

A Miskolci Egyetem Habilitációs Füzetek



MISKOLCI
EGYETEM
UNIVERSITY OF MISKOLC

LOGISZTIKAI RENDSZEREK TERVEZÉSE

Tudományos munkásság áttekintő összefoglalása

Készítette

Dr. Bányainé Dr. Tóth Ágota Anikó

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

Miskolc
2022

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	4
2. Kutatási eredmények a PhD fokozat megszerzése óta.....	5
2.1 Karbantartási stratégia optimalizálása digitális iker technológia támogatásával.....	7
2.2 Humán erőforrás, mint logisztikai erőforrás struktúrájának optimalizálása.....	20
2.3 Konzignációs raktárak szerepe az ellátási láncban.....	33
2.4 Anyagellátás hatékonyságának fokozása cross-docking révén	44
2.5 Keverési technológiák logisztikai szempontú optimalizálása	54
3. Összefoglalás.....	62
4. Summary	64
5. Kutatási eredmények hatása, jövőbeli tervek.....	65
6. Köszönetnyilvánítás	67
7. Kutatási témákhoz kapcsolódó fontosabb saját publikációk	68
8. Felhasznált szakirodalom	70

1. Bevezetés

PhD értekezésemet „A „just-in-time” beszállítási rendszer tervezési módszerei” címmel készítettem és védtem meg 1999-ben. A PhD fokozat megszerzése óta eltelt 23 évben kutatómunkám során főként a beszerzési és elosztási rendszerek tervezési és irányítási kérdéseivel foglalkoztam. E kutatási terület műveléséhez szükséges szakmai ismereteket Cselényi József és Illés Béla professzor urak vezetése alatt szerezhettem meg több évtizedes oktatási és kutatás-fejlesztési tevékenységem során a Logisztikai Intézet kollektívájának körében. Kutatási tevékenységemet az elmúlt több mint két évtizedben a Miskolci Egyetem más intézetei is támogatták. A Logisztikai Intézet hazai és nemzetközi kapcsolatai is nagymértékben hozzájárultak szakmai fejlődésemhez, a téziszűzetben tárgyalt kutatási területekhez kapcsolódóan számos hazai és nemzetközi intézményeket tömörítő kutatásnak lehettem aktív részese. Ezen kapcsolatok közül szeretném kiemelni hazai részről Kulcsár Béla professzor úr szakmai támogatását, aki a Budapesti Műszaki Egyetem Építő- és Anyagmozgató Gépek Tanszékének akkori vezetőjeként hasznos tanácsaival segítette munkámat, illetve nemzetközi részről Dietrich Ziems professzor úr szakmai támogatását, aki a Magdeburgi Otto-von-Guericke Egyetem részéről, valamint Reinhardt Jünemann professzor urat, aki a Dortmundi Műszaki Egyetem részéről több alkalommal is lehetőséget biztosított számomra szakmai ismereteim bővítésére.

Kutatási tevékenységem megkezdésekor már tapasztalhatók voltak a beszerzési és elosztási folyamatokat érintő globalizációs hatások, melyek a pandémia időszakában, a negyedik ipari forradalom keretei között felerősödve egyre inkább előtérbe kerültek. Ennek legfőbb oka, hogy a hagyományos rendszerek egyre inkább átalakulnak olyan kiberfizikai rendszerekké, melyekben az együttműködés képezi a költséghatékony logisztikai megoldások kulcsát.

Kutatómunkám célja az elmúlt több mint 20 évben olyan tervezési és irányítási modellek és módszerek kidolgozása volt, melyek révén fokozható a beszerzési és elosztási folyamatok hatékonysága. Kitűzött céljaim között az is szerepelt, hogy ezen hatékonyságnövelés ne csupán az érintett funkcionális területen éreztesse hatását, hanem legyen pozitív hatással a teljes ellátási lánc működésére. Ennek érdekében kutatómunkám során érintettem olyan területeket is, melyek közvetlenül kapcsolódnak a beszerzési és elosztási rendszerek működéséhez. Jelen téziszűzetben ezen kutatási területekre fókuszálva mutatom be legfontosabb eredményeimet.

2. Kutatási eredmények a PhD fokozat megszerzése óta

Az egyre diverzifikáltabbá váló vásárlói igények olyan versenyhelyzetbe kényszerítik a piaci szereplőket, melyben a fennmaradás és a gazdaságos működés elengedhetetlen feltételévé válik a teljes ellátási lánc optimális kialakítása. Egyre fontosabb szerep jut az alaptevékenységhez kapcsolódó folyamatok optimális kialakításának és működtetésének, hiszen például egy termelővállalat esetében a hatékonyságot jelentős mértékben befolyásolják a termeléssel szoros kapcsolatban lévő beszerzési és elosztási folyamatok. A negyedik ipari forradalom ezt a tendenciát tovább erősítette azáltal, hogy az ellátási láncok, logisztikai hálózatok összetettsége folyamatosan fokozódik, s így egy részfolyamat egyre tágabb környezetében befolyásolja a hatékony működést. Tudományos munkásságomat jelen tézisfüzetben öt olyan súlyponti terület bemutatásán keresztül szeretném felvázolni, melyek áttekintést adnak a beszerzési, termelési és elosztási logisztikai folyamatok területén végzett kutatási eredményeimről.

A vásárlói igényeknek megfelelő termék és szolgáltatás minőségének kulcsa a termelési és szolgáltatási, valamint ahhoz kapcsolódó folyamatok minőségében rejlik. A folyamatok minőségének egyik fontos feltétele olyan karbantartási stratégia kidolgozása, mely segítségével költséghatékony lehet a megfelelő minőségű termelési és szolgáltatási tevékenység ellátása [S1]. A karbantartási folyamatok hatékonyságát nagymértékben befolyásolja az alkalmazott karbantartási stratégia, melyre jelentős hatással van a karbantartás tárgya. A karbantartási logisztika területén végzett kutatásaim közül jelen tézisfüzetben egy olyan valós idejű optimalizálási módszert mutatok be, mely az Ipar 4.0 technológiákra támaszkodva alkalmas egy adott termelési vagy szolgáltatási folyamat karbantartási stratégiájának valós idejű optimalizálására [S2, S3].

A termelő és szolgáltató vállalatok esetében központi kérdés a rendelkezésre álló erőforrásokkal való hatékony gazdálkodás [S4], mely a technológiai, logisztikai és pénzügyi erőforrások mellett különösen igaz a humán erőforrások esetében. Mivel az optimális humán erőforrás struktúra kialakítása, fenntartása és rugalmas kezelése alapfeltétele a dinamikusan változó piaci környezetben lévő értékteremtő folyamatok hatékony működtetésének, ezért egyre nagyobb az igény olyan modellek és módszerek kidolgozására, melyek révén egy optimális humán erőforrás létszám és struktúra alakítható ki és tartható fenn. A termelési és logisztikai erőforrások működtetését végző humán erőforrások dinamikusan változó környezetben történő optimális kialakításával kapcsolatos kutatásaim

közül egy olyan területet mutatok be jelen téziszűzetben, melynek célja egy elnyelő Markov-láncon alapuló szimulációs módszer segítségével annak a vizsgálata, hogy a humán erőforrás fejlesztési stratégiák hogyan befolyásolják egy vállalat jövőbeli humán erőforrás struktúráját [S5-S7].

A beszerzési logisztika területén végzett kutatásaim közül két olyan terület ismertetek a téziszűzetben, melyek révén a hagyományos ellátási folyamatok hatékonysága jelentős mértékben javítható [S8,S9]. Az egyik ilyen kutatási terület a konszignációs szerződések és konszignációs raktáron alapuló beszállítói megoldások vizsgálata. Ezen kutatási terület fontosságát az indokolja, hogy célszerű egy olyan beszállítói stratégiát kidolgozni, mely mindkét szerződő fél számára előnyöket nyújt. A téziszűzetben bemutatásra kerül egy olyan döntéstámogató módszer, melynek alkalmazásával meghatározhatók azok a működési paraméterek, amelyek mindkét fél számára előnyös üzleti kapcsolat megvalósítását teszik lehetővé [S10]. A másik ilyen terület a cross-docking létesítményen keresztül történő többszintű ellátás előnyeinek feltárása és bemutatása, különös tekintettel a just-in-sequence beszállítás esetére [S11,S12]. A kutatási téma választását alapvetően az a tény indokolja, hogy mind az autóiparban, mind a mechatronikai összeszerelő iparban egyre nagyobb szerep jut a just-in-time beszállítás mellett az igények sorrendjét is figyelembe vevő just-in-sequence beszállításnak, mely egy sok beszállítóval rendelkező ellátási lánc esetében komoly tervezést igényel a költséghatékony működés biztosítása érdekében. A téziszűzetben bemutatásra kerül egy cross-docking ellátási rendszer modellje és annak matematikai leírása, melynek segítségével elvégezhető az anyagellátás folyamatának optimális kialakítása [S13].

Az ötödik kutatási terület, melynek eredményeit jelen téziszűzetben összefoglalom, a keverési technológiák logisztikai szempontokat is figyelembe vevő optimalizálását célozza meg [S14,S15]. A bemutatásra kerülő optimalizálási módszer segítségével a keverési technológiák hagyományos, technológiai paraméterekre fókuszáló optimalizálása helyett egy olyan módszer kerül bemutatásra, melynek segítségével a technológiai és logisztikai paraméterek együttes optimalizálása végezhető el [S16].

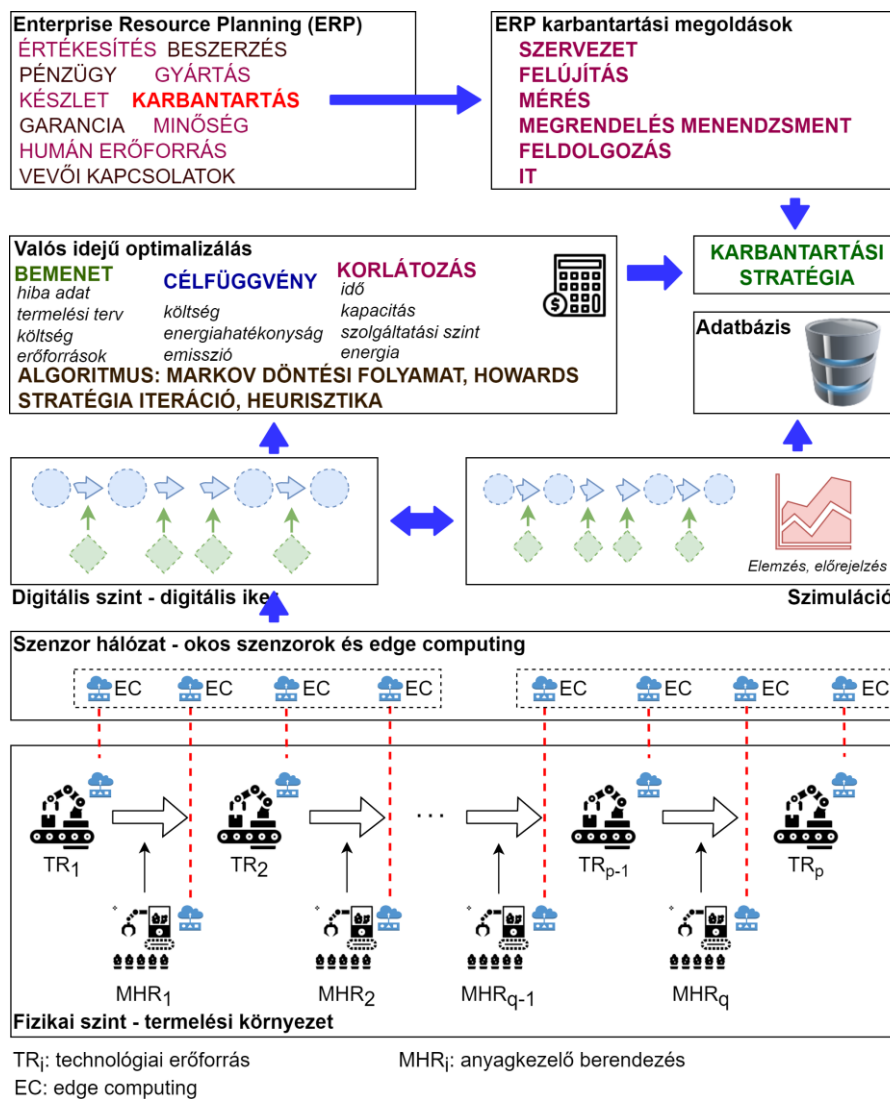
Kutatási eredményeim szorosan kapcsolódtak a Logisztikai Intézetben folyó kutatás-fejlesztési munkákhoz és fontos részét képezték a beszerzési logisztikai rendszerek tervezése szakmai műhely kialakításának. A kutatások szorosan kötődtek intézeti és egyetemi OTKA, valamint TÁMOP kutatási projektekhez, ipari megbízások megvalósításához és nemzetközi TEMPUS, INCO-COPERNICUS és H2020 projektekhez.

2.1 Karbantartási stratégia optimalizálása digitális iker technológia támogatásával

A negyedik ipari forradalom hatása jelentős mennyiségi és minőségi változásokat eredményezett a termelési rendszerekben. Ezek a változások azonban nem csupán a termelési folyamatokat érintik, hanem a működésükhöz kapcsolódó egyéb fontos tevékenységeket is, mint például a beszerzést, az elosztást és a karbantartást. Komplex rendszerek esetében a tervezési feladatok megvalósítása integrált megközelítést igényel [1], amellyel mind a beruházási, mind az üzemeltetési költségek csökkenthetők, miközben a rendszer pénzügyi, műszaki és környezeti fenntarthatósága biztosítható. Ezen fenntarthatóságnak fontos eleme az optimális karbantartási stratégia. Statisztikai felmérések mutatják, hogy a karbantartás legfőbb okai a következők: 34%-ban a berendezések előregedése, 20%-ban a berendezések mechanikai meghibásodása, 11%-ban emberi és üzemeltetési hiba, 9%-ban a karbantartásra szánt idő hiánya, 8%-ban pedig a műszaki és logisztikai erőforrások rossz tervezése [2]. Ezek a tervezett termelési tevékenység megvalósíthatósága mellett befolyásolják a termelési rendszerek energiafogyasztását is. A termelési rendszerek optimális működtetése érdekében olyan karbantartási politika kialakítása szükséges, mely alkalmas a technológiai és kapcsolódó logisztikai erőforrások költség- és időhatékony karbantartásának megvalósítására [3,4]. A negyedik ipari forradalom lehetőséget ad arra, hogy a hagyományos karbantartási politikákat digitális környezetbe áthelyezve egy olyan karbantartási folyamatot valósítsunk meg kiberfizikai termelési környezetben, ahol a digitális iker alapú szimuláció lehetővé teszi a termelési rendszerek üzemeltetésének és karbantartásának optimalizálását, mivel a karbantartási politikák hatása diszkrét eseményszimulációval validálható [5]. A Miskolci Egyetem Logisztikai Intézetében a karbantartási tevékenységek logisztikai vonatkozásainak tekintetében Illés Béla professzor úr végzett jelentős kutatási és publikációs tevékenységet. Ezen kutatási tevékenységbe bekapcsolódva vettem részt egy olyan kutatásban, melynek célja az alvállalkozókra épülő, hálózatszerű karbantartási, beruházási, hálózatépítési, tevékenységek beszerzési logisztikai rendszeréhez kapcsolódó működtetési stratégiák és azok matematikai modelljeinek kidolgozása volt [S1]. A negyedik ipari forradalom olyan új perspektívákat nyitott a karbantartási folyamatok optimalizálása területén [6,7], melyeket figyelembe véve dolgoztam ki a karbantartási stratégiák kiberfizikai termelési környezetben történő valós idejű optimalizálásának modelljét és módszerét [S2,S3].

Funkcionális modell

Kiberfizikai termelési környezetben a fizikai szintet a technológiai és logisztikai erőforrások képviselik (1. ábra). A valós fizikai folyamatok digitális folyamattá történő transzformálását intelligens szerszámok, gentelligens termékek teszik lehetővé. Az okos szenzorok valós idejű adatokat gyűjtenek a termelési környezetből (technológiai, logisztikai és humán erőforrások hiba és státusz információi) és ezen összegyűjtött és részben feldolgozott információkat a digitális iker számára továbbítják. A digitális iker előállít egy valós idejű modellt a folyamatszimuláció számára. Az ezen valós időben előállított szimulációs modell segítségével elvégezhető a termelési környezetben lévő állapotok előrejelzése, extrapolálása a rendszer, a folyamat, az erőforrások és a termékek szempontjából.



1. ábra A digitális iker alapú karbantartási stratégia optimalizálás funkcionális modellje [S2]

A valós termelési környezet digitális másolata a fizikai rendszerből származó valós idejű adatokon, illetve az ERP és MES adatokon alapszik, melyek magukban foglalják a termelési tervet (termelési vezérprogramot), a gyártási anyagszükséglet-tervezésből és a gyártási erőforrástervezésből származó részletes vállalati tevékenységi tervet és egyéb, a gyártási folyamathoz és annak logisztikai kiszolgálásához kapcsolódó adatokat. A karbantartási stratégia optimalizálása az ERP karbantartási modulján alapszik, fókuszálva a kapcsolódó szervezeti, felújítási, mérési és objektum-menedzsment aspektusokra.

A karbantartási folyamat valós idejű optimalizálása előrejelzési és extrapolációs scenáriókon alapszik és figyelembe veszi az ERP és MES karbantartási modulja által definiált alap karbantartási stratégiát.

Matematikai modell

A karbantartási stratégia optimalizálása alapvetően két fő fázisra bontható fel. Az első fázis a kiinduló karbantartási stratégia optimalizálása Markov döntési folyamat, Howard iterációs módszere és értékmeghatározó egyenletek segítségével. A második fázis a valós idejű optimalizálás, mely értékmeghatározó egyenleteken és evolúciós heurisztikán alapszik (2. ábra).

A karbantartási folyamat optimalizálása az alábbi főbb lépésekből áll:

1. Erőforrások állapotának és a lehetséges karbantartási műveleteknek a meghatározása.
2. Markov döntési folyamat meghatározása.
3. Az értékmeghatározó egyenletek segítségével a diszkontált jutalmon alapuló célfüggvény meghatározása.
4. Energia-, idő-, emisszió- és kapacitásalapú korlátozások definiálása.
5. Az optimális kiinduló karbantartási stratégia meghatározása Howard iterációs módszerével.
6. A kiinduló karbantartási stratégia értékelése a diszkontált nyereség, az energiafelhasználás, és a károsanyag-kibocsátás szempontjából.

A matematikai modellben alkalmazott jelöléseket az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat Jelölések

Jelölés	Magyarázat
s_i	a termelési környezet erőforrásainak lehetséges állapota, $i = 1 \dots z$
d_j	potenciális karbantartási műveletek, $j = 1 \dots r$
Λ	átmeneti valószínűségi mátrix, $\Lambda = [\lambda_{if}]$ ahol λ_{if} az átmeneti valószínűség s_i állapotból s_f állapotba

Jelölés	Magyarázat
$p(s_f s_i, d_j)$	annak a valószínűsége, hogy a termelési környezet állapota egy j. karbantartási művelet eredményeként i. állapotból f. állapotba kerül
$\zeta_{s_i, d_j(s_i)}$	várható bevétel a termelési környezet i. állapota esetén j. karbantartási műveletet alkalmazva
$\gamma_\delta(s_i)$	várható diszkontált bevétel, ha az első időszak elején i. állapotban van a termelési környezet és a stacionárius stratégia δ
ϑ	diszkontált bevétel paramétere $0 < \vartheta < 1$
Θ	Howard iterációs módszer paramétere
$\zeta_{i,j}$	bevétel a termelési környezet állapotának (i) és az alkalmazott karbantartási műveletnek (j) a függvényében
ζ^I	bevétel kiindulási értéke
ζ_i^{OPER}	energiafelhasználásból származó költség a termelési környezet i. állapota esetén
ζ_j^{MAINT}	energiafelhasználásból származó költség a j. karbantartási művelet alkalmazása esetén
$LCoE$	energiaelőállítás költsége
IE_τ	beruházási költség a τ . időablakban
OME_τ	működtetési és karbantartási költség a τ . időablakban
EGR_τ	előállított energia mennyisége a τ . időablakban
τ^*	energiát előállító rendszer várható élettartama

A gyártási és logisztikai erőforrások viselkedése egy gyártórendszerben a véletlenszerű folyamatok széles skálájával írható le: Gauss-, Poisson-, autoregresszív vagy Markov-folyamatok. A diszkrét idejű sztochasztikus folyamatok esetében a viselkedés leírására alkalmas a Markov-folyamat, mely állapotok diszkrét sorozatát tartalmazza, amelyek mindegyike egy diszkrét véges állapottérből generálódik. Az erőforrások lehetséges állapotai és a lehetséges karbantartási műveletek a véges állapottér diszkrét halmazaiként definiálhatók:

