, az egyes rakományok felvételének és kiszállításának ütemezése.



19. ábra: Last-mile logisztikai folyamat energiahatékonyság-alapú optimalizálásának modellje [S18]

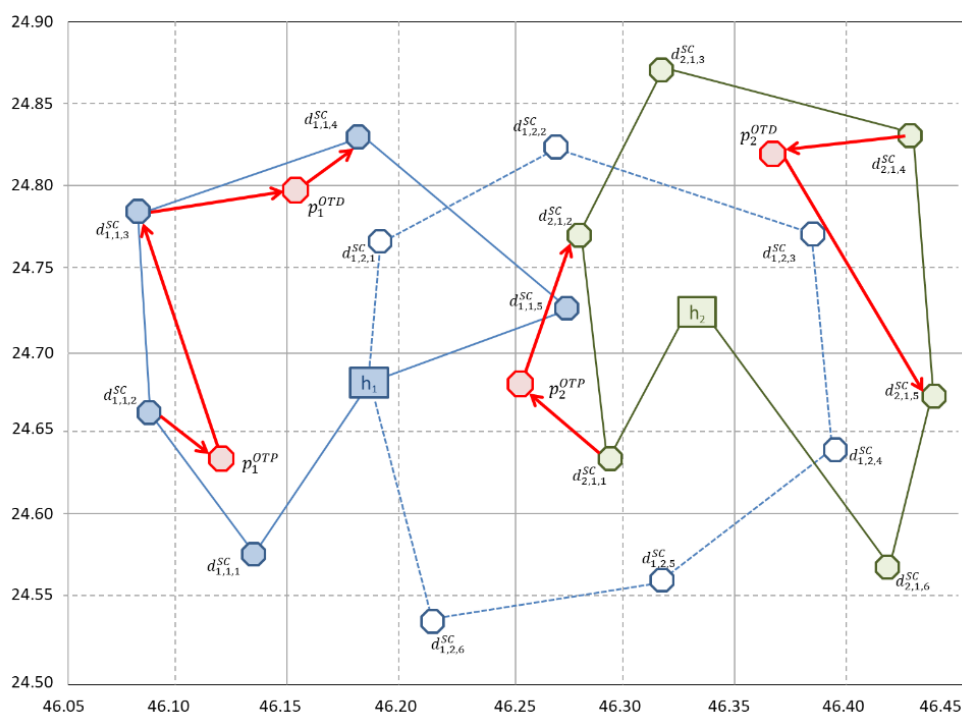
A fenti last mile logisztikai feladat matematikai modelljének megoldásához jól használhatóak a jelen téziszfüzetben tárgyalt kiber-fizikai hulladékgyűjtő rendszernél tárgyaltak, így annak részletes bemutatásától eltekintek.

A last mile logisztikai rendszer esetében kidolgozott modellnél öt különböző esettanulmány vizsgálatát végeztem el:

- Nem együttműködő csomagküldő szolgálatok, nincs időablak, nincs valós idejű ütemezés (scenario 1)
- Együttműködő csomagküldő szolgálatok
 - nincs időablak, nincs valós idejű ütemezés (scenario 2)
 - nincs időablak, nincs kapacitáskorlát, van valós idejű ütemezés (scenario 3)
 - nincs időablak, van kapacitáskorlát és valós idejű ütemezés (scenario 4)
 - van időablak, kapacitáskorlát és valós idejű ütemezés (scenario 5)

Jelen esettanulmányban két csomagküldő szolgálat, 17 ütemezett cím három ütemezett körjáratban és két nyitott feladat található.