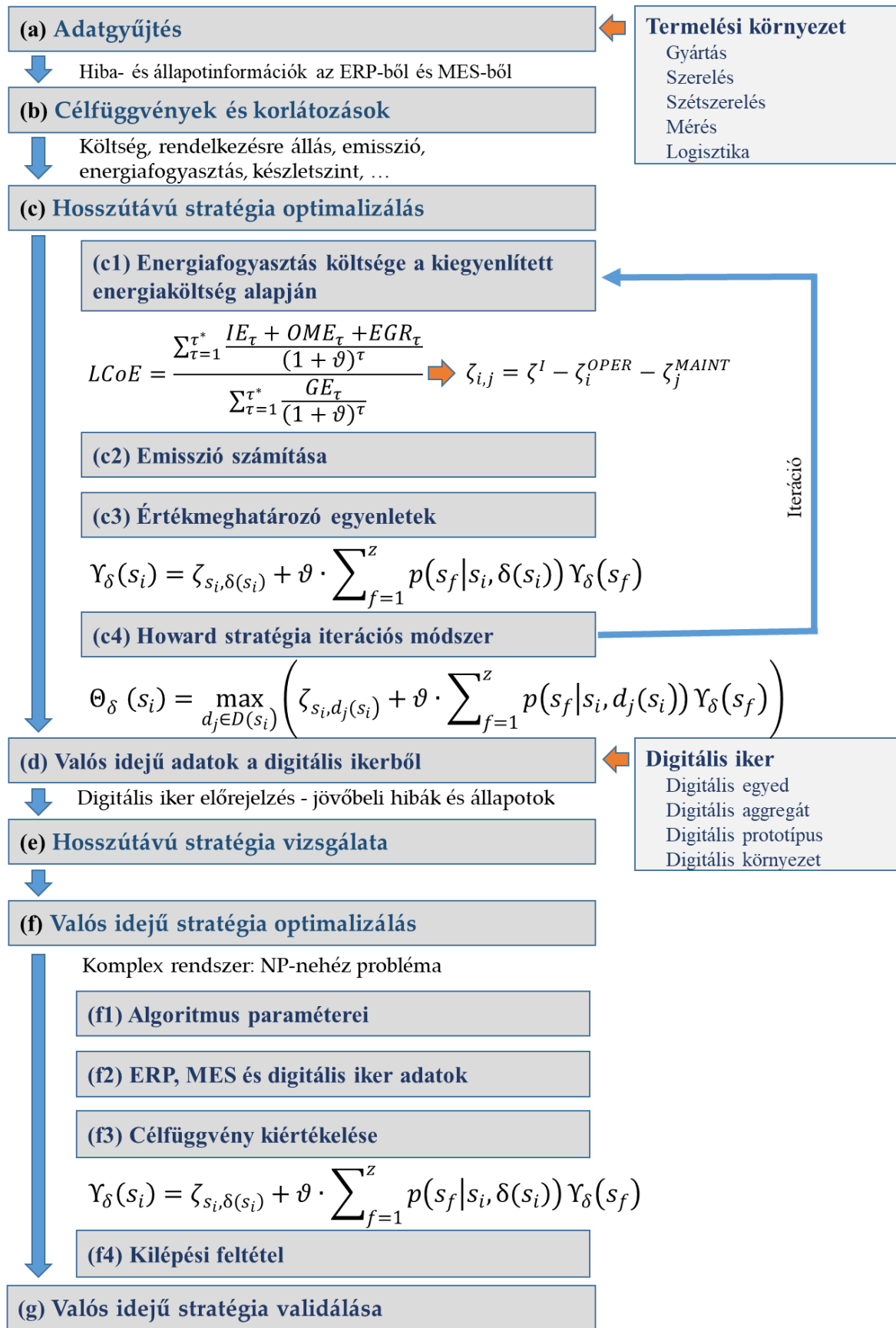
$$S = (s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_z) \text{ és } D = (d_1, d_2, \dots, d_j, \dots, d_r) \quad (1.1)$$

Az erőforrások viselkedése egy kezdeti valószínűségi eloszláson és egy átmeneti valószínűségen alapul, amely az állapotváltozások valószínűségi dinamikáját jellemzi:

$$p(s_f | s_i, d_j) \in \Lambda \quad (1.2)$$

A karbantartási politika optimalizálási célfüggvénye a diszkontált nyereség, amely érték meghatározó egyenleteken alapul, és amelyet számos tényező befolyásol, beleértve a karbantartás és üzemeltetés energiafogyasztását is:

$$\gamma_\delta(s_i) = \zeta_{s_i, \delta(s_i)} + \vartheta \cdot \sum_{f=1}^z p(s_f | s_i, \delta(s_i)) \gamma_\delta(s_f) \quad (1.3)$$



2. ábra A digitális iker alapú valós idejű karbantartási stratégia optimalizálás folyamata [S2]

Howard iterációs módszere egy Θ paraméter számításán alapszik:

$$\Theta_{\delta}(s_i) = \max_{d_j \in D(s_i)} \left(\zeta_{s_i, d_j(s_i)} + \vartheta \cdot \sum_{f=1}^Z p(s_f | s_i, d_j(s_i)) \gamma_{\delta}(s_f) \right) \quad (1.4)$$

A Θ paraméter alapján az optimális karbantartási stratégia az alábbi döntéssel határozható meg:

$$\forall s_i: \Theta_{\delta}(s_i) = \gamma_{\delta}(s_i) \rightarrow \delta \text{ optimális stratégia} \quad (1.5)$$

Az energiafogyasztást integrálhatjuk a diszkontált nyereségalapú célfüggvénybe, mivel a gyártórendszer kezdeti nyereségét csökkenthetjük az üzemeltetési és karbantartási költségek energiafogyasztási költségeivel:

$$\zeta_{s_i, \delta(s_i)} = \zeta^I - \zeta_{s_i}^{OPER} - \zeta_{\delta(s_i)}^{MAINT} \quad (1.6)$$

Az üzemeltetés és karbantartás energiafogyasztásának költségei a kiegyenlített energiaköltségek segítségével számíthatók ki:

$$LCoE = \frac{\sum_{t=1}^{T^*} \frac{IE_t + OME_t + EGR_t}{(1+\vartheta)^t}}{\sum_{t=1}^{T^*} \frac{GE_t}{(1+\vartheta)^t}} \quad (1.7)$$

Az optimalizációs algoritmus második fázisa a valós idejű optimalizálás. Ha az üzemeltetés és karbantartás paraméterei megváltoznak, a kezdeti statikus karbantartási politikát felül kell vizsgálni, és új karbantartási politikát kell meghatározni a digitális ikerrel támogatott diszkrét eseményszimuláció helyzetelemzéséből származó valós idejű adatok és előrejelzési információk felhasználásával. A karbantartási politika valós idejű optimalizálása a következő fő lépéseket foglalja magába:

1. Adatgyűjtés a digitális ikerből, a diszkrét eseményszimuláció, az ERP és a MES helyzetelemzésének eredményeiből.
2. Az evolúciós optimalizációs algoritmus paramétereinek meghatározása.
3. Az állapotter meghatározása.
4. Az új karbantartási politika kiszámítása valós idejű adatok alapján.
5. A valós idejű karbantartási politika értékelése a diszkontált nyereség, az energiafogyasztás és a károsanyag-kibocsátás szempontjából.

Esettanulmány

Jelen fejezet célja egy olyan esettanulmány bemutatása, melynek révén demonstrálható a fentiekben ismertetett többfázisú karbantartási stratégia optimalizáló módszer, mely Howard iterációs módszerén alapszik. A bemutatásra kerülő esettanulmányban a vizsgált rendszernek öt különböző állapota

definiálható (kiváló, jó, átlagos, gyenge, rossz), melyet ezen állapotok halmazaként az alábbiak szerint definiálhatunk:

$$S = (K, J, A, GY, R) \quad (1.8)$$

A döntések halmaza a karbantartások négy szintjét definiálja (nincs karbantartás, 1., 2. és 3. szintű karbantartás):

$$D = (N, L_1, L_2, L_3). \quad (1.9)$$

Mivel a rendszer jövőbeli állapota a jelenlegi állapot függvényében írható fel, ezért definiálhatunk átmeneti valószínűségeket a Markov döntési folyamat átmeneti valószínűségi mátrixaként:

$$\begin{aligned} \gamma_{K \rightarrow K} &= 0.6, \gamma_{K \rightarrow J} = 0.3, \gamma_{K \rightarrow A} = 0.1, \gamma_{J \rightarrow J} = 0.7, \gamma_{J \rightarrow A} = 0.25, \gamma_{J \rightarrow GY} = 0.05, \\ \gamma_{A \rightarrow A} &= 0.7, \gamma_{A \rightarrow GY} = 0.2, \gamma_{A \rightarrow R} = 0.1, \gamma_{GY \rightarrow GY} = 0.65, \gamma_{GY \rightarrow R} = 0.35, \gamma_{R \rightarrow R} = 1.00 \end{aligned} \quad (1.10)$$

Miután a rendszer aktuális állapotában végrehajtásra kerül egy kiválasztott karbantartás, annak az átmeneti valószínűsége, hogy a rendszer egy K állapotból egy másik állapotba kerül, az alábbiak szerint írható fel:

$$p(K|J, L_1) = p(K|A, L_2) = p(K|GY, L_3) = p(K|R, L_4) = \gamma_{K \rightarrow K} = 0.6 \quad (1.11)$$

$$p(J|J, L_1) = p(J|A, L_2) = p(J|GY, L_3) = p(J|R, L_4) = \gamma_{K \rightarrow J} = 0.3 \quad (1.12)$$

$$p(A|J, L_1) = p(A|A, L_2) = p(A|GY, L_3) = p(A|R, L_4) = \gamma_{K \rightarrow A} = 0.1 \quad (1.13)$$

$$p(GY|J, L_1) = p(GY|A, L_2) = p(GY|GY, L_3) = p(GY|R, L_4) = \gamma_{K \rightarrow GY} = 0 \quad (1.14)$$

$$p(R|J, L_1) = p(R|A, L_2) = p(R|GY, L_3) = p(R|R, L_4) = \gamma_{K \rightarrow R} = 0 \quad (1.15)$$

Miután a rendszer aktuális állapotában végrehajtásra kerül egy kiválasztott karbantartás, annak az átmeneti valószínűsége, hogy a rendszer egy J állapotból egy másik állapotba kerül, az alábbiak szerint írható fel:

$$p(J|A, L_1) = p(J|GY, L_2) = p(J|R, L_3) = \gamma_{J \rightarrow J} = 0.7 \quad (1.16)$$

$$p(A|A, L_1) = p(A|GY, L_2) = p(A|R, L_3) = \gamma_{J \rightarrow A} = 0.25 \quad (1.17)$$

$$p(GY|A, L_1) = p(GY|GY, L_2) = p(GY|R, L_3) = \gamma_{J \rightarrow GY} = 0.05 \quad (1.18)$$

$$p(R|A, L_1) = p(R|GY, L_2) = p(R|R, L_3) = \gamma_{J \rightarrow R} = 0 \quad (1.19)$$

Miután a rendszer aktuális állapotában végrehajtásra kerül egy kiválasztott karbantartás, annak az átmeneti valószínűsége, hogy a rendszer egy A állapotból egy másik állapotba kerül, az alábbiak szerint írható fel:

$$p(A|GY, L_1) = p(A|R, L_2) = \gamma_{A \rightarrow A} = 0.7 \quad (1.20)$$

$$p(GY|GY, L_1) = p(GY|R, L_2) = \gamma_{A \rightarrow GY} = 0.2 \quad (1.21)$$

$$p(R|GY, L_1) = p(R|R, L_2) = \gamma_{A \rightarrow R} = 0.1 \quad (1.22)$$

Miután a rendszer aktuális állapotában végrehajtásra kerül egy kiválasztott karbantartás, annak az átmeneti valószínűsége, hogy a rendszer egy GY állapotból egy másik állapotba kerül, az alábbiak szerint írható fel:

$$p(GY|R, L_1) = \gamma_{GY \rightarrow GY} = 0.65 \quad (1.23)$$

Egy időablakon belül a profitot befolyásolja a gyártási folyamatból származó bevétel, valamint a költségek, melyek tartalmazzák a gyártási és karbantartási műveletek energiafelhasználásának költségeit is:

$$\sigma_{i,j} = \sigma^I - \sigma_i^{EC1} - \sigma_j^{EC2} \quad (1.24)$$

ahol $\sigma_{i,j}$ a rendszerben várható nyereség a rendszer i . állapotához rendelt j . karbantartás esetében, σ^I a rendszerből származó bevétel, σ_i^{EC1} a rendszer energiafelhasználásából származó költség a rendszer i . állapotában, σ_j^{EC2} a j . karbantartás esetében adódó energiafelhasználás költsége.

Ezt felhasználva megadható az egyes gyártási és karbantartási energiaigény és költség alapján az egyes rendszerállapotokhoz és kapcsolódó karbantartási stratégiákhoz tartozó bevétel:

$$\begin{aligned} \sigma_{K,N} &= \sigma^I - \sigma_K^{EC1} - \sigma_N^{EC2} = 300, & \sigma_{J,N} &= \sigma^I - \sigma_J^{EC1} - \sigma_N^{EC2} = 200, \\ \sigma_{A,N} &= \sigma^I - \sigma_A^{EC1} - \sigma_N^{EC2} = 100, & \sigma_{GY,N} &= \sigma^I - \sigma_{GY}^{EC1} - \sigma_N^{EC2} = 20, \\ \sigma_{R,N} &= \sigma^I - \sigma_R^{EC1} - \sigma_N^{EC2} = 10, & \sigma_{J,L1} &= \sigma^I - \sigma_K^{EC1} - \sigma_{L1}^{EC2} = 190, \\ \sigma_{A,L1} &= \sigma^I - \sigma_J^{EC1} - \sigma_{L1}^{EC2} = 90, & \sigma_{GY,L1} &= \sigma^I - \sigma_A^{EC1} - \sigma_{L1}^{EC2} = -10, \\ \sigma_{R,L1} &= \sigma^I - \sigma_{GY}^{EC1} - \sigma_{L1}^{EC2} = -90, & \sigma_{A,L2} &= \sigma^I - \sigma_K^{EC1} - \sigma_{L2}^{EC2} = 170, \\ \sigma_{GY,L2} &= \sigma^I - \sigma_J^{EC1} - \sigma_{L2}^{EC2} = 70, & \sigma_{R,L2} &= \sigma^I - \sigma_A^{EC1} - \sigma_{L2}^{EC2} = -30, \\ \sigma_{GY,L3} &= \sigma^I - \sigma_K^{EC1} - \sigma_{L3}^{EC2} = -100, & \sigma_{R,L3} &= \sigma^I - \sigma_J^{EC1} - \sigma_{L3}^{EC2} = -200 \end{aligned} \quad (1.25)$$

A gyártási és karbantartási folyamat energiafelhasználásából származó költségek számításakor a 2. táblázat és a 3. táblázat adatait vettem figyelembe az esettanulmány során.

2. táblázat Fajlagos energiafelhasználás a gyártási folyamat egy időablakában [MW/időszak]

Rendszer státusza ¹	K	J	A	GY	R
Energiafelhasználás	10.483	12.096	13.709	15.000	15.161

¹ K = kiváló, J = jó, A = átlagos, GY = gyenge, R = rossz.

3. táblázat Fajlagos energiafelhasználás a karbantartási folyamat egy időablakában [MW/időszak]

Karbantartási stratégia ¹	N	L1	L2	L3
Energiafelhasználás	0	1.774	2.096	6.451

¹ N = nincs karbantartás, L1 = 1. szintű karbantartás, L2 = 2. szintű karbantartás, L3 = 3. szintű karbantartás.

A fentiekben vázolt optimalizálási módszer első lépéseként az alapadatok felvételét követően megadható egy kiinduló karbantartási stratégia:

$$S^*(K) = N, S^*(J) = N, S^*(A) = L_1, S^*(GY) = L_1, S^*(R) = L_2, \quad (1.26)$$

ami azt jelenti, hogy K és J státusz esetén nem kerül karbantartás végrehajtásra, A és GY státusz esetében 1. szintű karbantartás kerül végrehajtásra, míg az R státuszhoz 2. szintű karbantartás van rendelve. Az értékmeghatározó egyenletek és a rendszerben várható diszkontált profit az alábbi módon számítható:

$$P^{S^*}(K) = \sigma_{K,N} + \vartheta \cdot (\gamma_{K \rightarrow K} \cdot P^{S^*}(K) + \gamma_{K \rightarrow J} \cdot P^{S^*}(J) + \gamma_{K \rightarrow A} \cdot P^{S^*}(A)) \quad (1.27)$$

$$P^{S^*}(J) = \sigma_{J,N} + \vartheta \cdot (\gamma_{J \rightarrow J} \cdot P^{S^*}(J) + \gamma_{J \rightarrow A} \cdot P^{S^*}(A) + \gamma_{J \rightarrow GY} \cdot P^{S^*}(GY)) \quad (1.28)$$

$$P^{S^*}(A) = \sigma_{A,L_1} + \vartheta \cdot (\gamma_{J \rightarrow J} \cdot P^{S^*}(J) + \gamma_{J \rightarrow A} \cdot P^{S^*}(A) + \gamma_{J \rightarrow GY} \cdot P^{S^*}(GY)) \quad (1.29)$$

$$P^{S^*}(GY) = \sigma_{GY,L_1} + \vartheta \cdot (\gamma_{A \rightarrow A} \cdot P^{S^*}(A) + \gamma_{A \rightarrow GY} \cdot P^{S^*}(GY) + \gamma_{A \rightarrow R} \cdot P^{S^*}(R)) \quad (1.30)$$

$$P^{S^*}(R) = \sigma_{R,L_2} + \vartheta \cdot (\gamma_{A \rightarrow A} \cdot P^{S^*}(A) + \gamma_{A \rightarrow GY} \cdot P^{S^*}(GY) + \gamma_{A \rightarrow R} \cdot P^{S^*}(R)) \quad (1.31)$$

Fenti egyenletrendszert megoldva számítható a várható diszkontált profit értéke a kiinduló karbantartási stratégia esetében:

$$\begin{aligned} P^{S^*}(K) &= 3461.43\text{€}, P^{S^*}(J) = 3154.9\text{€}, P^{S^*}(A) = 3044.9\text{€}, \\ P^{S^*}(GY) &= 2815.33\text{€}, P^{S^*}(R) = 2795.33\text{€} \end{aligned} \quad (1.32)$$

Az értékmeghatározó egyenletek megoldását követően a következő fázisban alkalmazzuk Howard iterációs módszerét, és meghatározzuk a Θ^{S^*} paramétert minden egyes S^* karbantartási stratégiára. Mivel a K státusz esetében nincs szükség karbantartásra, ezért nem szükséges stratégiát módosítani, azaz:

$$\Theta^{S^*}(K) = P^{S^*}(K) \rightarrow S^{**}(K) = S^*(K) = N \quad (1.33)$$

A rendszer J státusza esetében Θ^{S^*} paraméter az alábbi módon határozható meg:

$$\Theta^{S^*}(J) = \max \begin{cases} N: & \sigma_{J,N} + \vartheta \cdot (\gamma_{J \rightarrow J} \cdot P^{S^*}(J) + \gamma_{J \rightarrow A} \cdot P^{S^*}(A) + \gamma_{J \rightarrow GY} \cdot P^{S^*}(GY)) \\ L_1: & \sigma_{J,L_1} + \vartheta \cdot (\gamma_{K \rightarrow K} \cdot P^{S^*}(K) + \gamma_{K \rightarrow J} \cdot P^{S^*}(J) + \gamma_{K \rightarrow A} \cdot P^{S^*}(A)) \end{cases} \quad (1.34)$$

A fenti számításból $\Theta^{S^*}(J) = 3351.43\text{€}$, ami azt jelenti, hogy lehetséges egy jobb karbantartási stratégiát választani a kiinduló stratégiánál a rendszer J státuszához az első iterációs lépésben:

$$\Theta^{S^*}(J) > P^{S^*}(J) \rightarrow S^{**}(J) \neq S^*(J) \rightarrow S^{**}(J) = L_1 \quad (1.35)$$

A rendszer A státusza esetében Θ^{S^*} paraméter az alábbi módon határozható meg:

$$\Theta^{S^*}(A) = \max \begin{cases} N: & \sigma_{A,N} + \vartheta \cdot (\gamma_{A \rightarrow A} \cdot P^{S^*}(A) + \gamma_{A \rightarrow GY} \cdot P^{S^*}(GY) + \gamma_{A \rightarrow R} \cdot P^{S^*}(R)) \\ L_1: & \sigma_{A,L_1} + \vartheta \cdot (\gamma_{J \rightarrow J} \cdot P^{S^*}(J) + \gamma_{J \rightarrow A} \cdot P^{S^*}(A) + \gamma_{J \rightarrow GY} \cdot P^{S^*}(GY)) \\ L_2: & \sigma_{A,L_2} + \vartheta \cdot (\gamma_{K \rightarrow K} \cdot P^{S^*}(K) + \gamma_{K \rightarrow J} \cdot P^{S^*}(J) + \gamma_{K \rightarrow A} \cdot P^{S^*}(A)) \end{cases} \quad (1.36)$$

A fenti számításból $\Theta^{S^*}(A) = 3331.43\text{€}$, ami azt jelenti, hogy lehetséges egy jobb karbantartási stratégiát választani az $S^*(A) = L_1$ kiinduló stratégiánál a rendszer A státuszához az első iterációs lépésben:

$$\Theta^{S^*}(A) > P^{S^*}(A) \rightarrow S^{**}(A) \neq S^*(A) \rightarrow S^{**}(A) = L_2 \quad (1.37)$$

A rendszer GY státusza esetében a Θ^{S^*} paraméter az alábbi módon határozható meg:

$$\Theta^{S^*}(GY) = \max \begin{cases} N: & \sigma_{GY,N} + \vartheta \cdot (\gamma_{GY \rightarrow GY} \cdot P^{S^*}(GY) + \gamma_{GY \rightarrow R} \cdot P^{S^*}(R)) \\ L_1: & \sigma_{GY,L_1} + \vartheta \cdot (\gamma_{A \rightarrow A} \cdot P^{S^*}(A) + \gamma_{A \rightarrow GY} \cdot P^{S^*}(GY) + \gamma_{A \rightarrow R} \cdot P^{S^*}(R)) \\ L_2: & \sigma_{GY,L_2} + \vartheta \cdot (\gamma_{J \rightarrow J} \cdot P^{S^*}(J) + \gamma_{J \rightarrow A} \cdot P^{S^*}(A) + \gamma_{J \rightarrow GY} \cdot P^{S^*}(GY)) \\ L_3: & \sigma_{GY,L_3} + \vartheta \cdot (\gamma_{K \rightarrow K} \cdot P^{S^*}(K) + \gamma_{K \rightarrow J} \cdot P^{S^*}(J) + \gamma_{K \rightarrow A} \cdot P^{S^*}(A)) \end{cases} \quad (1.38)$$

A fenti számításból $\Theta^{S^*}(GY) = 3061.43\text{€}$, ami azt jelenti, hogy lehetséges egy jobb karbantartási stratégiát választani az $S^*(GY) = L_1$ kiinduló stratégiánál a rendszer GY státuszához az első iterációs lépésben:

$$\Theta^{S^*}(GY) > P^{S^*}(GY) \rightarrow S^{**}(GY) \neq S^*(GY) \rightarrow S^{**}(GY) = L_3 \quad (1.39)$$

A rendszer R státusza esetében a Θ^{S^*} paraméter az alábbi módon határozható meg:

$$\Theta^{S^*}(R) = \max \begin{cases} N: & \sigma_{R,N} + \vartheta \cdot P^{S^*}(R) \\ L_1: & \sigma_{R,L_1} + \vartheta \cdot (\gamma_{GY \rightarrow GY} \cdot P^{S^*}(GY) + \gamma_{GY \rightarrow R} \cdot P^{S^*}(R)) \\ L_2: & \sigma_{R,L_2} + \vartheta \cdot (\gamma_{A \rightarrow A} \cdot P^{S^*}(A) + \gamma_{A \rightarrow GY} \cdot P^{S^*}(GY) + \gamma_{A \rightarrow R} \cdot P^{S^*}(R)) \\ L_3: & \sigma_{R,L_3} + \vartheta \cdot (\gamma_{J \rightarrow J} \cdot P^{S^*}(J) + \gamma_{J \rightarrow A} \cdot P^{S^*}(A) + \gamma_{J \rightarrow GY} \cdot P^{S^*}(GY)) \end{cases} \quad (1.40)$$

A fenti számításból $\Theta^{S^*}(R) = 2795.33\text{€}$, ami azt jelenti, hogy nem lehetséges egy jobb karbantartási stratégiát választani az $S^*(R) = L_2$ kiinduló stratégiánál a rendszer R státuszához az első iterációs lépésben:

$$\Theta^{S^*}(R) = P^{S^*}(R) \rightarrow S^{**}(R) = S^*(R) \rightarrow S^{**}(R) = L_2 \quad (1.41)$$

Ezt követően meghatározhatók az új értékmeghatározó egyenletek, melyeket megoldva számítható a várható diszkontált profit a karbantartási stratégiára vonatkozó S^{**} első iterációs lépés:

$$P^{S^{**}}(K) = \sigma_{K,N} + \vartheta \cdot (\gamma_{K \rightarrow K} \cdot P^{S^{**}}(K) + \gamma_{K \rightarrow J} \cdot P^{S^{**}}(J) + \gamma_{K \rightarrow A} \cdot P^{S^{**}}(A)) \quad (1.42)$$

$$P^{S^{**}}(J) = \sigma_{J,L_1} + \vartheta \cdot (\gamma_{K \rightarrow K} \cdot P^{S^{**}}(K) + \gamma_{K \rightarrow J} \cdot P^{S^{**}}(J) + \gamma_{K \rightarrow A} \cdot P^{S^{**}}(A)) \quad (1.43)$$

$$P^{S^{**}}(A) = \sigma_{A,L_2} + \vartheta \cdot (\gamma_{K \rightarrow K} \cdot P^{S^{**}}(K) + \gamma_{K \rightarrow J} \cdot P^{S^{**}}(J) + \gamma_{K \rightarrow A} \cdot P^{S^{**}}(A)) \quad (1.44)$$

$$P^{S^{**}}(GY) = \sigma_{GY,L_3} + \vartheta \cdot (\gamma_{K \rightarrow K} \cdot P^{S^{**}}(K) + \gamma_{K \rightarrow J} \cdot P^{S^{**}}(J) + \gamma_{K \rightarrow A} \cdot P^{S^{**}}(A)) \quad (1.45)$$

$$P^{S^{**}}(R) = \sigma_{R,L_2} + \vartheta \cdot (\gamma_{A \rightarrow A} \cdot P^{S^{**}}(A) + \gamma_{A \rightarrow GY} \cdot P^{S^{**}}(GY) + \gamma_{A \rightarrow R} \cdot P^{S^{**}}(R)) \quad (1.46)$$

Fenti egyenletrendszer megoldva számítható a várható diszkontált profit értéke az S^{**} karbantartási stratégia esetében az első iterációs lépés után:

$$P^{S^{**}}(K) = 5126\text{€}, P^{S^{**}}(J) = 5016\text{€}, P^{S^{**}}(A) = 4996\text{€},$$

$$P^{S^{**}}(GY) = 4726\text{€}, P^{S^{**}}(R) = 4630.14\text{€} \quad (1.47)$$

Az S^{**} első iterációs lépés után az energiafogyasztás csökkenése számítható:

$$\omega_{i,g}^* = \frac{(P_i^{S^{**}} - P_i^{S^*})}{c_g^{LCOE}} \quad (1.48)$$

ahol $\omega_{i,g}^*$ az energiafogyasztás csökkenése az első iterációs lépésben módosult karbantartási stratégia eredményeként az i. rendszer státusz esetében a g. elektromos energia generáló forrás esetében. Hasonlóan, a GHG emisszió csökkenése is számítható:

$$\zeta_{i,g,f}^* = \frac{(P_i^{S^{**}} - P_i^{S^*})}{c_g^{LCOE}} \cdot \frac{\varepsilon_f^{spec}}{c_g^{LCOE}} \quad (1.49)$$

ahol $\zeta_{i,g,f}^*$ az emisszió csökkenése az első iterációs lépésben módosult karbantartási stratégia eredményeként az i. rendszer státusz esetében g. elektromos energia generáló forrás és f. GHG esetében.

Az energiafelhasználás és GHG emisszió csökkenésének első iterációs lépést követő értékét a 4. táblázat foglalja össze.

4. táblázat Energiafelhasználás és GHG emisszió csökkenése az első iterációs folyamat eredményeként módosított karbantartási stratégia eredményeként különböző elektromos energia termelés esetén

Státusz	Energia-fogyasztás csökkenés ¹	GHG emisszió csökkenése ²					
		CO ₂	SO ₂	CO	HC	NO _x	PM
Olaj							
K	26854.84	19684.597	0.591	16.516	8.996	89.265	0.752
J	30032.26	22013.645	0.661	18.470	10.061	99.827	0.841
A	31483.87	23077.677	0.693	19.363	10.547	104.652	0.882
GY	30822.58	22592.952	0.678	18.956	10.326	102.454	0.863
R	29596.77	21694.435	0.651	18.202	9.915	98.380	0.829
Fotovoltaikus							
K	26854.84	2282.661	0.054	1.960	1.074	10.635	0.081
J	30032.26	2552.742	0.060	2.192	1.201	11.893	0.090
A	31483.87	2676.129	0.063	2.298	1.259	12.468	0.094
GY	30822.58	2619.919	0.062	2.250	1.233	12.206	0.092
R	29596.77	2515.726	0.059	2.161	1.184	11.720	0.089
Biomassza							
K	26854.84	1208.468	0.027	1.020	0.564	5.505	0.054
J	30032.26	1351.452	0.030	1.141	0.631	6.157	0.060
A	31483.87	1416.774	0.031	1.196	0.661	6.454	0.063
GY	30822.58	1387.016	0.031	1.171	0.647	6.319	0.062
R	29596.77	1331.855	0.030	1.125	0.622	6.067	0.059

¹ [kW] ² [kg].

Az egyes karbantartási stratégiák esetében adódó GHG emisszió értékét az energiafelhasználás és az 5. táblázat fajlagos értékei alapján határoztam meg.

5. táblázat Fajlagos GHG emisszió az elektromos energia forrásának függvényében [g/kWh]

Forrás	Emisszió					
	CO ₂	SO ₂	CO	HC	NO _x	PM
Lignit	1054	0.032	0.880	0.480	4.760	0.040
Szén	888	0.028	0.733	0.400	3.960	0.030
Olaj	733	0.022	0.615	0.335	3.324	0.028
Természetes gáz	499	0.016	0.418	0.228	2.226	0.019
Fotovoltaikus	85	0.002	0.073	0.040	0.396	0.003
Biomassza	45	0.001	0.038	0.021	0.205	0.002
Nukleáris	29	<10 ⁻³	0.024	0.013	0.132	0.001
Víz	26	<10 ⁻³	0.022	0.012	0.119	0.001
Szél	26	<10 ⁻³	0.022	0.012	0.119	0.001

A fentiekben vázolt első iterációs lépést követően még addig szükséges további iterációs lépéseket végezni, amíg az értékmeghatározó egyenlettel a rendszer egyes státuszaira meghatározott várható diszkontált profit értéke nem lesz kisebb egy rendszer státusz esetében sem, mint az azonos státuszhoz tartozó Howard paraméter értéke, minden egyes státusz esetében. Ezen számítás menetét foglalja össze a 3. ábra.

		KIVÁLÓ	JÓ	ÁTLAGOS	GYENGE	ROSSZ
Kezdeti megoldás	S^* P^*	N 3461.43€	N 3154.9€	L_1 3044.9€	L_1 2815.33€	L_2 2795.33€
		↓	↓	↓	↓	↓
1. iteráció	S^{**} P^{**}	N 5126€	L_1 5016€	L_2 4996€	L_3 4726€	L_2 4630.14€
		↓	↓	↓	↓	↓
2. iteráció	S^{***} P^{***}	N 5126€	L_1 5016€	L_2 4996€	L_2 4821.2€	L_2 4650.13€
		↓	↓	↓	↓	↓
3. iteráció	S^F P^F	N 5126€	L_1 5016€	L_2 4996€	L_2 4821.2€	L_2 4650.13€

3. ábra A karbantartási stratégiára vonatkozó iterációs módszer számítási eredményei három iterációs lépést követően

Tudományos eredmények

Kidolgoztam egy olyan valós idejű optimalizálási módszert, mely kihasználva a digitális iker technológia adta lehetőségeket, alkalmas kiberfizikai termelési környezetben a karbantartási stratégia valós idejű optimalizálására. Egy funkcionális modellben összefoglaltam azon főbb technológiai megoldásokat, melyek a valós idejű optimalizálás megvalósításához szükségesek: intelligens szerszámok, intelligens termékek, okos szenzorok, edge computing, digitális iker, folyamatszimuláció [S3]. Kidolgoztam egy matematikai modellt és annak többfázisú optimalizálási algoritmusát. Az optimalizálási algoritmus első fázisa a kiinduló karbantartási stratégia meghatározására szolgál Markov döntési folyamat, Howard iterációs módszere és értékmeghatározó egyenletek segítségével. A második fázis a valós idejű optimalizálás, mely értékmeghatározó egyenleteken és evolúciós heurisztikán alapszik. A kidolgozott modellt és módszert numerikus szcenáriók segítségével validáltam [S2].

2.2 Humán erőforrás, mint logisztikai erőforrás struktúrájának optimalizálása

Minden vállalatnak szüksége van megbízható és rugalmas erőforrásokra a termelési és szolgáltatási feladatok hatékony megvalósítása érdekében. A termelési rendszerek számos olyan erőforrást tartalmaznak (technológiai, logisztikai, humán, pénzügyi), melyek hatékony menedzselése elengedhetetlen a költséghatékony, megbízható működéshez [S4]. A humán erőforrások menedzselése egyre nagyobb jelentőségre tesz szert globalizált, hálózatszerűen működő gazdasági környezetben, hiszen a kooperatív termelési és logisztikai rendszerek esetében az optimális humán erőforrás létszám és struktúra dinamikus környezetben történő kialakítása és alkalmazása egy komplex tervezési probléma [8].

A humán erőforrás gazdálkodás során nem egyedül a költséghatékonyságot kell szem előtt tartani stratégiai és taktikai döntések meghozatalakor, hanem olyan egyéb szempontokat is figyelembe kell venni, mint a rendelkezésre álló képességek, képzési potenciál, erkölcsi elismertség. A vállalatoknak számos külső és belső tréning által kell biztosítani dolgozóik részére az adott munkakörhöz szükséges tudásanyagot és a megszerzett tudást célszerű ahhoz illeszkedő pozícióval és juttatással honorálni [9,10].

Ugyan a humán erőforrás gazdálkodás területén számos szoftver [11] áll rendelkezésre (BambooHR, Zugata, Teamtailor vagy Zoho recruit), azonban a Markov-lánc modellezés segítségével lehetőség van a humán erőforrás stratégiák dinamikus hatásainak vizsgálatára.

A Miskolci Egyetem Logisztikai Intézetében a több évtizedes múlta visszatekintő logisztikai kutatások Cselényi József és Illés Béla professzor urak vezetésével nem csak a termelési, hanem a szolgáltatási tevékenységekre is fókuszáltak és ezen kutatások során nem csupán a technológiai és logisztikai erőforrások, hanem a humán erőforrások hatásai is vizsgálat tárgyát képezték. Az utóbbi évtizedekben olyan új humán erőforrás gazdálkodási módszerek kerültek be a gyakorlatba, melyek megpróbálják integrálni a gazdasági, környezeti és minőségi aspektusokat: biztonság és ergonómia [12], a munkában töltött idő minősége és a fenntarthatóság kapcsolata [13,14], szocioműszaki kapcsolatok [13] vagy termékminőség, szolgáltatás és folyamatok kapcsolata [15].

PhD fokozatom megszerzését követően aktív részese lehettem ezen kutatómunkának. Kutatásaim során szoros együttműködést alakítottam ki Christian Landschützer kollégával, aki a Graz University of Technology egyetemi docense. Közös kutatási eredményeinket angol, magyar és német nyelven

egyenként publikáltuk. A humán erőforrások területén végzett kutatásaim során kidolgozásra került egy olyan, elnyelő Markov-lánc modellezésen alapuló szimulációs algoritmus, melynek révén lehetséges a különböző humán erőforrás gazdálkodási stratégiák hatásainak vizsgálata [S5-S7]. A kidolgozott modell egy nagyvállalati környezetet modellező esettanulmány segítségével lett validálva.

Humán erőforrás struktúra dinamikus viselkedésének modellezése

Kutatómunkám keretében egy olyan elnyelő Markov-lánc modellezésen alapuló szimulációs modell került kidolgozásra, amely alkalmas nagyvállalati környezetben lévő humán erőforrás gazdálkodási rendszerben alkalmazott stratégiák vizsgálatára, a stratégiák okozta hatások előrejelzésére, illetve a stratégia módosítására vonatkozó javaslatok kidolgozásának támogatására annak érdekében, hogy a kívánt humán erőforrás struktúra hosszú távon megfeleljen az operatív céloknak. A modell szuperdiagonális, szubdiagonális és általános előléptetési mátrixokkal leírható humán erőforrás fejlesztési stratégiák vizsgálatára egyenként alkalmas.

Az előléptetési mátrix egy dolgozó ranglétrán történő előrelépésének valószínűségeit fogalmazza meg. Három különböző stratégia fogalmazható meg az előrelépési lehetőségek kapcsán. Az első stratégia esetében a hierarchikus előléptetési rendszerben egyszerre egy lépcsőt léphet előre egy alkalmazott, ezért az előléptetési mátrix, mint egy szuperdiagonális mátrix írható le:

$$\mathbf{P} = [p_{ij}] \text{ ahol } \begin{cases} p_{ij} \geq 0 & j = i \vee j = i + 1 \\ p_{ij} = 0 & j \neq i \wedge j \neq i + 1 \end{cases} \quad (2.1)$$

A második stratégia esetében szintén csak egy lépcsőt léphetnek előre az alkalmazottak egy lépésben, azonban van visszalépési lehetőség is a megelőző szintre. Ebben az esetben az előléptetési mátrix diagonális, szuperdiagonális és szubdiagonális elemeket is tartalmaz. A diagonális elemek azt írják le, hogy az alkalmazott az adott pozícióban marad, a szuperdiagonális elemek az előrelépés valószínűségét, míg a szubdiagonális elemek a visszalépés lehetőségét definiálják:

$$\mathbf{P} = [p_{ij}] \text{ ahol } \begin{cases} p_{ij} \geq 0 & j = i \vee j = i \pm 1 \\ p_{ij} = 0 & j \neq i \wedge j \neq i \pm 1 \end{cases} \quad (2.2)$$

A harmadik esetben az alkalmazottak több lépcsőt is léphetnek egyszerre a hierarchikus struktúrában. A (2.3) a szuperdiagonális, míg a (2.4) a szubdiagonális mátrix felépítésére mutat példát egy háromszintes hierarchikus előrelépési struktúrában.

$$\mathbf{P}_{szupdiag} = \begin{bmatrix} p_{11} \geq 0 & p_{12} \geq 0 & 0 \\ 0 & p_{22} \geq 0 & p_{23} \geq 0 \\ 0 & 0 & p_{33} \geq 0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

és

$$\mathbf{P}_{szubdiag} = \begin{bmatrix} p_{11} \geq 0 & 0 & 0 \\ p_{21} \geq 0 & p_{22} \geq 0 & 0 \\ 0 & p_{32} \geq 0 & p_{33} \geq 0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Jelen modellben egyaránt alkalmazhatunk elnyelő és nem elnyelő előléptetési mátrixokat az alkalmazott stratégia függvényében.

Amennyiben egy alkalmazott egy adott pozícióból ki tud lépni és el tudja hagyni a rendszert, akkor elnyelő előléptetési mátrixot kell alkalmazni és a modell elnyelő Markov-lánccal írható le. Elnyelő Markov-lánccok esetében definiálható egy kiegészítő előléptetési mátrix, mely az előrelépési láncból történő kilépés okait és azok valószínűségeit írja le:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

ahol

$$\forall j: \sum_{i=1}^m a_{ij} = 1 - \sum_{i=1}^m p_{ij} \quad (2.6)$$

Az alkalmazotti struktúra az $\mathbf{E} = (e_{ki})$ mátrix segítségével adható meg. A mátrix megadja a Markov-lánc szimuláció k . lépésében az alkalmazottak számát. Az $\bar{\mathbf{r}} = (r_i)$ toborzási ráta megadja az egy adott szinten lévő alkalmazott toborzási valószínűségét, ahol

$$\sum_{i=1}^m r_i = 1 \quad (2.7)$$

A toborzási ráta vektorként és mátrixként is felírható. Amennyiben vektor formájában adjuk meg, akkor a szimulációs időablakon belül konstansnak tekintendő, míg mátrixot alkalmazva figyelembe vehetjük a toborzási arány dinamikus változását a szimulációs időablakon belül és a toborzási arányt az alábbi módon számíthatjuk:

$$\mathbf{R} = [r_{ki}], \text{ ahol } \begin{cases} r_{ki} = r_i & i = 1 \\ r_{ki} = \frac{e_{k-1,i}}{\sum_{i=1}^m e_{k-1,i}} & 1 < i \leq m \end{cases} \quad (2.8)$$

és

$$\forall k: \sum_{i=1}^m r_{ki} = 1 \quad (2.9)$$

A tervezett humán erőforrás struktúra a $\bar{\mathbf{p}} = (p_i)$ vektorral írható le a vállalati humán erőforrás gazdálkodási stratégia függvényében és tartalmazza az

alkalmazottak számát az egyes pozíciókban. Az alkalmazotti létszám fejlődése a következő függvénnyel számítható:

$$p_k^{fejl} = \sum_{i=1}^m e_{1i} + (k-1) \frac{\sum_{i=1}^m p_i - \sum_{i=1}^m e_{1i}}{n-1} \quad (2.10)$$

A toborzandó alkalmazotti létszám két fontos paraméter függvénye. Az első paraméter az előírt létszámnövekedési arány, mely feltétele annak, hogy a szimulációs időablak végére elérjük a tervezett alkalmazotti összlétszámot. A k. lépésben toborzandó alkalmazotti létszám a következő módon határozható meg:

$$\Delta p_k^{fejl} = p_k^{fejl} - p_{k-1}^{fejl} \quad (2.11)$$

A másik fontos paraméter a rendszert elhagyó alkalmazottak száma:

$$L = [l_{ki}], \quad \begin{cases} l_{ki} = e_{k-1,i} \sum_{j=1}^m a_{ij} & 2 \leq k \leq n \\ l_{ki} = 0 & k = 1 \end{cases} \quad (2.12)$$

A k. lépésben toborzandó alkalmazottak számának meghatározásához a következő összefüggést használjuk:

$$e_k = \sum_{i=1}^m l_{ki} + \Delta p_k^{fejl} \quad (2.13)$$

Mindezek alapján az alkalmazotti struktúra a k. lépésben a következő egyszerű összefüggéssel számítható:

$$e_{ki}^* = e_k r_{ki} \quad (2.14)$$

Esettanulmányok

Az első esettanulmány egy multinacionális cég humán erőforrás fejlesztési folyamatát vizsgálja, ahol az alapvető cél a szerelőszori operátorok megfelelő toborzása és képzése révén egy hosszútávon optimális létszám és pozícióarány elérése. Az előrelépés hat szintje definiálható a rendszerben: gépkezelő, kiemelt gépkezelő, eszköz-technikus, területi technikus, szerelésfelügyelő és műveleti menedzser.

Az alkalmazottak egy lépésben csak egy lépcsőt léphetnek előre, ezért az előléptetési mátrix, mint szuperdiagonális mátrix írható le (2.15), ahol például $p_{4,4} = 0.80$ azt jelenti, hogy 80% annak a valószínűsége, hogy egy területi technikus az időablakon belül nem kerül előléptetésre.

Hasonlóan, $p_{4,5} = 0.10$ azt jelenti 10% az esélye annak, hogy egy területi technikusból az időablakon belül szerelésfelügyelő lesz. Ezen mátrix elemei az előrelépési folyamat tranzitív állapotait írják le. Az alkalmazottak számos okból elhagyhatják a vállalatot, például karrierpálya modell hiánya, rossz emberi kapcsolatok, alacsony fizetés vagy erkölcsi elismertség hiánya. A kiegészítő előléptetési mátrix (2.16) az esettanulmány folyamataiban lévő kilépéseket írja le,

mint elnyelő elemeket és azt adja meg, hogy mely pozícióból milyen aránnyal lépnek ki alkalmazottak különböző okok miatt:

$$P = \begin{bmatrix} 0.65 & 0.20 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.50 & 0.30 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.70 & 0.20 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.80 & 0.10 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.70 & 0.20 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.60 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

és

$$A = \begin{bmatrix} 0.050 & 0.025 & 0.025 & 0.050 \\ 0.020 & 0.120 & 0.030 & 0.030 \\ 0.025 & 0.025 & 0.050 & 0.000 \\ 0.050 & 0.000 & 0.050 & 0.000 \\ 0.000 & 0.060 & 0.000 & 0.040 \\ 0.120 & 0.080 & 0.105 & 0.095 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

ahol $a_{2,3} = 0.03$ azt jelenti, hogy 3% az esélye annak, hogy egy kiemelt gépkezelő alacsony fizetés miatt hagyja el a vállalatot. A vállalatnál a vizsgálat kezdetekor 25 gépkezelő, 17 kiemelt gépkezelő, 15 eszköz-technikus, 14 területi technikus, 12 szerelésfelügyelő és 7 műveleti menedzser dolgozik.