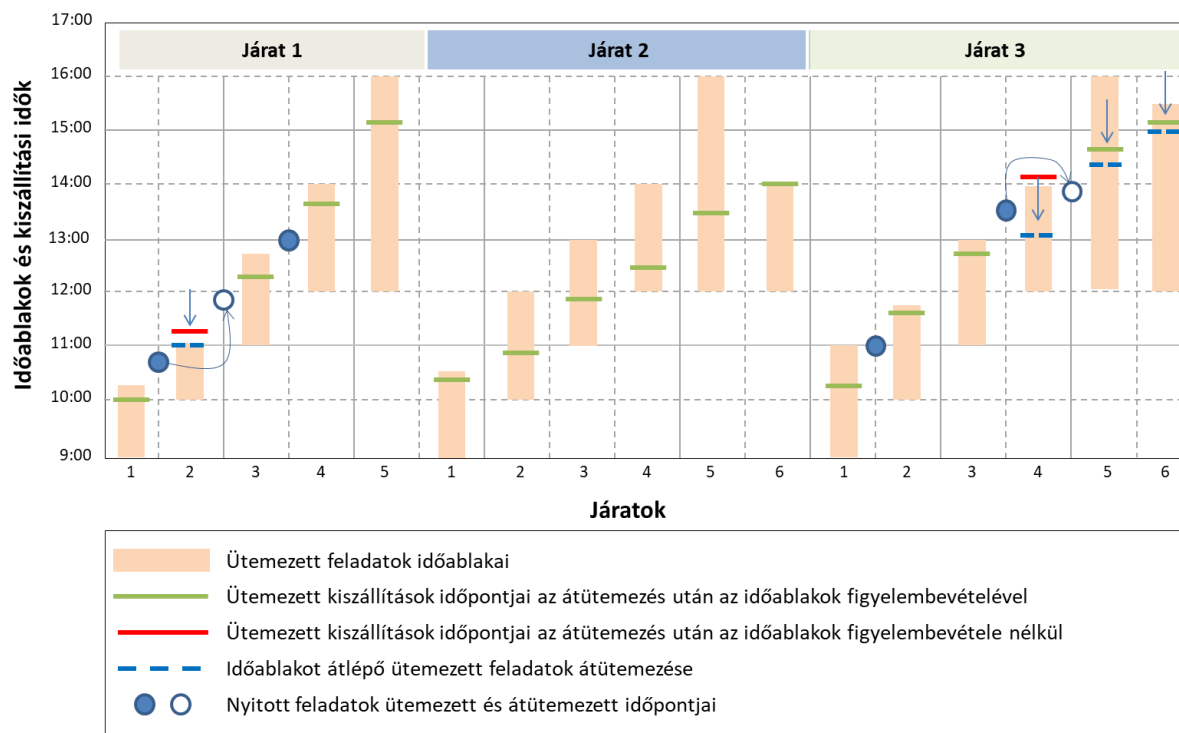
Jelen fejezetben az 5. scenario kerül részletesen bemutatásra, az összes scenario az [S18] irodalomban került részletesen ismertetésre. A black hole algoritmuson alapuló heurisztikus algoritmus két különböző megoldást adott a nyitott szállítási feladatok ütemezett járatokhoz rendelésére. Az első megoldás az időkorlátokat nem veszi figyelembe, míg a második esetben nem csupán a már ütemezett, hanem a nyitott szállítási feladatok is az előírt időablakon belül kerülnek felvételre és kiszállításra (20. ábra).



20. ábra: A nyitott szállítási feladatok ütemezett járatokhoz rendelése időablak figyelembevételével [S18]

A korlátok szigorodása (időkorlát bevezetése) már hosszabb útvonalat eredményezett a nyitott feladatok ütemezett járatokhoz rendelése során.

A 21. ábra a valós idejű ütemezés eredményét mutatja a három járat esetében.



21. ábra: Nyitott szállítási feladatok újraütemezése azok időablakon belül tartása érdekében [S18]

Új tudományos eredmény

Kidolgoztam a first-mile és last-mile logisztikai feladatok egy új matematikai modelljét, mely alkalmas a valós idejű ütemezési feladatok leírására. Kidolgoztam egy olyan heurisztikus algoritmust, mely alkalmas ezen NP-nehéz optimalizálási feladat megoldására. A kidolgozott modellt és módszert esettanulmányokkal validáltam és bizonyítottam, hogy a valós idejű ütemezés által növelhető a first-mile és last-mile logisztikai folyamatos hatékonysága, csökkenthető az azok által okozott környezetterhelés [S16-S18].

4. Összefoglalás

A PhD fokozat megszerzését követő húsz évben számos olyan alap- és alkalmazott kutatási projektben vehettem részt, melyek a logisztikai folyamatok optimalizálásának témakörét érintik. Kutatásaim során a legtöbbször nagyméretű, komplex logisztikai rendszerek tervezési és irányítási feladatainak megoldásában vettem részt, s ezen problémák megoldására sokszor heurisztikus optimalizálási algoritmusokat kellett alkalmaznom. Az elért eredményeim az alábbi pontokban foglalhatók össze:

1. Kidolgoztam a just-in-sequence beszállítás három alapvető típusának (make-to-sequence, ship-to-sequence, build-to-sequence) költségét befolyásoló főbb logisztikai tevékenységek strukturális modelljét. Kidolgoztam egy olyan matematikai modellt, mely alkalmas a just-in-sequence beszállítás teljesítményének növelésére alkalmas rendszerparaméterek optimalizálására. Az NP-nehez optimalizálási probléma megoldására a flower pollination heurisztikát alkalmaztam, ahol az állapottérben a globális keresés a biotikus porzás, míg a lokális keresés az abiotikus porzás és az önporzás modellezése révén kerül megoldásra [S1-S5].
2. Kidolgoztam a mátrixgyártás rugalmas anyagellátási rendszerének matematikai modelljét, amely a valós idejű járattervezés problémáját fogalmazza meg az energiahatékonyság minimalizálása szempontjából. A matematikai modell kapacitás- és időkorlátokat vesz figyelembe. Az optimalizálási feladat megoldására egy hibrid heurisztikát dolgoztam ki, mely integrálja a black hole algoritmust és a flower pollination algoritmust a klaszterképzési és járattervezési feladatok megoldása céljából. Az algoritmus segítségével elvégeztem a valós idejű járattervezési feladat optimalizálását és bemutattam, hogy a különböző villamos energia előállítási módok milyen hatással vannak az optimalizált rendszer virtuális üvegházhatású gáz kibocsátására. Kidolgoztam egy olyan módszert, melynek segítségével elvégezhető egy ismert termelési környezetben a különböző mikrun-alapú anyagellátási stratégiák ciklusidő-alapú összehasonlító elemzése [S6-S8].
3. Kidolgoztam egy olyan döntéstámogató modellt, mely Winston [32] döntési fáján alapulva alkalmas az optimális mintavételezési és javítási paraméterek meghatározására egy bizonytalan minőségű komponenseket tartalmazó gyártó- vagy szerelőrendszerben. A minőséghez kapcsolódó paraméterek modellezésére hipergeometrikus eloszlásfüggvényt alkalmaztam. A modell

alapján elvégzett számításokkal meghatározható, hogy mely paraméterek esetében milyen mintavételezési és javítási stratégiát kell követni a teljes költség csökkentése érdekében [S9-S11].

4. Kidolgoztam a kommunális hulladékgyűjtés kiber-fizikai rendszerének Ipar 4.0 technológiák alkalmazásán alapuló modelljét. A kiber-fizikai gyűjtőrendszert leíró matematikai modell bat algoritmuson alapuló, integrált hozzárendelési és ütemezési feladatként történő megoldásával alkalmas a hagyományos hulladékgyűjtési rendszerek szolgáltatási színvonalának javítására, a károsanyag-kibocsátás csökkentésére és a rendszer energiafogyasztásának csökkentésére. A kidolgozott modellt és módszert esettanulmányokkal validáltam [S12-S15].
5. Kidolgoztam a first-mile és last-mile logisztikai feladatok egy új matematikai modelljét, mely alkalmas a valós idejű ütemezési feladatok leírására. Kidolgoztam egy olyan heurisztikus algoritmust, mely alkalmas ezen NP-nehéz optimalizálási feladat megoldására. A kidolgozott modellt és módszert esettanulmányokkal validáltam és bizonyítottam, hogy a valós idejű ütemezés által növelhető a first-mile és last-mile logisztikai folyamatos hatékonysága, csökkenthető az azok által okozott környezetterhelés [S16-S18].

5. Kutatási eredmények hatása, jövőbeli tervek

A PhD fokozat megszerzését követő több mint húsz éves munkásságom során elért kutatási eredmények mind az oktatásban, mind az ipari gyakorlatban hasznosításra kerültek.