A vállalat célja, hogy ezt a létszámot a 20 hónapos vizsgálati időhorizont végére 280 főre emelje a következő megoszlásban: 39 gépkezelő, 20 kiemelt gépkezelő, 20 eszköz-technikus, 97 területi technikus, 60 szerelésfelügyelő és 44 műveleti menedzser.

A kiinduló toborzási ráta a hat különböző pozícióra a toborzási mátrix első sorában kerül megadásra:

$$R = [0.40 \quad 0.20 \quad 0.15 \quad 0.10 \quad 0.10 \quad 0.05] \quad (2.17)$$

A bemutatott elnyelő Markov-lánc szimulációs vizsgálat lehetővé teszi az alkalmazotti karrierpálya és a vállalati humán erőforrás gazdálkodási stratégia vizsgálatát. A szimulációval meghatározható a humán erőforrások pozíció szerinti jövőbeli eloszlása (6. táblázat).

Ezen esettanulmányban a szimulált alkalmazotti létszám az időablak végén: 2 gépkezelő, 2 kiemelt gépkezelő, 21 eszköz-technikus, 126 területi technikus, 76 szerelésfelügyelő és 53 műveleti menedzser.

Ahogy azt a szimulált toborzási ráta mátrix is mutatja (7. táblázat), a toborzási ráta dinamikusán változik, mivel függvénye a teljes alkalmazotti létszámnak és az egyes pozíciókba aktuálisan toborzott alkalmazotti létszámnak.

6. táblázat Szimulált alkalmazotti létszám az 1. esettanulmányban

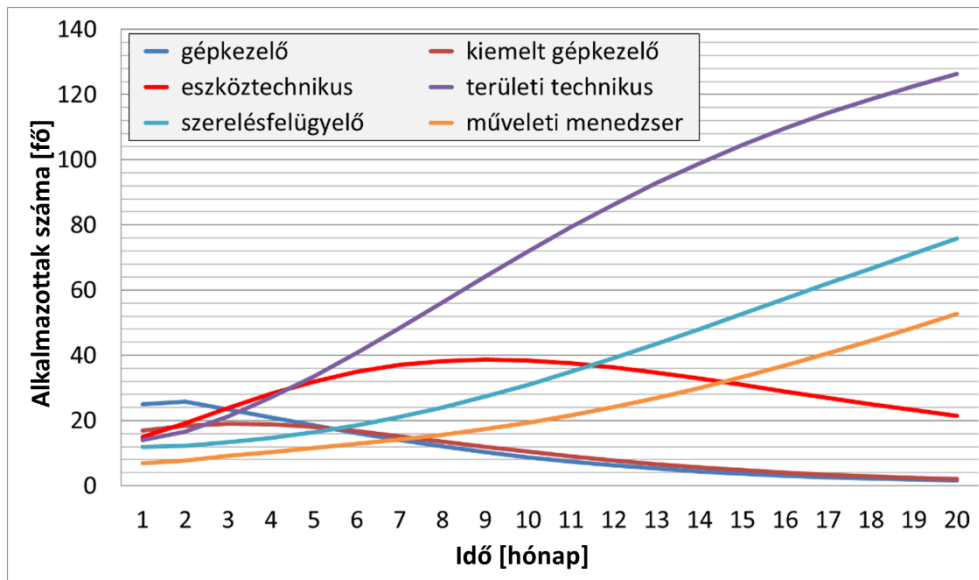
E	1	2	3	4	5	6
1	25	17	15	14	12	7
2	25.9	18.3	19.2	16.6	12.2	7.8
3	23.4	19	23.8	21.4	13.3	9.11
4	20.9	18.8	28.2	27.1	14.7	10.3
5	18.5	18	32	33.6	16.4	11.6
6	16.2	16.7	34.9	40.8	18.5	12.8
7	14	15.2	37	48.5	21.1	14.2
8	12	13.6	38.3	56.4	24	15.7
9	10.3	12	38.7	64.3	27.4	17.4
10	8.74	10.4	38.4	72	31	19.4
11	7.4	9.02	37.5	79.4	35	21.7
12	6.24	7.73	36.2	86.4	39.2	24.2
13	5.25	6.6	34.6	92.9	43.6	27
14	4.41	5.61	32.8	99	48.1	30.1
15	3.71	4.75	30.9	105	52.7	33.4
16	3.11	4.02	28.9	110	57.4	36.9
17	2.62	3.4	27	114	62	40.6
18	2.2	2.87	25	119	66.7	44.5
19	1.85	2.42	23.2	123	71.3	48.6
20	1.56	2.05	21.4	126	75.9	52.8

7. táblázat Szimulált toborzási ráta mátrix az 1. esettanulmányban

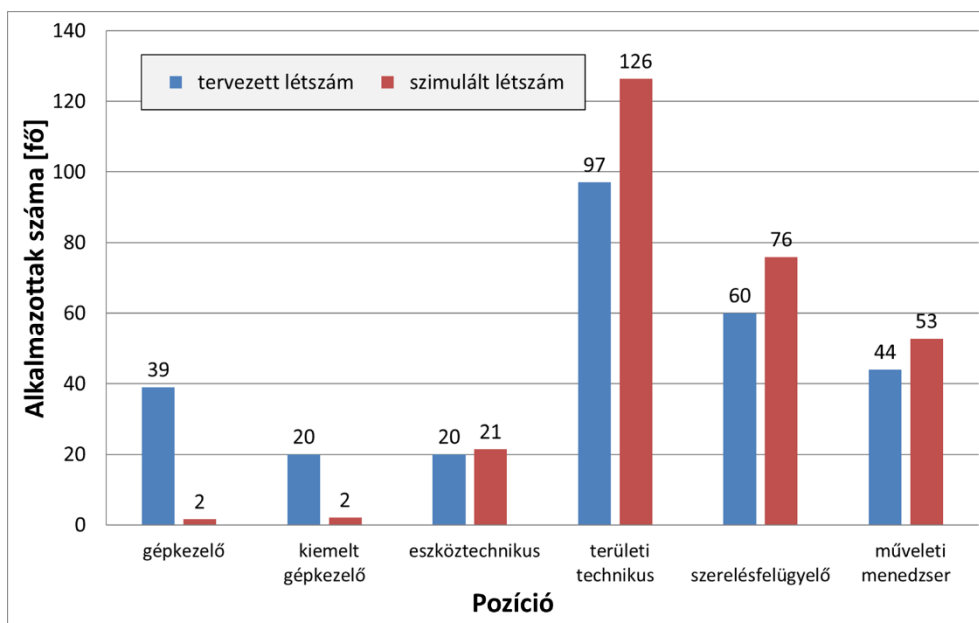
R	1	2	3	4	5	6
1	0.4	0.2	0.15	0.1	0.1	0.05
2	0.26	0.18	0.192	0.166	0.122	0.078
3	0.21	0.17	0.217	0.194	0.121	0.083
4	0.17	0.16	0.235	0.225	0.122	0.086
5	0.14	0.14	0.246	0.258	0.126	0.089
6	0.12	0.12	0.25	0.292	0.132	0.092
7	0.09	0.1	0.247	0.323	0.141	0.095
8	0.08	0.09	0.239	0.352	0.15	0.098
9	0.06	0.07	0.228	0.378	0.161	0.103
10	0.05	0.06	0.213	0.4	0.172	0.108
11	0.04	0.05	0.198	0.418	0.184	0.114
12	0.03	0.04	0.181	0.432	0.196	0.121
13	0.03	0.03	0.165	0.442	0.208	0.129
14	0.02	0.03	0.149	0.45	0.219	0.137
15	0.02	0.02	0.134	0.454	0.229	0.145
16	0.01	0.02	0.121	0.457	0.239	0.154
17	0.01	0.01	0.108	0.457	0.248	0.163
18	0.01	0.01	0.096	0.456	0.257	0.171
19	0.01	0.01	0.086	0.454	0.264	0.18
20	0.01	0.01	0.076	0.451	0.271	0.188

A 4. ábra az alkalmazotti létszám időbeli alakulását ábrázolja az egyes pozíciókban. Az 5. ábra a tervezett és a szimulált alkalmazotti létszám közötti különbséget demonstrálja.

A tervezett és a szimulált létszám közötti arány az egyes pozíciókban a következők szerint alakul: gépkezelő (gépkezelő (5%), kiemelt gépkezelő (10%), eszköz-technikus (102%), területi technikus (130%), szerelésfelügyelő (127%) és műveleti menedzser (120%). Számos oka lehet annak, hogy a tervezett és a szimulált létszám között ilyen jelentős a különbség: az alkalmazotti teljesítmény rossz felismerése, hibásan kialakított karrierpálya vagy a dolgozók nagyarányú kilépése.



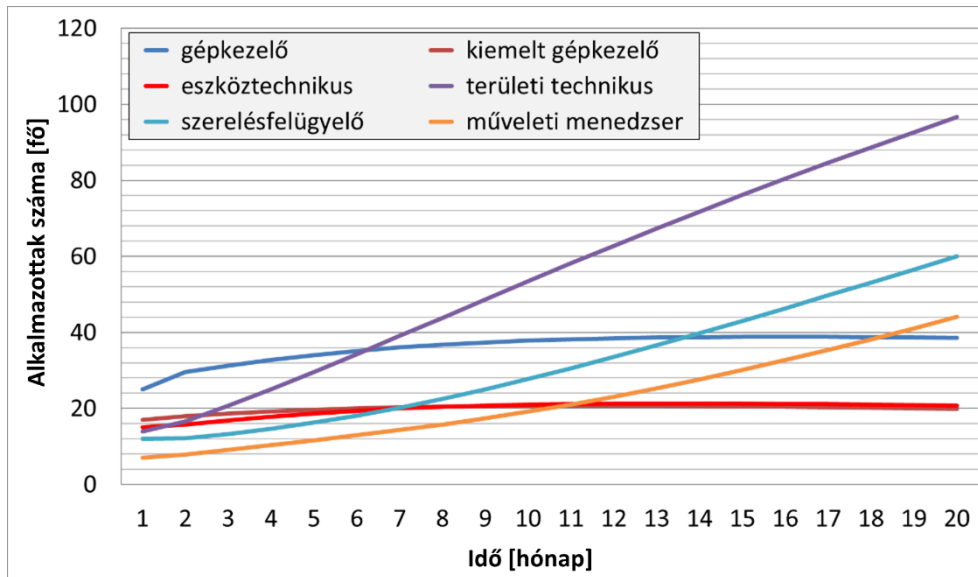
4. ábra Alkalmazotti létszám megoszlása az időablakban



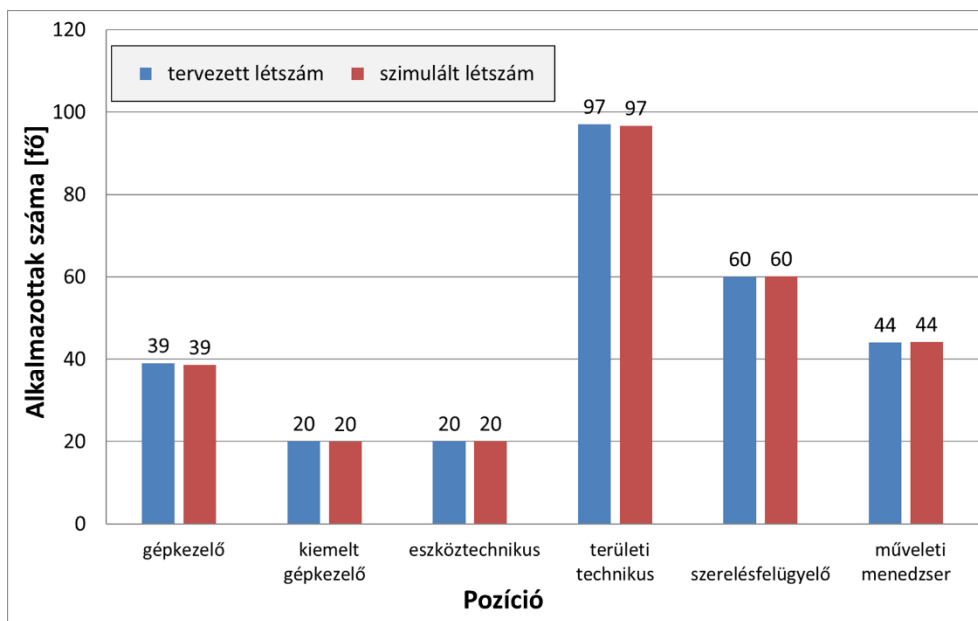
5. ábra A tervezett és szimulált létszám közötti különbség az egyes pozíciókban

Az előléptetési mátrix elemeinek módosításával lehetséges a karrierpálya módosítása (6. és 7. ábra).

Csökkentve a gépkezelők kiemelt gépkezelővé történő előrelépésének valószínűségét 20%-ról 5%-ra, illetve növelve a nem-előléptetési valószínűséget 65%-ról 80%-ra, valamint csökkentve a kiemelt gépkezelők eszköztechnikussá történő előléptetésének valószínűségét 30%-ról 10%-ra, illetve növelve a nem-előléptetési valószínűséget 50%-ról 70%-ra, a szimuláció egy módosított eloszlást mutat az időablak végén.



6. ábra Alkalmazotti létszám megoszlása az időablakban optimalizált előléptetési mátrix esetén



7. ábra A tervezett és szimulált létszám optimalizált előléptetési mátrix esetén

A tervezett és a szimulált létszám közötti különbség az egyes pozíciókban a következők szerint alakul: gépkezelő (100%), kiemelt gépkezelő (100%), eszköz-technikus (100%), területi technikus (100%), szerelésfelügyelő (100%) és műveleti menedzser (100%).

Amint ezen arányok mutatják, a toborzási előléptetési stratégia helyes megválasztásával biztosítható a tervezett humán erőforrás állomány.

A második esettanulmány szintén egy multinacionális cég humán erőforrás fejlesztési folyamatát vizsgálja, ahol az alapvető cél a szerelősori operátorok megfelelő toborzása és képzése révén egy hosszútávon optimális létszám és pozícióarány elérése. Az előrelépés hat szintje megegyezik az előző esettanulmányban szereplőkkel, azonban az alkalmazottak nemcsak előre, hanem visszafele is tudnak lépni a „ranglétrán”, ezért az előléptetési mátrix szub- és szuperdiagonális nem zérus elemeket tartalmazó mátrixként írható le ($\mathbf{P}$), míg a kilépést leíró kiegészítő előléptetési mátrixot (2.19) írja le:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0.60 & 0.05 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.60 & 0.10 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.10 & 0.60 & 0.20 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.30 & 0.50 & 0.10 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.20 & 0.50 & 0.20 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.10 & 0.30 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

és

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.050 & 0.225 & 0.025 & 0.050 \\ 0.050 & 0.050 & 0.030 & 0.070 \\ 0.025 & 0.025 & 0.050 & 0.000 \\ 0.050 & 0.000 & 0.050 & 0.000 \\ 0.000 & 0.060 & 0.000 & 0.040 \\ 0.120 & 0.280 & 0.105 & 0.095 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

A vállalatnál a vizsgálat kezdetekor 35 gépkezelő, 25 kiemelt gépkezelő, 22 eszköz-technikus, 15 területi technikus, 10 szerelésfelügyelő és 3 műveleti menedzser dolgozik. A vállalat célja, hogy ezt a létszámot a 20 hónapos vizsgálati időhorizont végére 300 főre emelje a következő megoszlásban: 105 gépkezelő, 41 kiemelt gépkezelő, 53 eszköz-technikus, 65 területi technikus, 23 szerelésfelügyelő és 13 műveleti menedzser.

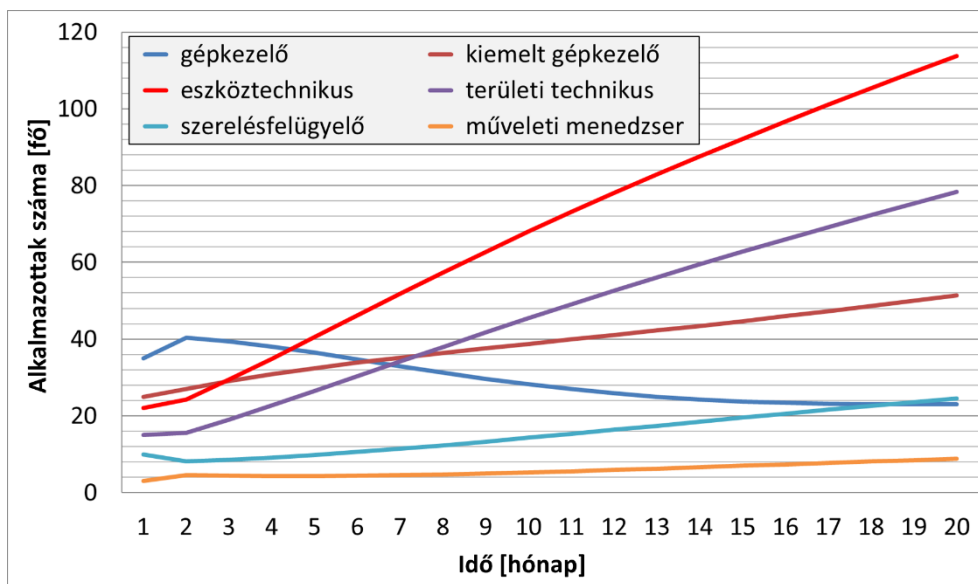
A kiindulási toborzási ráta a hat különböző pozícióra a toborzási mátrix első sorában kerül megadásra:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.24 & 0.12 & 0.05 & 0.04 & 0.05 \\ & & & \dots & & \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

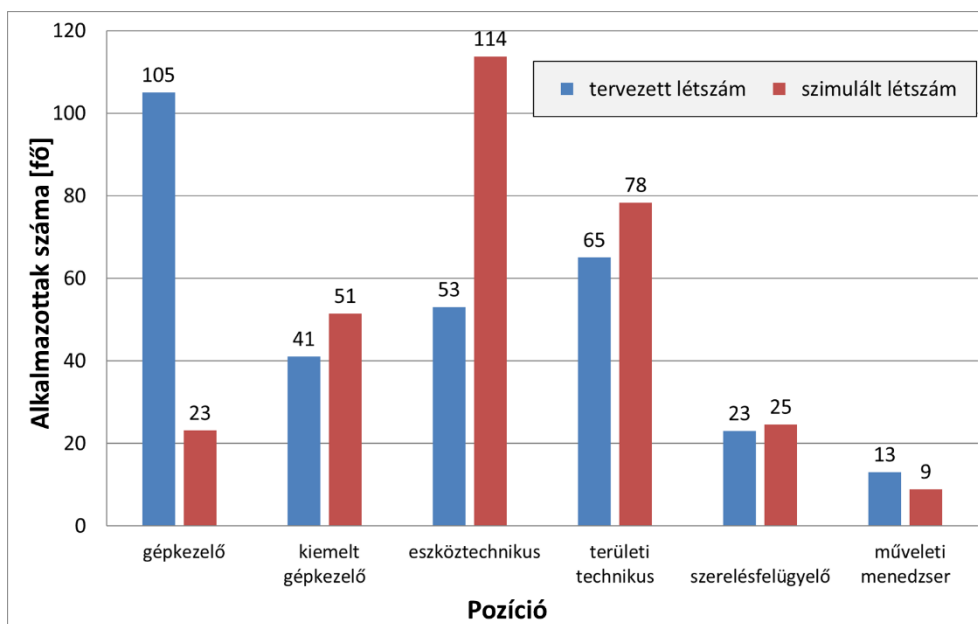
A szimulált alkalmazotti létszám az időablak végén: 23 gépkezelő, 51 kiemelt gépkezelő, 114 eszköz-technikus, 78 területi technikus, 25 szerelésfelügyelő és 9

műveleti menedzser. A toborzási ráta hasonló dinamikus jelleget mutat, mint az első esettanulmányban.

A 8. ábra az alkalmazotti létszám időbeli alakulását ábrázolja az egyes pozíciókban. A 9. ábra a tervezett és a szimulált alkalmazotti létszám közötti különbséget demonstrálja.