Kutatási eredményeimet sikeresen beépítettem az alap-, mester- és doktori képzés során magyar és angol nyelven oktatott tantárgyakba, melyek közül szeretném kiemelni a következőket:

- Anyagáramlási és raktározási rendszerek (GEALT101B)
- Logisztikai folyamatok optimalizálása (GEALT093B)
- Anyagáramlási rendszerek tervezése és irányítása I-II. (GEALT201N, GEALT202N)
- Termelési és szolgáltatási logisztikai folyamatok (GEALT156M)
- Recycling logisztikai folyamatok (GEALT158M)
- Design of Materials Handling Systems (GEALT001B-a)
- Materials Handling Machines and Systems (GEALT143M-a)

Kutatási eredményeim ipari alkalmazása mind az üzemben belüli anyagmozgatási folyamatok fejlesztése, mind pedig az üzemben kívüli, globális logisztikai hálózatok, ellátási láncok fejlesztése területén megtörtént. Ezt köszönhettem annak, hogy a Miskolci Egyetem Logisztikai Intézetében nagyszámú ipari megbízás, kutatás-fejlesztési projekt került megvalósításra. Ezen nagyszámú projekt közül példaként az alábbi néhányat szeretném kiemelni, melyekben kutatási eredményeim felhasználásra kerülhettek:

- Gyártáselőkészítési és vállalati logisztikai rendszer korszerűsítését megcélzó kutatás-fejlesztés (Miskolci Vasipari Acélszerkezetgyártó ZRt.)
- A jelenlegi készletezési rendszer felülvizsgálata, javaslattétel új tudásanyag felhasználásával a készletezési rendszer korszerűsítésére (REMAT ZRt.)
- A vállalat nemzetközi szállítási járatainak optimális szervezése, figyelembe véve a logisztikai központok nemzetközi kooperációját (Horváth Rudolf Intertransport Kft.)
- Jellegzetes háztartási berendezésekre vonatkozó életciklus végi gyűjtési logisztikai rendszer optimális kialakítására szolgáló modellek és módszerek kidolgozása az EU követelmények figyelembevételével (Lehel Electrolux Hűtőgépgyár Kft.)
- Pyrofuse gyártórendszer optimális kialakítása új tudásanyagon alapuló innovatív módszerek alkalmazásával (FCI Connectors Hungary Kft.)

- Szerelő munkahelyek optimális munkahelyi készletszintjének, tárolási és feltöltési technikájának vizsgálata (Bosch Rexroth Pneumatika Gyártó és Kereskedelmi Kft.)
- Az ÉMI-TÜV Bayern liftsakértői rendszerének fejlesztése (ÉMI-TÜV Bayern)

Kutatási eredményeimet nem csupán az oktatási anyagokba igyekeztem beépíteni, hanem a tehetséggondozás keretében is törekszem a tananyagon túlmutató ismeretet átadni a tehetséges hallgatóknak, akik intézményi és országos tudományos diákköri konferenciákon és diplomamunka pályázatokon értek el szép eredményeket. A doktori képzés keretében olyan doktorjelöltek témavezetője voltam az elmúlt években, akiknek kutatási témája szorosan kapcsolódik a komplex logisztikai folyamatok optimalizálásához.

Jelen tézisfüzetben összefoglalt kutatásaimat a jövőben ki szeretném terjeszteni a kiber-fizikai rendszerek optimalizálási feladatainak vizsgálatára, hiszen a K+F ipari megbízások területén is egyre több olyan feladat jelentkezik, ahol nem egyetlen megbízó saját rendszerének optimalizálása a feladat, hanem egy komplex, átfogó ellátási lánc tervezése kerül középpontba. Továbbra is küldetésemnek tekintem a tehetséggondozást és a tudományos utánpótlás kinevelését, melynek egyik fontos színtere a tudományos diákköri tevékenység.

6. Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet szeretném kifejezni *Cselényi József* és *Illés Béla* professzoroknak, akik szakmai tanácsaikkal segítették kutatásaimat. Ezúton emlékezem meg *Lévai Imre* és *Kulcsár Béla* professzorokról, akiket oktatói-kutatói pályafutásom során mindvégig példaképemnek tekintettem. Köszönet illeti a Logisztikai Intézet, illetve a Gépészmérnöki és Informatikai Kar azon kollégáit, akik hozzájárultak tudományos munkám megvalósításához. Végül, de nem utolsó sorban köszönettel tartozom Családomnak azért a támogatásért, amivel lehetővé tették a tézisfüzetben vázolt szakmai-tudományos tevékenység elvégzését.

7. Tézisek alapjául szolgáló publikációk

- [S1] Bányai, T. GIS based run-time evaluation of supply chain processes. In: Car, Griesebner and Strobl (eds.) *Geospatial Crossroads @ GI_Forum '09 - Proceedings of the Geoinformatics Forum Salzburg*. Herbert Wichmann Verlag im Verlag VDE GmbH. 2009. pp.1-10
- [S2] Bányai, T. Optimisation of multi-level supply chain of automatised production systems with harmony search algorithm. *Advanced Logistic Systems: Theory and Practice* 2011, 5:13-18.
- [S3] Bányai, T. Just-in-sequence ellátási stratégiák. *Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye* 2013, 3:141-152
- [S4] Bányai, T. Build to sequence supply. *Advanced Logistic Systems: Theory and Practice* 2013, 7(2):35-40.
- [S5] Bányai, T., Illés, B., Gubán, M., Gubán, Á., Schenk, F., Bányai, Á. Optimization of Just-In-Sequence Supply: A Flower Pollination Algorithm-Based Approach. *Sustainability*. 2019, 11(14):3850. doi:10.3390/su11143850.
- [S6] Bányai, T. Planung von mobilen Robotersystemen. *Magdeburger Schriften zur Logistik* 2003, 13:51-60
- [S7] Bányai, Á., Illés, B., Glistau, E., Machado, N.I.C., Tamás, P., Manzoor, F., Bányai, T. Smart Cyber-Physical Manufacturing: Extended and Real-Time Optimization of Logistics Resources in Matrix Production. *Applied Sciences* 2019, 9(7):1287. doi:10.3390/app9071287
- [S8] Bányai, T., Telek, P., Landschützer, C.: Milkrun based in-plant supply – An automotive approach. *Lecture Notes in Mechanical Engineering* 2018, 2:170-185. doi:10.1007/978-3-319-75677-6_14
- [S9] Bányai, T. Logistical analysis of lifecycle of virtual enterprises. In: Totic, S B (szerk.) *Proceedings of the XVII International Conference on Material Flow, Machines and Devices in Industry* Belgrád, Szerbia: Belgrade University, Mechanical Engineering Faculty, (2002) pp. 3.1-3.5.
- [S10] Bányai, T.: *Logisztikai folyamatok*. Budapesti Gazdasági Főiskola, 2014. www.tankonyvtar.hu
- [S11] Bányai T. Economic aspects of decision making in production processes with uncertain component quality. *Inzinerine Ekonomika – Engineering Economics* 2019, 30(1):4-13. doi:10.5755/j01.ee.30.1.19324.
- [S12] Bányai, T. Environmental improvement from the point of view EU practice – closed loop economy. *European Integration Studies* 2003, 1:155-162
- [S13] Bányai, T. Recycling and networking In: *Set of Summaries and Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Engineering Design*. Prague, Csehország. Process Engineering Publisher, 2003. Paper 0134
- [S14] Bányai, T. Optimisation of a multi-product green supply chain model with harmony search. In: Katalinic, B. (ed.) *DAAAM International Scientific Book*. DAAAM International – Wien, 2011, pp.15-30
- [S15] Bányai, T., Tamás, P., Illés, B., Stankevičiūtė, Ž., Bányai, Á.: Optimization of municipal waste collection routing: impact of Industry 4.0 technologies on environmental awareness and sustainability. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2019, 16(4):634; doi:10.3390/ijerph16040634

- [S16] Bányai, T. Ellátási lánc valós idejű optimalizálása *Repüléstudományi közlemények* 2009, 2: Paper 002)
- [S17] Bányai T. Supply chain optimization of outsourced blending technologies. *Journal of Applied Economic Sciences*. 2017, 12(4):960-976.
- [S18] Bányai, T. Real-time decision making in first mile and last mile logistics: How smart scheduling affects energy efficiency of hyperconnected supply chain solutions. *Energies* 2018, 11(7):1833. doi:10.3390/en11071833.