8. ábra Alkalmazotti létszám megoszlása az időablakban



9. ábra A tervezett és szimulált létszám közötti különbség az egyes pozíciókban

A tervezett és a szimulált létszám aránya az egyes pozíciókban a következők szerint alakul: gépkezelő (22%), kiemelt gépkezelő (125%), eszköz-technikus

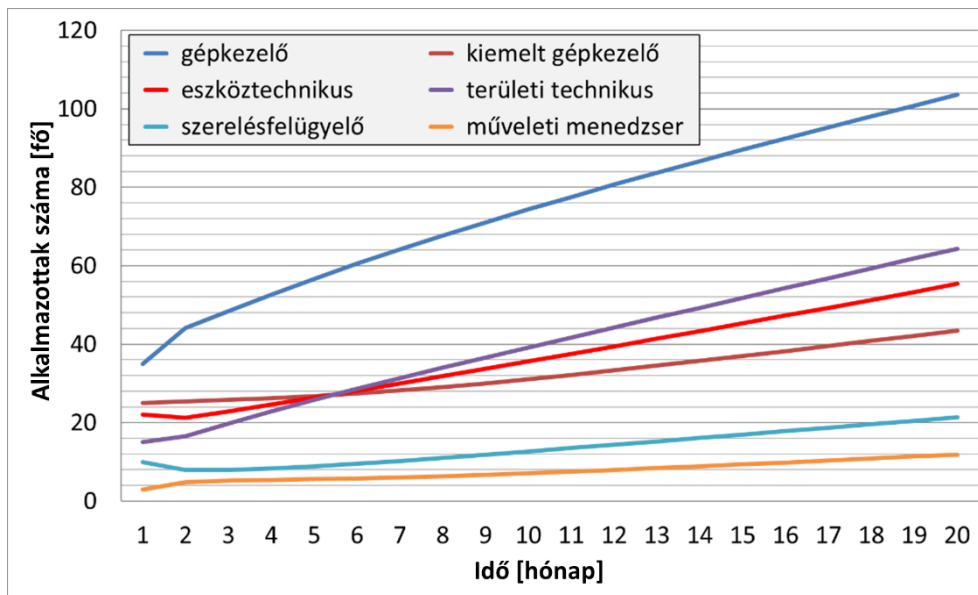
(215%), területi technikus (120%), szerelésfelügyelő (107%) és műveleti menedzser (68%).

$$P = \begin{bmatrix} 0.80 & 0.05 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.60 & 0.10 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.10 & 0.60 & 0.20 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.15 & 0.65 & 0.10 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.10 & 0.50 & 0.20 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.10 & 0.50 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

és

$$A = \begin{bmatrix} 0.050 & 0.025 & 0.025 & 0.050 \\ 0.050 & 0.050 & 0.030 & 0.070 \\ 0.025 & 0.025 & 0.050 & 0.000 \\ 0.050 & 0.000 & 0.050 & 0.000 \\ 0.000 & 0.060 & 0.100 & 0.040 \\ 0.120 & 0.080 & 0.105 & 0.095 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

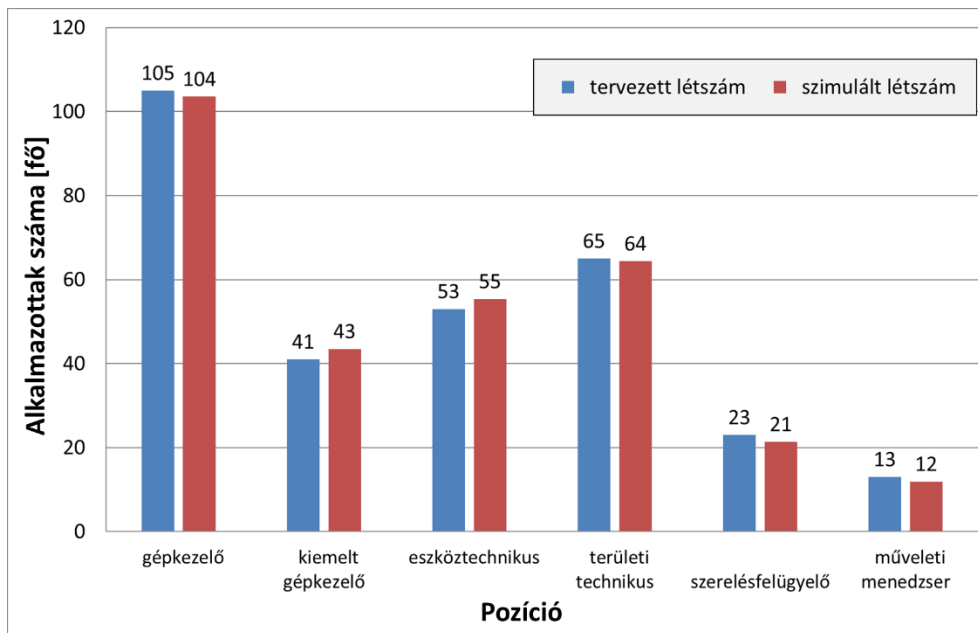
Számos oka lehet annak, hogy a tervezett és a szimulált létszám között ilyen jelentős a különbség; ezek közül is ki kell emelni azt, hogy a területi technikusok jelentős része kerül vissza eszköz-technikusnak, illetve jelentős arányú a cégtől kilépő gépkezelők és műveleti menedzserek száma. A karrierpálya jellemző paramétereinek módosításával (2.21, 2.22) egy olyan új humán erőforrás struktúra hozható létre, mely jobban közelíti az elvárt értékeket (10. és 11. ábra).



10. ábra Alkalmazotti létszám megoszlása az időablakban optimalizált előléptetési mátrix esetén

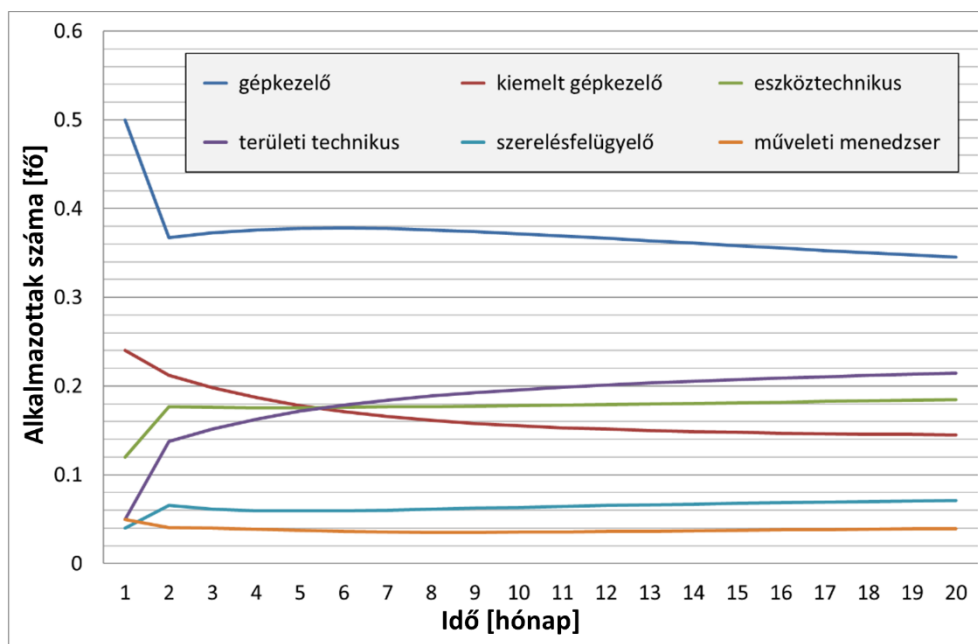
A tervezett és a szimulált létszám aránya az egyes pozíciókban a következők szerint alakul: gépkezelő (99%), kiemelt gépkezelő (106%), eszköz-technikus

(104%), területi technikus (99%), szerelésfelügyelő (93%) és műveleti menedzser (91%).

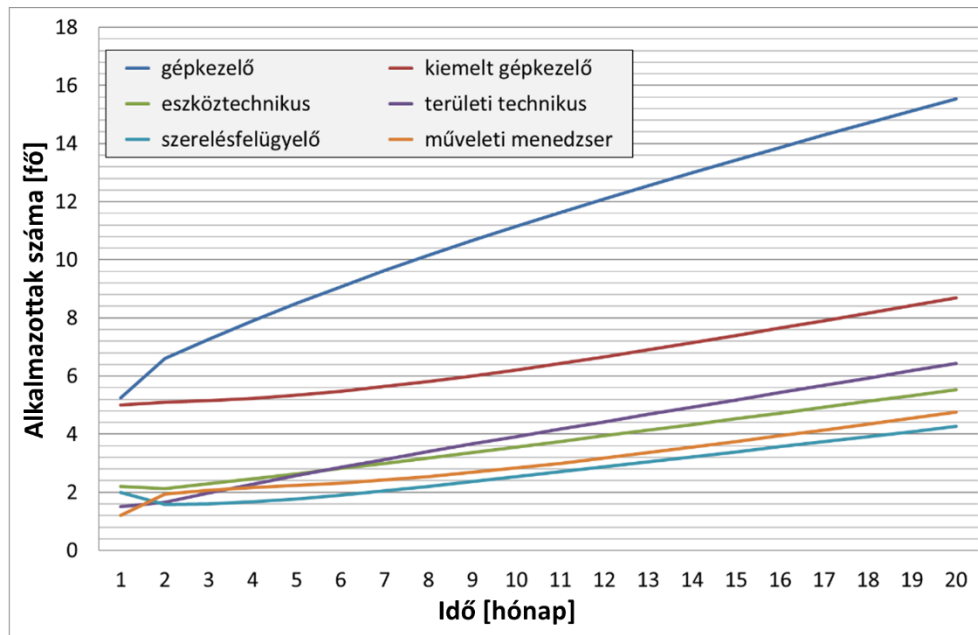


11. ábra A tervezett és szimulált létszám az egyes pozíciókban optimalizált előléptetési mátrix esetén

Amint ezen arányok igazolják, az előléptetési mátrix módosítása jelentős hatást gyakorolt ezen esettanulmányban is a végső alkalmazotti struktúrára. A toborzási arány folyamatosan változott az időablakban, miközben a céget elhagyó alkalmazottak száma folyamatosan emelkedett (12. és 13. ábra).



12. ábra Toborzás dinamikus változása



13. ábra Kilépő alkalmazottak számának változása

A fentiekben bemutatott esettanulmányok igazolták a bemutatott Markov-lánc szimuláció alkalmazhatóságát és demonstrálták a humán erőforrás gazdálkodás stratégiai elemeinek befolyásoló hatását a példában bemutatott szerelősori operátori munkakörök hosszú távú, megbízható feltöltésére vonatkozóan.

Tudományos eredmények

Kidolgozásra került egy olyan elnyelő Markov-láncon alapuló szimulációs módszer, melynek révén vizsgálható, hogy a humán erőforrás fejlesztési stratégiák hogyan befolyásolják egy vállalat jövőbeli humán erőforrás struktúráját. A modell tranzitív és elnyelő állapotokat egyaránt tartalmaz az előléptetési folyamat leírása érdekében. A különböző adatokkal elvégzett számítások igazolták a humán erőforrás gazdálkodási stratégiák fontosságát: a stratégia számszerűsítésével és módosításával lehetséges az optimális alkalmazotti létszám és struktúra kialakítása [S5-S7].

2.3 Konzignációs raktárak szerepe az ellátási láncban

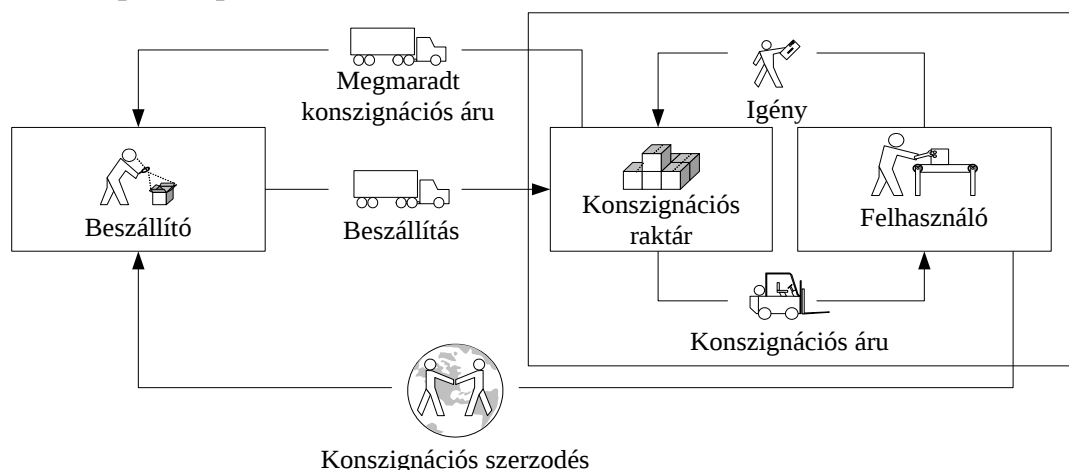
A szállítási határidők pontos betartása és az ehhez kapcsolódó rugalmas szállítóképesség iránti igény a felhasználók részéről az anyaggazdálkodási és beszerzési rendszer átgondolását igényli. Ennek során a felhasználó számára az egyik lehetőség a készletek növelése, mely által a beszállítói nehézségekből adódó esetleges termelés kiesés kockázata csökkenthető. Ez a megoldás azonban a tőkelekötés és a raktári készletek növekedéséhez vezet. Másik lehetőség a megrendelési ciklusok rövidítése, ami viszont a diszpozíciós költségeket, valamint az adminisztrációs és könyvviteli költségeket növeli meg. Egyik megoldás sem nevezhető optimálisnak, hiszen a megnövekedett költségek ronthatják a piaci pozíciót, különösen a költségérzékeny termékek esetében. Erre a problémára kínál egy lehetséges megoldást a konzignációs raktározás koncepciója.

A konzignációs raktáron alapuló ellátási lánc hatékonysága a működési politikától függ, ezért fontos a működési stratégia optimalizálása [16]. A konzignációs raktár közreműködésével megvalósuló ellátási láncok tervezésének egyik fontos lépése a konzignációs szerződés előkészítése, mely során meghatározhatók azon befolyásoló tényezők, melyek korlátozhatják a közvetítő elkötelezettségét és növelhetik az értékesítés jövedelmezőségét [17]. Globális ellátási láncok esetében van nagy szerepe a készletezési stratégiák vizsgálatának, hiszen egy globálisan alkalmazott konzignációs stratégia alkalmazásával csökkenthetők az egyéni döntésekből származó többletköltségek [18]. Egy másik téma, amely jelentős figyelmet kapott a szakirodalomban, a többszintű ellátási lánc elemzése konzignációs környezetben. A kutatási eredmények igazolták, hogy a konzignációs raktárak ellátási láncban való alkalmazása az alábbi potenciális előnyöket nyújthatja [19]: jobb ügyfélkiszolgálás a vevői igényekre való reakcióidő csökkenése révén, a vevői igények kiegyenlítése, a szállítói oldalon csökkenő készletek [20], csökkenő költségek [21].

A Miskolci Egyetem Logisztikai Intézetében Cselényi József professzor úrral közösen végeztem kutatásokat [S8,S9], melyek során azt vizsgáltuk, hogy a konzignációs raktáron alapuló ellátási láncok hogyan alakíthatók ki oly módon, hogy az az összes közreműködő fél számára kedvező legyen. Ezen kutatásokat folytattam később Illés Béla professzor úrral közösen, mely kutatások során azt vizsgáltuk, hogy a konzignációs raktárak és a rendelkezésre álló erőforrások, valamint feladatok összerendelése hogyan befolyásolja az ellátási lánc teljesítőképességét és a beszállítók, illetve a vásárlók költségeit.

Konszignációs raktárak működési mechanizmusa

A konszignációs raktárak körébe azok a raktári létesítmények sorolhatók, melyekben a beszállító árukészletet helyez el a felhasználó számára a felhasználó által biztosított tárolóterületen, azaz a konszignációs raktár nem más, mint a beszállító készáru-raktára a felhasználónál. A felhasználó a termelésirányítás által meghatározott ütemben, a gyártási igényeknek megfelelően képes a gyártáshoz szükséges alapanyagokat, alkatrészeket, részegységeket vételezni. A felhasználó a vételezés biztonsága érdekében a konszignációs raktárban egy biztonsági készlet szint fenntartását igényli a beszállítótól. Az áru tulajdonoscseréje a raktári kivételezés időpontja, az áru ellenértékének kiegyenlítése csak ettől az időponttól válik időszerűvé (14. ábra). A konszignációs raktár mind a beszállító, mind a felhasználó számára előnyöket nyújt. A beszállító a felhasználókkal kialakított szoros kapcsolat, a saját raktárkészlet csökkenése, a szállítási és csomagolási költségek optimalizálása, a megnövekedett szállítói rugalmasság miatt optimalizált termelési program, az alacsonyabb átállási idők, a raktári kivételek áttekinthetősége, a felhasználás megbízható előrejelzése, a szállítások optimalizálhatósága, a saját diszpozíció tervezésének leegyszerűsödése és a letisztult fizetési koncepció által élvezheti a konszignációs raktár nyújtotta előnyöket. A felhasználó a lecsökkent ellátási kockázat, az alacsony tőkeleköltöttségi szint, a készletek áttekinthetősége, az alacsonyabb készlet szintek, a rendelkezési jogosultság által kerülnek kedvező pozícióba a konszignációs raktárat nem alkalmazó felhasználókkal szemben és magas fokú ellátási biztonságot érhetnek el [22-24].



14. ábra Konszignációs raktár, felhasználó és beszállító kapcsolata

A beszállító és a felhasználó között konszignációs szerződés rögzíti a konszignációs áruk kezelésével kapcsolatos előírásokat, szabályokat:

- a beszállító által konszignációs készleten tartott áruk köre,
- a minimális készletszint nagysága áruajtánként,
- a konszignációs készletek követésének módja, az információmegosztás technikája a beszállító és a felhasználó között,
- a konszignációs raktárból kivételezett áruk elszámolásának módja,
- a beszállító által fizetendő kötbér nagysága, amennyiben a vállalt készletszint nem biztosított,
- a felhasználó kötelezettsége a konszignációs készletek tárolása vonatkozásában, a tárolás során bekövetkező minőségromlásból adódó problémák kezelése.

Természetesen a konszignációs raktárak alkalmazása sem célszerű minden árutípus esetében, a konszignációs áruk kiválasztása akár ABC –XYZ analízissel is elvégezhető a mennyiség-érték reláció és a felhasználás folyamatossága figyelembevételével (8. táblázat).

8. táblázat Konszignációs áruk meghatározása ABC-XYZ analízissel

Árutípusok	A	B	C
X	Felhasználásszinkron	Felhasználásszinkron	Gyűjtendő
Y	Idegen tárolású	Idegen tárolású	Gyűjtendő
Z	Konszignációs	Konszignációs	Gyűjtendő

A konszignációs raktárak kialakítása előtt célszerű megvizsgálni és összehasonlítani a konszignációs raktárral történő ellátás és a konszignációs raktár nélküli ellátás költségeit mind a felhasználó, mind a beszállító oldaláról [S8,S9].

Konszignációs raktár létesítésének elemzése

Amennyiben az ellátás konszignációs raktár közreműködése nélkül történik, akkor a felhasználó beszerzéshez kapcsolódó költségei a vásárlási, szállítási, forgóeszköz lekötöttségi és tárolási költségek függvényében az alábbi formában fogalmazhatók meg:

$$K^{F\alpha} = \sum_{i=1}^n KV_i^{F\alpha}(\bar{q}_{Vi}, Q_i) + \sum_{i=1}^n KS_i^{F\alpha}(\bar{q}_{Vi}, Q_i, n, \delta) + \sum_{i=1}^n KE_i^{F\alpha}(\bar{q}_{Ri}^{F\alpha}, e_i^{F\alpha}, \bar{t}_{Ri}^{F\alpha}) + \sum_{i=1}^n KR_i^{F\alpha}(\bar{q}_{Ri}^{F\alpha}, f_i^{F\alpha}, \bar{t}_{Ri}^{F\alpha}) \quad (3.1)$$

ahol

$K^{F\alpha}$ a felhasználó beszerzéshez kapcsolódó költsége konszignációs raktár nélküli esetben (α változat: konszignációs raktár nélküli eset),

$KV_i^{F\alpha}$ az i . alapanyag v . időszakra vonatkozó vásárlási költsége a felhasználó számára konszignációs raktár nélküli esetben,

- $\bar{q}_{vi}$ az átlagos vásárlási mennyiség az i . alapanyagból,
 Q_i a v időszakban az i . alapanyagból vásárolt mennyiség,
 $KS_i^{F\alpha}$ az i . alapanyag v . időszakra vonatkozó szállítási költsége a beszállító-felhasználó relációban konszignációs raktár nélküli esetben,
 n a vásárolt alapanyagfajták száma,
 δ egyútt szállítási tényező (hány fajta alapanyag beszállítása történhet együtt); költségcsökkentő, ha δ nagy,
 $KE_i^{F\alpha}$ az i . alapanyagnál a forgóeszköz lekötöttség a felhasználónál konszignációs raktár nélküli esetben,
 $e_i^{F\alpha}$ az i . alapanyag egységköltsége a felhasználónál konszignációs raktár nélküli esetben,
 $\bar{q}_{Ri}^{F\alpha}$ az i . alapanyag esetén a felhasználó alapanyag raktárában az átlagos készletszint konszignációs raktár nélküli esetben,
 $\bar{t}_{Ri}^{F\alpha}$ az i . alapanyagnak a felhasználó raktárában való átlagos tárolási ideje konszignációs raktár nélküli esetben,
 $KR_i^{F\alpha}$ az i . alapanyag v . időszakra vonatkozó raktározási költsége a felhasználónál konszignációs raktár nélküli esetben,
 $f_i^{F\alpha}$ az i . alapanyag fajlagos raktározási költsége a felhasználó raktárában konszignációs raktár nélküli esetben.

Amennyiben az ellátás konszignációs raktár közreműködésével történik, feltételezve, hogy a konszignációs raktár a felhasználó telephelyén kerül kialakításra, akkor a felhasználó beszerzéshez kapcsolódó költségei a vásárlási, forgóeszköz lekötöttségi, szállítási és tárolási költségek függvényében az alábbi formában fogalmazhatók meg:

$$K^{F\beta} = \sum_{i=1}^n KV_i^{F\beta}(Q_i, R_i^{min}) + \sum_{i=1}^n KR_i^{F\beta}(R_i^{min}, R_i^{max}, f_i^{F\beta}, \bar{t}_{Ri}^{F\beta}) \quad (3.2)$$

ahol

- $K^{F\beta}$ a felhasználó beszerzéshez kapcsolódó költsége konszignációs raktár esetén (β . változat: konszignációs raktár alkalmazásának esete),
 $KV_i^{F\beta}$ az i . alapanyag v . időszakra vonatkozó vásárlási költsége a felhasználó számára konszignációs raktár esetén (mivel a konszignációs raktárba a szállítást a beszállító végzi vagy végezteti, ezért ez a vásárlási költség tartalmazza a szállítási költséget is),
 R_i^{min} a beszállító által vállalt minimális készlet az i . alapanyagból,
 $KR_i^{F\beta}$ az i . alapanyag v . időszakra vonatkozó raktározási költsége a felhasználónál konszignációs raktár esetén,
 R_i^{max} a felhasználó által meghatározott maximális készlet az i . alapanyagból,

$f_i^{F\beta}$ az i. alapanyag fajlagos raktározási költsége a konszignációs raktárban,
 $\bar{t}_{Ri}^{F\beta}$ az i. alapanyag a konszignációs raktárban való átlagos tárolási ideje.

A konszignációs raktár akkor előnyös a felhasználó számára, ha $K^{F\beta} < K^{F\alpha}$.

A szűkebb értelemben vett raktározási költségek mindkét megoldási változat esetében megközelítően azonosnak tekinthetők. A konszignációs raktár esetében értelmezett vásárlási költség a többlétszolgáltatást figyelembe véve magasabb, mint a konszignációs raktár nélküli anyagellátás esetében, azonban ha ez a vásárlási költség-többlet kisebb, mint a hagyományos anyagellátás esetében fellépő forgóeszköz-lekötésből származó költség, akkor a konszignációs raktár létesítése a felhasználó számára kifizetődő. Ezek alapján a felhasználónál jelentkező nyereség a fenti feltételek teljesülése alapján az alábbi formában fogalmazható meg:

$$N^{F\beta} = \sum_{i=1}^n KE_i^{F\alpha}(\bar{q}_{Ri}^{F\alpha}, e_i^{F\alpha}, \bar{t}_{Ri}^{F\alpha}) - \left(\sum_{i=1}^n KV_i^{F\beta}(Q_i, R_i^{min}) - \sum_{i=1}^n KV_i^{F\alpha}(\bar{q}_{Vi}, Q_i) - \sum_{i=1}^n KS_i^{F\alpha}(\bar{q}_{Vi}, Q_i, n, \delta) \right) \quad (3.3)$$

ahol $N^{F\beta}$ a felhasználó nyeresége konszignációs raktár alkalmazása esetén.

Amennyiben az ellátás konszignációs raktár közreműködése nélkül történik, akkor a beszállítónak a felhasználó ellátásából származó nyeresége az árbevétel, a gyártási költség, a forgóeszköz lekötöttség és a tárolási költség függvényében az alábbi formában fogalmazható meg:

$$N^{B\alpha} = \sum_{i=1}^n A_i^{B\alpha}(\bar{q}_{Vi}, Q_i) - \sum_{i=1}^n KG_i^{B\alpha}(\bar{q}_{Vi}, Q_i) - \sum_{i=1}^n KE_i^{B\alpha}(\bar{q}_{Ri}^{B\alpha}, Q_i, e_i^{B\alpha}, \bar{t}_{Ri}^{B\alpha}) - \sum_{i=1}^n KR_i^{B\alpha}(\bar{q}_{Ri}^{B\alpha}, Q_i, f_i^{B\alpha}, \bar{t}_{Ri}^{B\alpha}) - \sum_{i=1}^n KS_i^{B\alpha}(\bar{q}_{Vi}, Q_i, n, \delta) \quad (3.4)$$

ahol

$N^{B\alpha}$ a beszállító nyeresége konszignációs raktár alkalmazása nélküli esetben,

$A_i^{B\alpha}$ a v . időszakban az i. alapanyag eladásából származó árbevétel a beszállítónál konszignációs raktár alkalmazása nélkül,

$KG_i^{B\alpha}$ a v . időszak alatt az i. alapanyag gyártási költsége a beszállítónál konszignációs raktár alkalmazása nélkül,

$KE_i^{B\alpha}$ a v . időszakban az i. alapanyag a beszállító saját raktárában fellépő forgóeszköz lekötöttség konszignációs raktár alkalmazása nélkül,

$KR_i^{B\alpha}$ az i. alapanyag v . időszakra vonatkozó raktározási költsége a beszállító saját raktárában konszignációs raktár alkalmazása nélkül,

$KS_i^{B\alpha}$ az i. alapanyag v . időszakra vonatkozó szállítási költsége a beszállító - felhasználó relációban konszignációs raktár alkalmazása nélkül,

$f_i^{B\alpha}$ az i . alapanyag fajlagos raktározási költsége a beszállítói raktárban konszignációs raktár alkalmazása nélkül,

$\bar{t}_{Ri}^{B\alpha}$ az i . alapanyagnak a beszállítói raktárban való átlagos tárolási ideje konszignációs raktár alkalmazása nélkül.

Amennyiben az ellátás konszignációs raktár közreműködésével történik, akkor a beszállító nyeresége az alábbi formában fogalmazható meg:

$$N^{B\beta} = \sum_{i=1}^n A_i^{B\beta}(Q_i, R_i^{min}) - \sum_{i=1}^n KG_i^{B\beta}(Q_i, R_i^{min}) - \sum_{i=1}^n KE_i^{B\beta}(Q_i, R_i^{min}, \bar{t}_{Ri}^{B\beta}, e_i^{B\beta}) - \sum_{i=1}^n KR_i^{B\beta}(Q_i, R_i^{min}, \bar{t}_{Ri}^{B\beta}, f_i^{B\beta}) - \sum_{i=1}^n KS_i^{B\beta}(Q_i, R_i^{min}, n, \delta) \quad (3.5)$$

ahol

$A_i^{B\beta}$ az i . alapanyag v . időszakra vonatkozó eladásából származó árbevétel a beszállítónál konszignációs raktár esetén,

$KG_i^{B\beta}$ az i . alapanyagból v . időszak alatt a konszignációs raktárba beszállított termékek gyártási költsége a beszállítónál,

$KR_i^{B\beta}$ az i . alapanyag v . időszakra vonatkozó raktározási költsége

$KS_i^{B\beta}$ az i . alapanyag v . időszakra vonatkozó szállítási költsége a beszállító - konszignációs raktár relációban,

$KE_i^{B\beta}$ a v . időszakban az i . alapanyagnak a beszállító saját raktárában és a konszignációs raktárban fellelő forgóeszköz lekötöttség.

A konszignációs raktár akkor előnyös a beszállító számára, ha $N^{B\beta} > N^{B\alpha}$.

Konszignációs raktár használata esetén a beszállítót terhelő gyártási költségek alacsonyabbak, mint hagyományos ellátás esetében, hiszen a konszignációs szerződés alapján kialakítható optimális termelési program révén az átállási idők csökkentésével, a sorozatnagyságok optimális kialakításával és az erőforrások jobb kihasználásával költséghatékonyabb gyártási folyamat valósítható meg. Természetesen a gyártási költség nem csupán a szorosan vett technológiai költségeket foglalja magába, hanem integrálhatja a gyártásközei logisztikai folyamatok által realizált ráfordításokat is.

Konszignációs raktár használata esetén a beszállítót terhelő raktározási költség kisebb, mint hagyományos ellátás esetében, hiszen a beszállító saját beszállítói raktárában kisebb mennyiség tárolását végzi, mivel a konszignációs szerződésnek megfelelően a konszignációs raktár folyamatos feltöltését biztosítani kell.

A konszignációs raktár alkalmazása esetén a forgóeszköz lekötöttség magasabb, mint a hagyományos, konszignációs raktár nélküli anyagellátás esetében, mivel forgóeszköz lekötöttségből származó költség jelentkezik mind a beszállítói, mind a konszignációs raktárban és mindkét költség a beszállítót terheli. Ezen

forgóeszköz lekötöttség azért is magas, mert a beszállító minden áruajtából köteles a felhasználó által konszignációs szerződésben meghatározott minimális készletszintet biztosítani.

Mindezek felhasználásával levezethető, hogy a konszignációs raktár létesítése a beszállító számára akkor nyereséges, ha a konszignációs készlet létesítéséből származó árbevétel többlet, valamint a gyártási és raktározási költségmegtakarítás összege nagyobb, mint a beszállítói raktárban és konszignációs raktárban fellépő és beszállítót terhelő forgóeszköz lekötöttség.

Természetesen mind a felhasználó, mind a beszállító külön-külön megvizsgálhatja a fenti összefüggések felhasználásával a konszignációs raktár kialakításának hasznosságát, azonban mindenképp célszerű lehet a két álláspont ütköztetése és olyan működési költségek és paraméterek meghatározása, melyek mindkét fél számára gazdasági hasznot jelentenek a konszignációs áruk beszerzése esetében.

Az előzőekben leírtak alapján a felhasználónak csak abban az esetben éri meg a konszignációs raktár létesítése, amennyiben a hagyományos beszerzéshez viszonyított vásárlási költség-többlet nem haladja meg a konszignációs raktár létesítése nélkül jelentkező forgóeszköz lekötöttségből származó költséget a felhasználónál:

$$\sum_{i=1}^n KE_i^{F\alpha} > \sum_{i=1}^n KV_i^{F\beta} - (\sum_{i=1}^n KV_i^{F\alpha} + \sum_{i=1}^n KS_i^{F\alpha}) \quad (3.6)$$

A beszállítónak abban az esetben éri meg a konszignációs raktár igénybevétele, amennyiben a hagyományos beszerzéshez viszonyított árbevétel többlet nagyobb, mint a konszignációs raktár üzemeltetéséhez kötődő, a forgóeszköz lekötöttségből, gyártási költségéből és tárolási költségéből származó többletköltség:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n A_i^{B\beta} - \sum_{i=1}^n A_i^{B\alpha} &> \left(\sum_{i=1}^n KE_i^{B\beta} - \sum_{i=1}^n KE_i^{B\alpha} \right) + \left(\sum_{i=1}^n KG_i^{B\beta} - \sum_{i=1}^n KG_i^{B\alpha} \right) + \\ &+ \left(\sum_{i=1}^n KR_i^{B\beta} - \sum_{i=1}^n KR_i^{B\alpha} \right) + \left(\sum_{i=1}^n KS_i^{B\beta} - \sum_{i=1}^n KS_i^{B\alpha} \right) \end{aligned} \quad (3.7)$$

A konszignációs raktár létesítése és működtetése mindenképpen az alapanyagok vételi árának növekedésével jár, hiszen többletszolgáltatást jelent a felhasználó számára. A fenti összefüggések alapján azonban meghatározható az a konszignációs raktár kialakításával együtt járó eladási vagy vételi ár növekedési intervallum, melyen belül a konszignációs raktár létesítése mind a felhasználó, mind a beszállító számára hasznos.

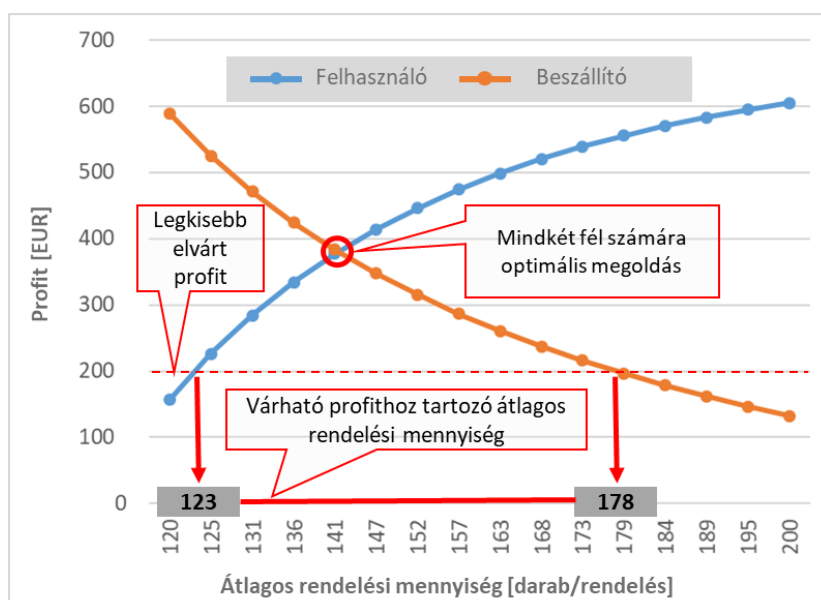
A bemutatott módszer alapján egyszerűen meg lehet határozni azokat a konszignációs raktár létesítése esetén felmerülő minimális raktározási, gyártási és forgóeszköz lekötöttség költségeket, melyek elérésekor a beszállító kénytelen a

nyereséges működés érdekében árát a hagyományos ellátásnál megállapított ár fölé emelni.

A szállítási költségek globális optimumra gyakorolt hatásának vizsgálatakor tekintetbe kell venni az alkalmazott szállítási módszert, hiszen más megfontolást igényel a szállítmányozón keresztül történő szállítás, illetve a saját eszközzel történő szállítás.

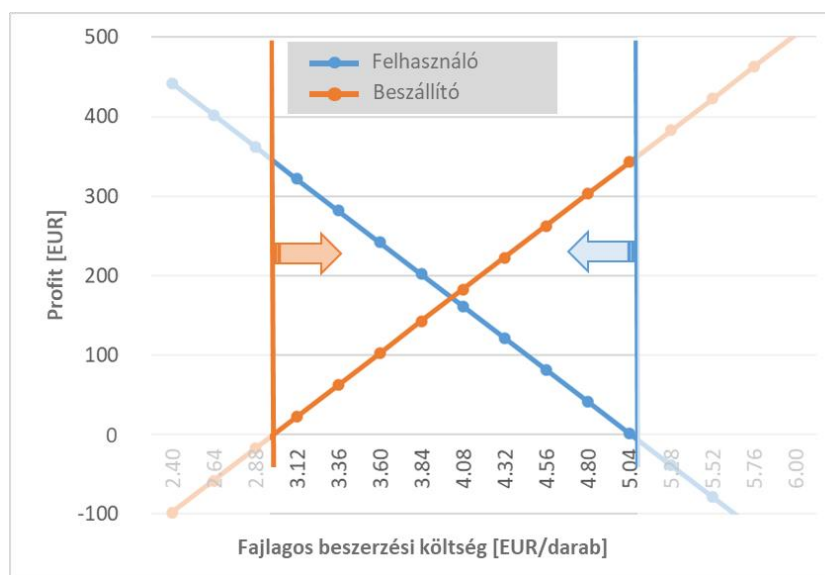
Esettanulmány

Az előző fejezetben bemutatott modell alapján megvizsgálható, hogy hagyományos ellátás esetében milyen hatást gyakorol az átlagos rendelési mennyiség változása az ellátási lánc két fő résztvevője, a beszállító és a felhasználó nyereségére (15. ábra). Fontos azon optimális rendelési mennyiség meghatározása, mely esetében az ellátás mindkét fél számára megfelelő nyereséget biztosít [S10].



15. ábra Átlagos rendelési mennyiség hatása a beszállítói és vásárlói profitra konszignációs raktár nélkül

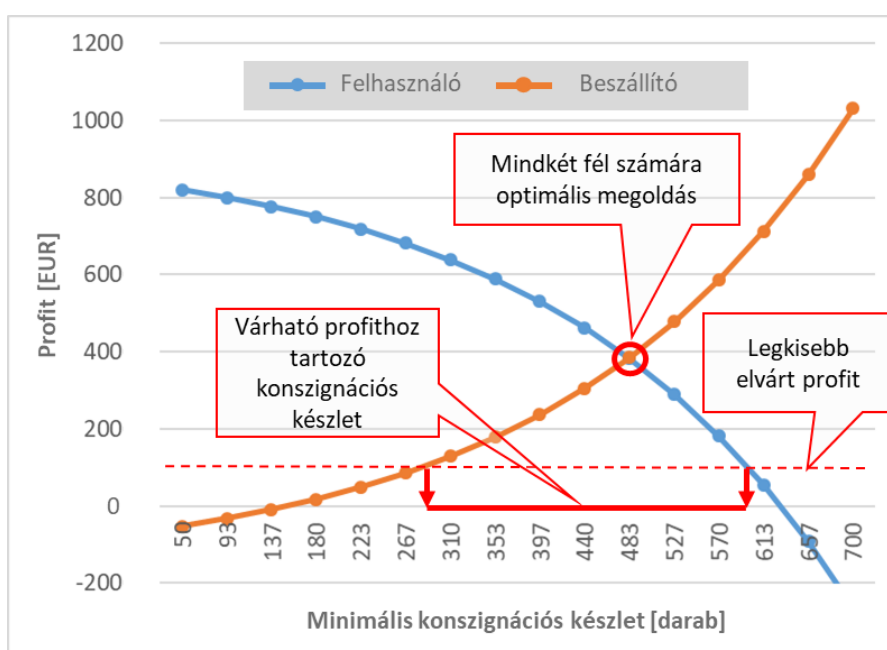
A bizományosi szerződésen alapuló ellátás esetében a fajlagos beszerzési költség nagy hatással van a beszállító és a felhasználó nyereségére. Lehetséges egy alsó és egy felső határértéket találni, és e két határérték között az ellátási lánc mindkét fél számára nyereséges. Az ellátási lánc optimalizálása így lehetséges a maximális nyereség elérése érdekében. A fajlagos beszerzési költségnek a beszállítók és a felhasználók nyereségére gyakorolt hatását a 16. ábra mutatja.



16. ábra A fajlagos beszerzési költség hatása a beszállítói és vásárlói profitra

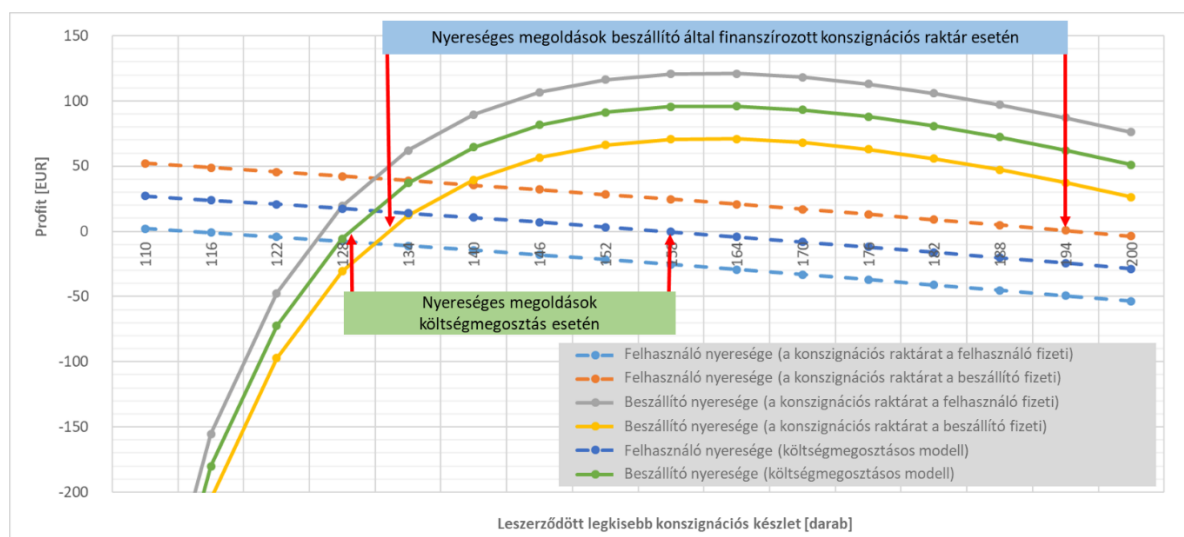
A bizományosi szerződésen alapuló ellátás egyik legfontosabb befolyásoló tényezője a szerződött legkisebb konszignációs készlet. A 17. ábra a szerződött legkisebb konszignációs készlet hatását szemlélteti a beszállítói és vásárlói profitra vonatkozóan konszignációs raktár alkalmazása esetén.

Meg lehet találni azt az optimális megoldást, amely mind a beszállító, mind a felhasználó számára megfelelő nyereséggel jár. Meghatározhatjuk a beszállító és a felhasználó számára egyaránt nyereséges legalacsonyabb konszignációs készlet alsó és felső határát is.



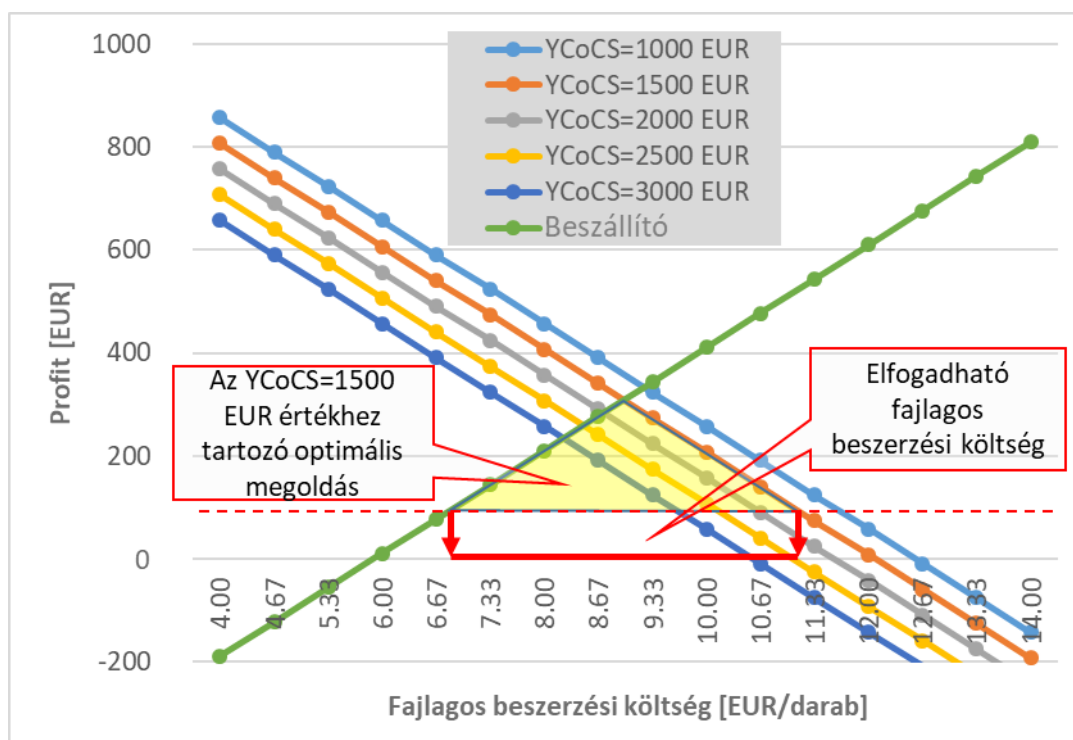
17. ábra A szerződött legkisebb konszignációs készlet hatása a beszállítói és vásárlói profitra konszignációs raktár alkalmazása esetén

Különböző költségmegosztási modellek léteznek, amelyek hatékonyságát érdemes elemezni. A bizományosi szerződésen alapuló ellátás esetében a konszignációs raktár beruházási és üzemeltetési költségei jelentik az egyik legfontosabb költséget. A különböző költségmegosztási modellek jelentősen befolyásolják mind a beszállítók, mind a felhasználók várható nyereségét, és a költségmegosztási modelltől függően meghatározható az egyes döntési változók olyan határértéke, melyen belül az ellátás mindkét fél számára nyereséges lehet. A 18. ábra egy olyan példát mutat, ahol a legalacsonyabb szerződéses konszignációs készlet a döntési változó, és ennek a paraméternek a mindkét fél számára optimális megoldást nyújtó határértékei két költségmegosztási modell esetében eltérők, míg a harmadik költségmegosztási modell esetében (ahol minden költséget a felhasználó fizet) nem lehet optimális megoldást találni mindkét fél számára.