8. Hivatkozások a tézisfüzetben

- [1] Benkő, J. Logisztikai rendszerek. Szent István Egyetemi Kiadó. 2014
- [2] Monostori, L. Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. *Procedia CIRP* 2014, 17:9-13
- [3] Kulcsár, B. Ipari logisztika. LSI Oktatóközpont, 1998
- [4] Cselényi, J. Logisztikai menedzsment I-II. Miskolci Egyetem, 1997
- [5] Kovács, Z., Szabó, L., Patóné Szűcs, B. Characteristics of logistics service providers and their services. *Studia Universitatis Baes-Bolyai Oeconomica* 2016, 61(1):62-79
- [6] Illés, B. Investigation of mathematical model for quality assurance logistics In: Martin, O. Zheng, X. (eds.) Latest trends on engineering mechanics, structures, engineering geology. 3rd WSEAS International Conference on Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology. Corfu, Görögország. WSEAS Press, 2010, pp. 337-342
- [7] Rushton, A., Croucher, P., Baker, P., Oxley, J. The Handbook of Logistics and Distribution Management. Kogan Page Ltd, 2006
- [8] Vogel-Heuser, B., Bauernhansl, T., ten Hompel, M. Handbuch Industrie 4.0 Bd.1: Produktion. Springer Vieweg, 2016
- [9] Cselényi, J.; Illés B. Logisztikai rendszerek. Miskolci Egyetem 2006
- [10] Werner, S., Kellner, M., Schenk, E., Weigert, G.: Just-in-sequence material supply – a simulation based solution in electronic production. *Robotics and Computer Integrated manufacturing* 2003, 19(1-2):107-111. doi: 10.1016/S0736-5845(02)00067-4
- [11] Hüttmeir, A., de Treville, S., van Ackere, A., Monnier, L., Prenninger, J.: Trading off between heijunka and just-in-sequence. *International Journal of Production Economics* 2009, 118(2):501-507. doi: 10.1016/j.ijpe.2008.12.
- [12] Elmoselhy, A. M. S.: Hybrid lean-agile manufacturing system technical facet, in automotive sector. *Journal of Manufacturing Systems* 2013, 32(4):598-619. doi: 10.1016/j.jmsy.2013.05.011
- [13] Bányai, Á., Cselényi, J.: Optimierungsmethode zur Planung von JIT-Zulieferersystemen. *Magdeburger Schriften zur Logistik* 2003, 13(1):17-26.
- [14] Pheng, L. S., Shang, G.: The application of the just-in-time philosophy in the Chinese construction industry. *Journal of Construction in Developing Countries* 2011, 16(1):91-111.
- [15] Szegedi, Z., Gabriel, M., Papp, I. Green supply chain awareness in the Hungarian automotive industry. *Polish Journal of Management Studies* 2017, 6(1):259-268
- [16] Abdel-Basset, M.; Shawky, L.A. Flower pollination algorithm: A comprehensive review. *Artificial Intelligence Review* 2018, 52:2533-2557. doi:10.1007/s10462-018-9624-4.
- [17] Véha, A. Innovációs újdonságok a digitalizálódó malomiparban. Agroinform Média Kft., 2018
- [18] Watson R. Jump Starting Digital Transformation in Manufacturing. Forrás: <https://www.manufacturingglobal.com> (letöltve: 2019.02.08.)
- [19] Bohács, G., Kovács, G., Rinkács, A. Production Logistics Simulation Supported by Process Description Languages. *Management and Production Engineering Review* 2016, 7(1):13-20
- [20] Baldea, M.; Edgar, T.F.; Stanley, B.L.; Kiss, A.A. Modular manufacturing processes: Status, challenges, and opportunities. *Aiche Journal* 2017, 63:4262–4272. doi:10.1002/aic.15872.