18. ábra A különböző költségmegosztási modellek összehasonlítása a legkisebb rendelési mennyiség alapján

A 19. ábra a beszállító és a felhasználó nyereségét mutatja a fajlagos beszerzési költség, valamint a konszignációs raktár beruházási és üzemeltetési költségének függvényében. Az elemzés igazolta, hogy a beruházási és üzemeltetési költségek nagymértékben befolyásolják az üzemeltetési stratégia rugalmasságát. Ez azt jelenti, hogy a konszignációs raktár alacsonyabb beruházási és üzemeltetési költségei rugalmasabb üzemeltetési stratégiához vezetnek, ami nagyon fontos a beszállítók által vezérelt készletgazdálkodás esetében.



19. ábra Fajlagos beszerzési költség és a konszignációs raktár éves fenntartási költségének hatása a beszállítói és felhasználói nyereségre, amennyiben a konszignációs raktárat a felhasználó üzemelteti

Tudományos eredmény

Kidolgozásra került a konszignációs raktárak létrehozása során alkalmazható olyan döntéstámogató módszer, melynek segítségével meghatározhatók azon rendszerparaméterek, melyek alapján megadható a szállításból, tárolásból és a forgóeszköz lekötöttségéből adódó költségek által definiált optimális vételár. Amennyiben sikerül a konszignációs szerződésben szereplő árat ezen mindkét fél számára kedvező sávon belül tartani, akkor a konszignációs raktár mind a felhasználó, mind a beszállító számára biztosítja a konszignációs áruk ellátási rendszerének optimális működtetését. Esettanulmányok segítségével validáltam a kidolgozott elméleti modell helyességét [S8-S10].

2.4 Anyagellátás hatékonyságának fokozása cross-docking révén

A termelő és szolgáltató vállalatok a hatékony működés fokozása érdekében igyekeznek csökkenteni logisztikai költségeiket, melynek egyik módja ellátási láncuk optimális kialakítása. Az ellátási lánc folyamatainak optimális működtetése lehetővé teszi a logisztikával szemben támasztott követelmények teljesítését az átfutási idő csökkentése; a logisztikai és technológiai erőforrások rendelkezésre álló kapacitásainak kihasználása; a költségek csökkentése és a nyereség növelése; a folyamatok rugalmasságának növelése; az átláthatóság fokozása; a termékek, szolgáltatások és folyamatok minőségének biztosítása; a belső és külső újrahasznosítás növelése; a károsanyag-kibocsátás csökkentése; tisztább technológiák alkalmazása és a felhasználók elégedettségének növelése révén. A just-in-time stratégia hasznos eszköz a beruházások megtérülésének javítására a készletek csökkentése révén, mivel a húzó-elv alkalmazásával biztosítható, hogy az alkatrészek csak akkor kerüljenek beszállításra, amikor a termelés igényli azokat és abban a mennyiségben, amennyiben szükséges [S11,S12]. A just-in-time anyagellátás hatékonyságának fokozása biztosítható cross-docking alkalmazása révén. A folyamat lényege, hogy a beszállítóktól az átrakási pontra (cross-docking) beérkező egységrakományokat megbontják és a felhasználók által igényelt megfelelő összetételben más alkatrészekkel összekommissiózva új egységrakományt képeznek belőlük, majd így kerülnek kiszállításra a megrendelt alkatrészek a felhasználókhoz. A cross-docking célja az elosztási folyamatban az alkatrészek áramlásának gyorsítása a beszállító és a felhasználó között, úgy hogy közben csökkenti a tárolási időt és egyszerűsíti az anyagmozgatási szükségletet a raktárban [25,26].

A cross-docking koncepció jól használható a just-in-time ellátás esetében, mivel az a beszállítók, a gyártó vállalatok, az elosztóközpontok és a végfelhasználók folyamatos kommunikációján alapul, és a just-in-time ellátás esetében ezt a folyamatos kommunikációt mindenképpen biztosítani kell. A cross-docking folyamatok kialakítása hatással van az egész ellátási lánc hatékonyságára, ezért nagyon fontos optimális kialakítása és működtetése.

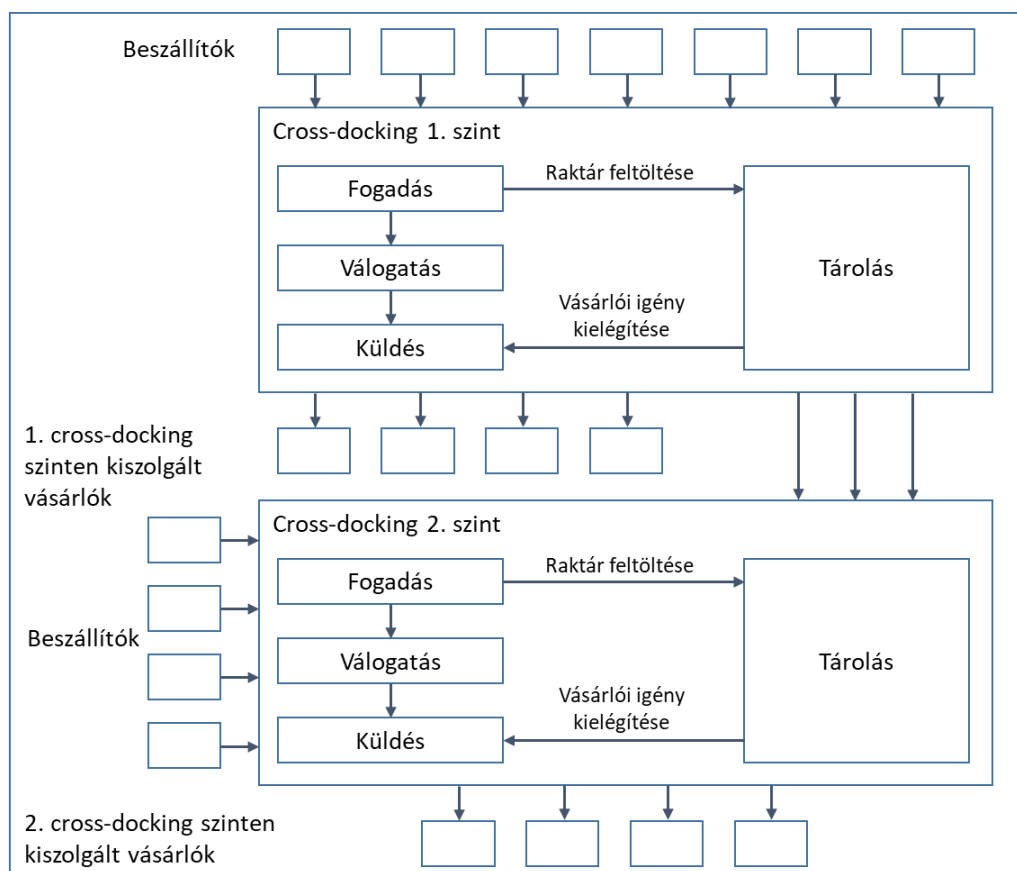
A cross-docking hálózatok optimalizálása igen összetett probléma, különösen a be- és kiszállítási, valamint a rakodási idők, a raktárkapacitások és az anyagmozgatási költségek szempontjából [27]. Bizonyos esetekben a cross-docking műveletek just-in-time és just-in-sequence ütemezése gépütemezési problémaként modellezhető, és különböző metaheurisztikus módszerekkel megoldható [28]. Különböző eszközök és módszerek léteznek, amelyek segítségével optimalizálni lehet a cross-docking folyamatokat és a létesítmény

elrendezését: hangya kolónia optimalizálási algoritmust használnak a cross-docking létesítményeket is tartalmazó elosztóhálózatok modelljének megoldására [29]; metaheurisztikát a többkapus cross-docking rendszerben történő átrakási problémák megoldására [30]; dinamikus programozást a cross-docking létesítményben végzett anyagmozgatási műveletek ütemezésére [31].

Kutatómunkám során azt vizsgáltam, hogyan biztosítható a megfelelő anyagellátás az ellátási lánc optimális kialakítása révén. Napjainkban a globalizáció révén kialakult többszintű ellátási láncok bonyolultságukból adódóan ellátási hálózatoknak tekinthetők, így a kutatómunkám célja egy többszintű ellátási hálózat leírása volt, cross-docking rendszerek alkalmazásával, just-in-sequence ellátás esetén, ahol 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 hogy az igényelt sorrendben kerüljenek beszállításra [S13,S14].

Többszintű cross-docking ellátási rendszer

Az általam kidolgozott többszintű cross-docking ellátási rendszer modelljét a 20. ábra szemlélteti.



20. ábra Többszintű cross-docking ellátási rendszer

Az ellátási rendszer modellje a következő objektumokat tartalmazza: cross-docking létesítmények, amelyek átvevő, válogató, szállító és tároló funkcióval rendelkeznek; beszállítók, akik az alkatrészeket a cross-docking létesítmények különböző szintjeire szállíthatják; vevők, akiket a cross-docking létesítmények különböző szintjeiről lehet ellátni.

A cross-docking révén elérhető legfontosabb előnyök a készletek csökkenése, a raktározási költségek csökkenése, a szállítási költségek csökkenése, a beszállítóktól a felhasználóig tartó átfutási idő csökkenése és a rendelkezésre állás növelése. A fent említett előnyök mellett a cross-docking használatának van két nagyon fontos feltétele: rendelkezésre álló és megfelelő járműflotta működtetése, valamint naprakész információs rendszerre van szükség.

Többszintű cross-docking ellátási rendszer tervezése

A kutatómunkám során a többszintű cross-docking ellátási rendszer matematikai modelljének leírására került sor just-in-sequence ellátás esetén.

A modellben alkalmazott változók és paraméterek magyarázatát a 9. táblázat foglalja össze.

9. táblázat Változók és paraméterek magyarázata

Magyarázat	Jelölés
Alkatrészek	$i = 1 \dots s$
Beszállítók	$j = 1 \dots m$
Cross-docking szintek	$k = 1 \dots p$
Felhasználók	$l = 1 \dots n$
A j. beszállítótól a k. cross-docking szintre beszállított mennyiség az i. alkatrészből	q_{ijk}
Az i. alkatrészből a k. cross-docking szintre beszállított mennyiség	δ_{ik}
Az i. alkatrészből a cross-docking szintekre beszállított mennyiség	β_i
Az l. felhasználó által az i. alkatrészből igényelt mennyiség	r_{il}
Az i. alkatrészből a felhasználók által igényelt összmennyiség	α_i
Szállítási költség a j. beszállító és a k. cross-docking szint között	$KS_{B_j \rightarrow CD_k}$
Szállítási költség a k. és az x. cross-docking szint között	$KS_{CD_k \rightarrow CD_x}$
Szállítási költség a k. cross-docking szint és az l. felhasználó között	$KS_{CD_k \rightarrow F_l}$
Az egy járművön szállított alkatrészek halmaza a j. beszállítótól a k. cross-docking szintre	θ_{jk}
A szállítójármű kapacitása a j. beszállító és a k. cross-docking szint között	$R^{B_j \rightarrow CD_k}$
Az anyagmozgatási költség a k. cross-docking szintre beszállított alkatrészek esetén	$KA_{CD_k}^{be}$
Az anyagmozgatási költség a k. cross-docking szintről kiszállított alkatrészek esetén	$KA_{CD_k}^{ki}$

A k. cross-docking szintről kiszállított mennyiség az i. alkatrészből	ϑ_{ik}
Az anyagmozgatási költség a k. cross-docking szinten (rakodás, egységrakomány-képzés és bontás, stb.)	$KA_{CD_k}^{rak}$
A k. cross-docking szinten mozgatott mennyiség az i. alkatrészből	μ_{ik}
Az anyagmozgató berendezés kapacitása a k. cross-docking szinten	$R_{CD_k}^A$
A k. cross-docking szinten jelentkező raktározási költség	KR^{CD_k}
A hiányköltség az l. felhasználónál	KH^l
Az l. felhasználónál jelentkező raktározási költség	KR^l

A vizsgált többszintű cross-docking ellátási rendszer esetén felírható a beszállítók által a cross-docking rendszerek különböző szintjeire beszállított alkatrészek mennyisége

$$\delta_{ik} = \sum_{j=1}^m q_{ijk} \quad (4.1)$$

valamint a többszintű cross-docking ellátási rendszerbe beszállított alkatrészek mennyisége:

$$\beta_i = \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^m q_{ijk} \quad (4.2)$$

Meghatározhatjuk a felhasználók által megrendelt alkatrész mennyiséget:

$$\alpha_i = \sum_{l=1}^n r_{il} \quad (4.3)$$

Az ellátási hálózat optimális kialakításának célfüggvénye egy költségfüggvény, amely magában foglalja a szállítás, az átrakópontokon jelentkező anyagmozgatás és a raktározás költségeit.

Az optimalizálási feladat feltételeként megadható, hogy a beszállítóktól az egyes cross-docking létesítményekbe szállított alkatrészek össz mennyiségének meg kell egyeznie a felhasználók által igényelt mennyiséggel:

$$\alpha_i = \beta_i \quad (4.4)$$

Ha egy adott alkatrész esetén a megrendelt mennyiség nagyobb, mint a cross-docking rendszerbe beszállított mennyiség, akkor az igényelt mennyiséget nem lehet a felhasználóhoz beszállítani, csak akkor, ha a cross-docking létesítményben van biztonsági készlet. Ha a megrendelt mennyiség kisebb, mint a beszállított, akkor a cross-docking létesítményben extra készlet van, ami extra raktározási költséget okoz.

Az optimalizálási feladat célfüggvénye az összköltségek minimalizálása, beleértve az alkatrészek szállítási költségeit a beszállítóktól a cross-docking létesítmények különböző szintjeihez, a cross-docking létesítmények között és a cross-docking létesítményekből a felhasználókhoz; az anyagmozgatási költségeket a cross-docking létesítmények minden szintjén; az alkatrészek tárolási

költségeit raktárfeltöltés esetén; a készlethiány vagy a későn teljesített megrendelésekből eredő hiányköltségeket; a korábban teljesített megrendelések tárolási költségeit.

A szállítási költség a szállítási útvonalak és a szállítójárművek kapacitásának segítségével határozható meg, a beszállítók, a cross-docking létesítmények és a felhasználók helyzetétől függően:

$$KS = \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^m KS_{B_j \rightarrow CD_k} (\theta_{jk}, R^{B_j \rightarrow CD_k}) + \sum_{k=1}^p \sum_{x=1}^p KS_{CD_k \rightarrow CD_x} (\theta_{kx}, R^{CD_k \rightarrow CD_x}) + \sum_{k=1}^p \sum_{l=1}^n KS_{CD_k \rightarrow F_l} (\theta_{kl}, R^{CD_k \rightarrow F_l}) \quad (4.5)$$

Az anyagmozgatási költség az alkalmazott cross-docking létesítmények száma alapján határozható meg figyelembe véve a beszállítóktól a cross-docking létesítményekbe beszállított *i.* alkatrész mennyiségét, a cross-docking létesítmények között szállított *i.* alkatrész mennyiséget és a cross-docking létesítményekből közvetlenül a felhasználókhoz szállított *i.* alkatrész mennyiségét, valamint a cross-docking létesítmények be- és kirakodást végző berendezéseinek anyagmozgatási kapacitását:

$$KA = \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^s (KA_{CD_k}^{be} (\delta_{ik}, R_{CD_k}^A) + KA_{CD_k}^{ki} (\vartheta_{ik}, R^A) + KA_{CD_k}^{rak} (\mu_{ik}, R_{CD_k}^A)) \quad (4.6)$$

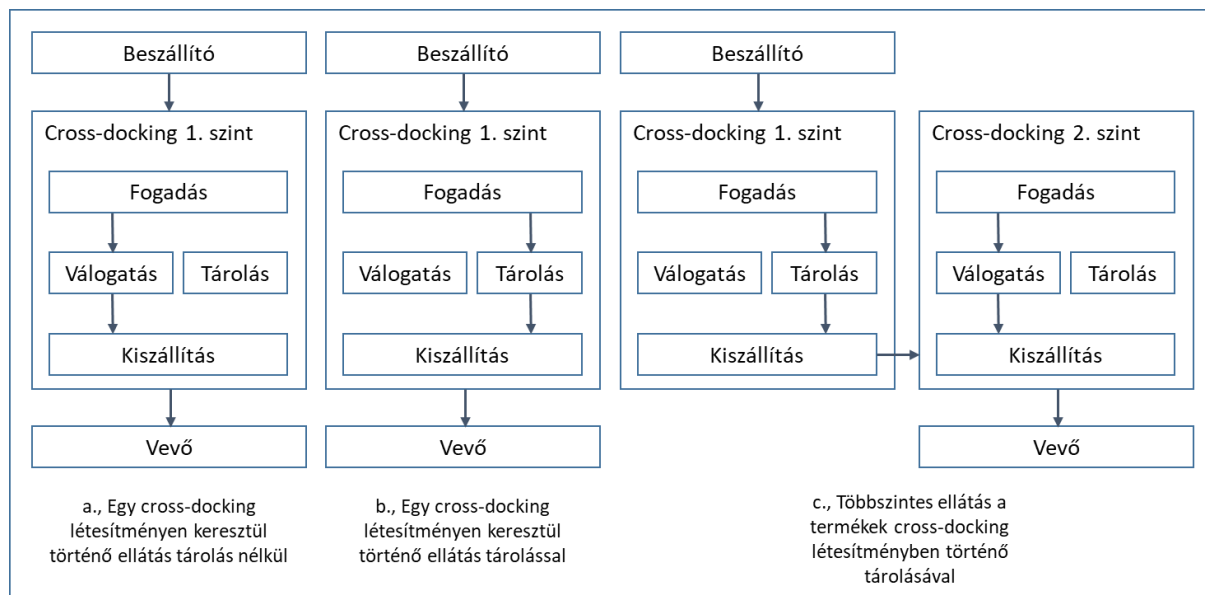
A raktározási idő és az alkatrészek mennyiségének függvényében határozhatjuk meg a készletezési költségeket. A későn teljesített megrendelésekből eredő készlethiány- vagy hiányköltségek a felhasználó számára jelentenek többletköltséget. Ez a keretszerződéstől függően a beszállítók által fizetendő kötbér formájában térülhet meg a felhasználó számára. A korai beszállítás is többletköltségeket okoz a felhasználónál a termelést megelőző extra raktározási idő miatt. Ezek a raktározással kapcsolatos költségek az időablak függvényében határozhatók meg.

Az optimalizálási feladat a költségek összegeként (szállítási, anyagmozgatási, raktározási és a hiány költség) meghatározott célfüggvény minimalizálása:

$$K = KS + KA + \sum_{k=1}^p KR^{CD_k} + \sum_{l=1}^n KH^l + \sum_{l=1}^n KR^l \rightarrow \min. \quad (4.7)$$

Az optimalizálási feladat az optimális időablak kiválasztása és az alkatrészek eljuttatása a beszállítóktól a többszintű cross-docking ellátási rendszeren keresztül a felhasználóhoz. Az ellátási lánc tervezése során nehézségek merülhetnek fel a just-in-sequence szállítás adta speciális feltételek miatt. Nem elég figyelembe venni a felhasználók különböző kéréseinek időablakát, az alkatrészek sorrendje is meghatározott. A tervezési folyamat eredményeként különböző ellátási útvonalakat kapunk (21. ábra). A megoldások első fő iránya egyetlen cross-docking létesítményen keresztül vezet, raktározással vagy anélkül. A

beszállítóktól a felhasználókhoz irányuló anyagáramlás második fő folyamata egynél több cross-docking létesítményen keresztül vezet. E többszintű anyagáramlások célja a szállítási költségek optimalizálása a kapacitáskihasználás növelése révén.



21. ábra Különböző ellátási megoldások többszintű cross-docking rendszer alkalmazása esetén

A just-in-sequence ellátás megköveteli a szállítás pontos ütemezését. E követelmény teljesítéséhez az ellátási láncot integrált vállalati erőforrás-tervezési rendszerrel kell irányítani. A korszerű ERP-rendszerek lehetővé teszik a beszállítók, a cross-docking létesítmények, a szállítmányozók és a felhasználók fent említett érdekeinek figyelembevételét. Az optimalizáló algoritmusnak figyelembe kell vennie az érdekellentéteket, és csökkentenie kell azokat, hogy az ellátási lánc valamennyi partnere maximális elégedettségét biztosítsa.

Esettanulmány

A hagyományos közvetlen ellátás esetében a felhasználók igényeit a beszállítótól a felhasználóhoz szállítják. A just-in-sequence ellátás szükségessé teszi többszintű ellátási lánc megszervezését, ahol a sorrendbe állított igények költséghatékonyan szállíthatók a beszállítóktól a cross-docking létesítményeken keresztül a felhasználókhoz. Az alább ismertetett esettanulmány igazolja, hogy a cross-docking létesítményen alapuló többszintű ellátás csökkentheti a szállítási költségeket, mivel a kívánt sorrendnek megfelelő szállítási igények összeállítása (sequencing) a cross-docking létesítményben történik, így a szállítóeszközök

kihasználtsága növelhető. Az elemzett esettanulmányban a just-in-sequence igények egy 12 hetes időablakra vannak definiálva.

Az esettanulmány első lépéseként a közvetlen ellátás esetében adódó futási teljesítményt kell meghatározni, mely 10772 km. Közvetett szállítás esetén jelentősen növelhető a szállítási erőforrások (teherautók) kihasználtsága a cross-docking létesítmény és a felhasználók között. A 10. táblázat a teherautók által a cross-docking létesítménytől a felhasználóig megtett kilométereket mutatja be.