- [21] Fang, C.C.; Lai, M.H.; Huang, Y.S. Production planning of new and remanufacturing products in hybrid production systems. *Computers and Industrial Engineering* 2017, 108:88–99. doi:10.1016/j.cie.2017.04.015.
- [22] Gou, L.; Luh, P.B.; Kyoya, Y. Holonic manufacturing scheduling: Architecture, cooperation mechanism, and implementation. *Computers in Industry* 1998, 37:213–231. doi:10.1016/S0166-3615(98)00100-6.
- [23] Zhou, Q.; Souben, P.; Besant, C.B. An information management system for production planning in virtual enterprises. *Computers and Industrial Engineering* 1998, 5:153–156. doi:10.1016/S0360-8352(98)00044-8.
- [24] Matrix Production: An Example for Industrie 4.0. Available online: <https://www.kuka.com/en-de/industries/solutions-database/2016/10/matrix-production> (letöltve 2018.10.11.)
- [25] World Nuclear Association. Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources; World Nuclear Association: London, UK, 2011; pp. 1–12.
- [26] Kilic, H.S., Durmusoglu, M.B., Baskak, M.: Classification and modeling for in-plant milk-run distribution systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2012, 62(9-12):1135-1146. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3875-4>
- [27] Satoh, I.: A formal approach for milk-run transport logistics. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences* 2008, E91-A(11):3261-3268.
- [28] Földesi, P., Németh, P. Efficient Control of Logistic Processes Using Multi-criteria Performance Measurement. *Acta Technica Jaurinensis* 2009, 2(3):353-360
- [29] Aghdaie, M. H., Zolfani, S. H., Zavadskas, E. K. Decision making in machine tool selection: an integrated approach with SWARA and COPRAS-G methods. *Inzinerine Ekonomika–Engineering Economics* 2013, 24(1):5-17. doi:10.5755/j01.ee.24.1.2822.
- [30] Ervural, B.Ç., Ervural, B., Kabak, Ö. A Group Decision Making Approach for the Evaluation of Flexible Manufacturing Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, 49(12):1329-1334. doi:10.1016/j.ifacol.2016.07.708.
- [31] Illés, B., Glistau, E., Machado, N.I.C. Logisztika és minőségmenezsment. Miskolc, 2007
- [32] Winston, W. L. Operations Research. Applications and Algorithms. Duxbury Press 1994
- [33] Mang, B., István, Zs., Murvai, J., Csizmadia, L., Tóth, A. A tiszta technológiák és környezeti biztonsági rendszerek fejlesztése és bevezetése. In: Angyal, Ádám - A természeti környezet vezetési kihívásai: Magyarország az ezredfordulón: MTA stratégiai kutatási programok: EU - csatlakozásunk környezeti szempontú vizsgálata. Budapesti Közgazdaságtudományi és Államigazgatási Egyetem, (1998) p. 52
- [34] Cselényi, J., Bányai, Á., Bányai, T., Mang, B., Telek, P. Optimisation problems of multi-level collection systems of recycling processes. In: Juraj, Sinay (szerk.) Proceedings of the Logistika 2000 Conference Košice, Szlovákia: Technical University of Kosice, (2000) pp. 7-12.
- [35] Johansson, O.M. The effect of dynamic scheduling and routing in a solid waste management system. *Waste Management* 2006, 26(8):875–885. doi: 10.1016/j.wasman.2005.09.004.
- [36] Elia, V.; Gnani, M.G.; Tornese, F. Improving logistic efficiency of WEEE collection through dynamic scheduling using simulation modeling. *Waste Management* 2018, 72:78–86. doi: 10.1016/j.wasman.2017.11.016.
- [37] Edwards, J.B., McKinnon, A.C., Cullinane, S.L. Comparative analysis of the carbon footprints of conventional and online retailing A "last mile" perspective. *International*

- Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 2010, 40(1-2):103-123.
doi:10.1108/09600031011018055
- [38] Illés, B., Ladányi, R., Sárközi, G. Periodic timetable optimization in the public road transport services. *Advanced Logistic Systems: Theory and Practice* 2009, 3:209-226.
- [39] Illés, B., Hardai, I., Bányainé Tóth, Á. Efficiency improvement of manufacturing and logistic processes in industry 4.0 environment. In: Michael, Schenk (szerk.) 12th International Doctoral Students Workshop on Logistics. Magdeburg, Németország: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, (2019) pp. 1-6.
- [40] Shen, Y., Zhang, H.M., Zhao, J.H. Integrating shared autonomous vehicle in public transportation system: A supply-side simulation of the first-mile service in Singapore. *Transportation Research Part A-Policy and Practice* 2018, 113:125-136.
doi:10.1016/j.tra.2018.04.004
- [41] Balcik, B., Beamon, B.M., Smilowitz, K. Last mile distribution in humanitarian relief. *Journal of Intelligent Transportation Systems* 2008, 12(2):51-63.
doi:10.1080/15472450802023 329