10. táblázat Szállítási útvonalak hossza a cross-docking létesítmény és a felhasználó közötti relációkban

Időablak	Mennyiség [ER]	Szükséges járműszám [db]	Megtett távolság [km]
1	488	3	603
2	361	2	402
3	351	2	402
4	382	2	402
5	298	2	402
6	377	2	402
7	397	2	402
8	175	1	201
9	284	2	402
10	388	2	402
11	398	2	402
12	387	2	402
Összesen:			4824

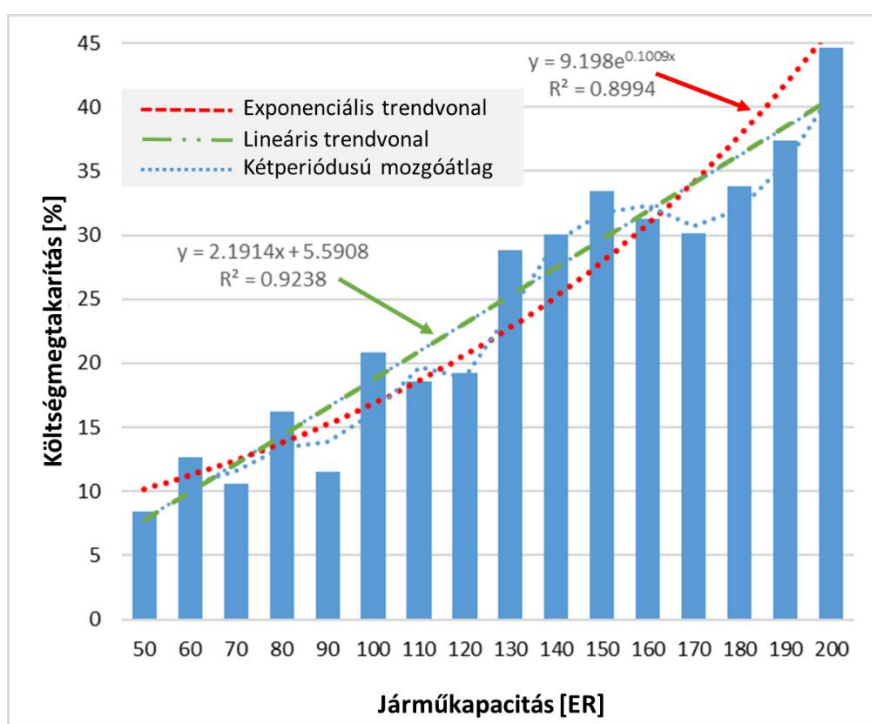
A 11. táblázat a cross-docking létesítmény és a felhasználók közötti szállítási távolságokat ábrázolja.

11. táblázat Szállítási útvonalak hossza a beszállítók és a cross-docking létesítmény közötti relációkban

Időablak	ID_01	ID_02	ID_03	ID_04	ID_05	ID_06
1	0	0	30	12	7	26
2	25	40	30	12	7	26
3	25	40	30	12	7	26
4	25	40	30	12	0	0
5	0	40	30	12	7	26
6	25	40	30	12	0	0
7	0	40	30	12	7	0
8	0	40	0	12	7	26
9	0	40	0	12	7	26
10	0	40	30	12	7	0
11	0	40	30	12	7	0
12	25	0	30	12	7	26
Összesen:						1221

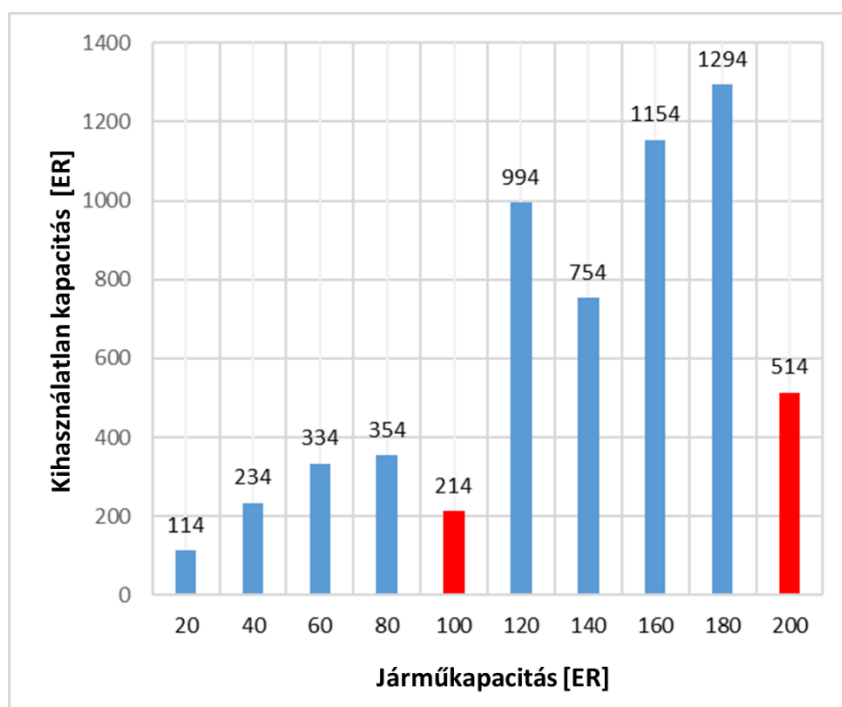
Amint azt a számítási eredmények igazolják, a cross-docking létesítmény alapú, just-in-sequence szállítás körülbelül 44%-os szállítási költségcsökkenést eredményezett a vizsgált esettanulmány során. A cross-docking létesítmény elhelyezkedésének elemzése azt mutatja, hogy azokat a beszállítókat közelében célszerű elhelyezni, különösen just-in-sequence beszállítás esetén, mert így nagyobb megtakarítás érhető el, mintha azokat a felhasználók közelében kerülnek elhelyezésre.

A rendszer paraméterei és a felhasznált erőforrások paraméterei jelentősen befolyásolják az erőforrások és az üzemeltetési stratégiák hatását a költségmegtakarításokra és a teljesítményre. Ahogy azt a 22. ábra szemlélteti, a szállítójárművek kapacitása befolyásolja a várható költségmegtakarítást. Ez azt jelenti, hogy a just-in-sequence igények várható ütemezésétől és mennyiségétől függően, a szükséges szállítási erőforrások optimalizálhatók a teljesítmény javítása és a szállítási költségek csökkentése érdekében, miközben a szállítójárművek kihasználtsága jelentősen növelhető.



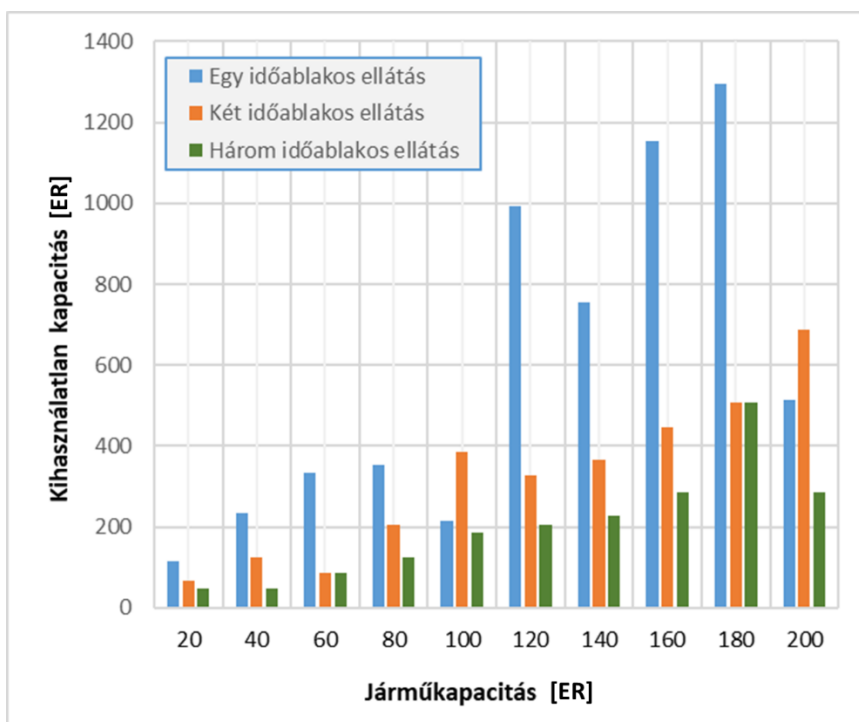
22. ábra Szállítójárművek kapacitásának hatása a megtakarításra cross-docking létesítményen keresztül történő just-in-sequence beszállítás esetén

Mint ahogy azt a 23. ábra mutatja, a szállítójárművek kapacitása befolyásolja a kihasználtságot. Az ábra piros oszlopai olyan lokális optimumokra mutatnak példákat, ahol a szállítójárművek kihasználtsága jobb, mint a két szomszédos megoldás esetében.



23. ábra Szállítójárművek kapacitásának hatása a ki nem használt kapacitásokra cross-docking létesítményen keresztül történő just-in-sequence beszállítás esetén

Ahogy azt a 24. ábra mutatja, a just-in-sequence szállítási igények szállítási intenzitása is befolyásolja a szállítási erőforrások kihasználtságát.



24. ábra Szállítási intenzitás hatása a járművek kihasználatlan kapacitására cross-docking létesítményen keresztül történő just-in-sequence beszállítás esetén

Tudományos eredmény

Kidolgoztam egy többszintű cross-docking ellátási rendszer modelljét és matematikai leírását just-in-sequence ellátás esetén. Az ellátási rendszer modellje tartalmazza a beszállítókat, akik termékeiket a cross-docking létesítmények különböző szintjeire szállíthatják. Ezen ellátási lánc optimalizálásának célfüggvénye egy költségfüggvény, amely magában foglalja a szállítás, az anyagmozgatás és a raktározás költségeit. Az említett költségfüggvény segítségével lehetővé válik az alkatrészellátás nagyléptékű tervezése. A kidolgozott modellt és módszert esettanulmányok segítségével validáltam [S13].

2.5 Keverési technológiák logisztikai szempontú optimalizálása

A keverési technológiák nagyon fontos szerepet játszanak a termelő vállalatok működésében. A keverési technológiákat alkalmazó gyártási folyamatok tervezése és működtetése a gyártáshoz kapcsolódó logisztika egy speciális területét képviseli, mivel a technológiai és logisztikai paraméterek integrált megközelítését igényli. A Miskolci Egyetem Logisztikai Intézetében folyó kutatás-fejlesztési tevékenység nem csupán a diszkrét technológiát használó vállalatokat érinti, hanem az Intézet olyan vállalatok számára is végzett kutatási tevékenységet, ahol a folyamatos technológiák jellemzőek, így a munkásságom során elkerülhetetlen volt a folyamatos technológiák logisztikai vonatkozásainak megismerése. Ezen K+F munkák során fordult érdeklődésem a keverési technológiák felé, ugyanis az ipari gyakorlat és a szakirodalmi források arról győzték meg, hogy a keverési technológiák tervezése alapvetően technológiai szempontok alapján történik, és a technológiát érintő paraméterek meghatározásakor kevés figyelmet fordítanak az alapanyagok beszerzését érintő logisztikai szempontokra.

A petrokémiai termékek többségének előállítása jellemzően keverési technológiákon alapul, ami adott számú komponens keverését jelenti, de a keverési technológiák a gyártás más ágazataiban is megjelennek [32]. A keverési problémákat általában más optimalizálási problémákkal kombinálják. A nyerstej gyűjtési rendszerének tervezése a keverési- és gyűjtési pontok komplexitása miatt ilyen integrált problémát képvisel, ahol a telepítési és útvonaltervezési feladatok mellett magát a keverési technológiát is optimalizálni kell [33].

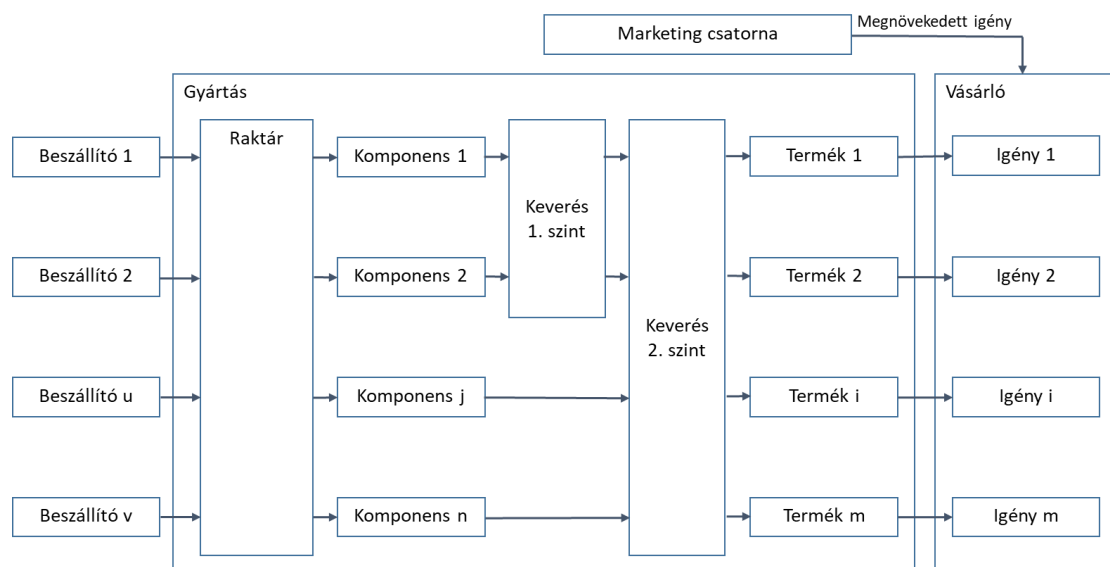
A keverési problémák optimalizálásakor nagy figyelmet kell fordítani a rendelkezésre álló készletekre, hiszen az alkalmazott készletezési stratégia nagymértékben befolyásolhatja a technológiai szempontból optimálisnak tekinthető megoldást [34].

A többperiódusú keverési problémák a hagyományos keverési technológiák kiterjesztéseként főleg a petrokémia területén terjedtek el [35], ahol a hatékony keverési sémák kombinatorikus és nem konvex problémaként írhatók le, de léteznek vegyes egész és nem egész lineáris programozási dekompozíciós megoldási módszerek is [36]. Ha a keverendő komponensek tulajdonságai sztochasztikusak (mérési hibákból adódóan), akkor a keverési optimalizáló algoritmus támogatásához folyamatközi minőségelemzésre van szükség a paraméterek legjobb értékeinek és azok felső és alsó határértékeinek kiszámításához [37].

Kutatómunkám során azt vizsgáltam, hogy milyen modellek és módszerek segítségével lehetséges a keverési technológiákat alkalmazó gyártási folyamatok logisztikai szempontú optimalizálása, mely tulajdonképpen a technológiai és logisztikai szempontok integrált kezelését jelenti. Kutatási tevékenységem során egy olyan integrált modellt dolgoztam ki, mely alapvetően az optimális beszerzési stratégia meghatározására szolgál az előállítandó termékkel szemben támasztott minőségi elvárások, a potenciálisan rendelkezésre álló komponensek minősége, a beszerzési, technológiai és logisztikai költségek vonatkozásában [S15,S16]. Az integrált modellt jól definiált feltételek esetén akár lineáris programozási feladatként is meg lehet oldani, míg komplex, nem-lineáris állapottér esetében heurisztikus algoritmusok alkalmazása lehet célszerű [38,39].

Keverési technológiát alkalmazó termelési környezet ellátási lánc

A keverési technológiákat alkalmazó termelési környezet egy többszintű ellátási láncra alapul. A kívánt arányban összekeverendő komponenseket több beszállítótól lehet beszerezni. A vásárolt komponenseket szállítják és tárolják, ezért a beszerzés szállítási, tárolási és anyagmozgatási költségeket eredményez. A keverési technológia feldolgozza az összetevőket és késztermékeket állít elő. A készterméket jellemző minőségi paramétereknek adott az alsó és felső határértéke. A 25. ábra egy többszintű keverési technológiát alkalmazó folyamatot mutat be. Marketingcsatornák révén befolyásolható a vásárlói igény, mely nem csupán mennyiségi, hanem minőségi szempontból is hatással lehet a vásárlói szokásokra.



25. ábra Többszintű keverési technológiát alkalmazó termelési környezet ellátási láncának modellje

Az ellátási lánc modellezése keverési technológia esetén

E fejezet keretében egy egyszintű keverési technológiát alkalmazó termelési környezetet kiszolgáló ellátási lánc matematikai modellje kerül bemutatásra. A modellben alkalmazott változók és paraméterek magyarázatát a 12. táblázat foglalja össze.

12. táblázat Változók és paraméterek magyarázata

Magyarázat	Jelölés
Késztermékek	$i = 1 \dots m$
Komponensek	$j = 1 \dots n$
Beszállítók	$u = 1 \dots v$
Késztermékek és komponensek minőségi paraméterei	$l = 1 \dots g$
Marketing tevékenységhez tartozó médiacsatornák száma	$k = 1 \dots t$
A k . médiacsatorna hatékonysága az i . termék esetén	$E = [e_{ik}]$
Médiaidő alsó határa k . médium esetén	a_k^{min}
Médiaidő felső határa k . médium esetén	a_k^{max}
Médiamegjelenések száma a k . médiumban	a_k
Logisztikai költségek az u . beszállító esetén	k_u^{L1}
A j . komponens és az i . késztermék összerendelése	$H^{CF} = [h_{ij}^{CF}]$
Az u . beszállító és a j . komponens összerendelése	$H^{SC} = [h_{uj}^{SC}]$
Az i . késztermékből jelentkező vevői igény	q_i
Az i . késztermék ára	s_i
A j . komponens fajlagos beszerzési költsége	p_j
A j . komponens fajlagos feldolgozási költség	k_j^G
A k . médiamegjelenés fajlagos költsége	k_k^M
Az egyes késztermékekhez vásárolt komponensek mennyisége	x_{ij}
Maximális gyártási kapacitás	α^{max}
Maximális gyártási kapacitás késztermékenként	α_i^{max}
Minimális gyártási kapacitás késztermékenként	α_i^{min}
A j . komponensből vásárolható mennyiség alsó korlátja	β_j^{min}
A j . komponensből vásárolható mennyiség felső korlátja	β_j^{max}
A j . komponens l . paramétere	δ_{jl}
A késztermékek paramétereinek alsó korlátja	δ_{il}^{min}
A késztermékek paramétereinek felső korlátja	δ_{il}^{max}

Kétféle döntési változó fogalmazható meg ezen probléma esetében: egyrészt, hogy az egyes késztermékekhez honnan és milyen mennyiségű összetevőt kell vásárolni (β_{ij}^u), másrészt, hogy a marketing tevékenység során mely médiumban hány reklámspotot (reklámidőt) kell allokálni (a_k) a kereslet fokozása érdekében.

Ennek az optimalizálási modellnek a célfüggvénye a teljes nyereség maximalizálása, amely függ a végtermékekből származó bevételtől, a komponensek beszerzési költségétől, a marketingköltségtől, a komponensek feldolgozásának költségeitől és a logisztikával kapcsolatos költségektől, mint például a szállítási, raktározási és anyagmozgatási költségek:

$$N = A - KV - KM - KG - KL \rightarrow \max. \quad (5.1)$$

A célfüggvény összetevői a következőképpen határozhatók meg. A késztermékekből származó bevételt a rögzített vevői igények és a vásárolt reklámok által jelzett további igények határozzák meg:

$$A = \sum_{i=1}^m s_i (q_i + \sum_{k=1}^t a_k e_{ik}) \quad (5.2)$$

A komponensek beszerzési költségei a fajlagos beszerzési költségektől, az anyagjegyzéktől (BOM) és a késztermékek felépítését leíró hozzárendelési mátrixtól függnak:

$$KV = \sum_{j=1}^n (p_j \sum_{i=1}^m (q_i + \sum_{k=1}^t a_k e_{ik}) h_{ij}^{CF}) \quad (5.3)$$

A kiszervezés lehetősége és a make or buy döntés nagy hatással van a BOM-ra. A szakirodalomban léteznek speciális megközelítések a termelési mélység optimalizálására, amelyek alkalmasak az optimalizált BOM leírására a logisztikai műveletek és a logisztikával kapcsolatos költségek szempontjából.

A marketing költségek a médiamegjelenések számától és az egyes médiumok fajlagos hirdetési költségeitől függnak:

$$KM = \sum_{k=1}^t a_k k_k^M \quad (5.4)$$

A feldolgozási költség a fajlagos költségektől és a késztermék előállításához szükséges feldolgozandó összetevők (komponensek) mennyiségétől függ. A keverési technológiától függően (egyszintű vagy többszintű keverés) a költségfüggvény különböző formákat ölthet. Egyszintű keverés esetén a feldolgozási költségek a következőképpen írhatók le:

$$KG = \sum_{j=1}^n (k_j^G \sum_{i=1}^m (q_i + \sum_{k=1}^t a_k e_{ik}) h_{ij}^{CF}) \quad (5.5)$$

A logisztikával kapcsolatos költségek a szállítás, a készletezés (raktározás) és az anyagmozgatás költségeinek összegeként határozhatók meg:

$$KL = \sum_{u=1}^v (k_u^{L1} + \sum_{j=1}^n h_{uj}^{SC} k_{uj}^L \sum_{i=1}^m (q_i + \sum_{k=1}^t a_k e_{ik}) h_{ij}^{CF}) \quad (5.6)$$

A döntési változók és a célfüggvény meghatározása után már csak a beszerzendő komponensek mennyiségét és a vásárolt médiamegjelenések számát befolyásoló korlátozásokat kell meghatározni. A szokásos vásárlói igények és a

médiamegjelenések által megváltozott (alapvetően többletként indukált) igények összege nem haladhatja meg a teljes termelési kapacitás értékét:

$$\sum_{i=1}^m (q_i + \sum_{k=1}^t a_k e_{ik}) \leq \alpha^{max} \quad (5.7)$$

A keverési kapacitás (termelési kapacitás) korlátként határozható meg. A standard vevői igények és a médiamegjelenések által megváltozott (alapvetően többletként indukált) igények összegének a termelési kapacitás alsó és felső határai között kell lennie az egyes késztermékek esetében:

$$\alpha_i^{min} \leq q_i + \sum_{k=1}^t a_k e_{ik} \leq \alpha_i^{max} \quad (5.8)$$

A beszállítók korlátozásokat határozhatnak meg a vásárolt komponensek mennyiségére vonatkozóan. Az egyes késztermékekhez vásárolt komponensek mennyiségének az alsó és felső korlátok között kell lennie:

$$\beta_{uj}^{min} \leq \beta_{uj} \leq \beta_{uj}^{max} \quad (5.9)$$

A különböző médiacsatornákon elhelyezett médiamegjelenések növelhetik a vásárlók igényeit, de a megvásárolt médiamegjelenések számának egy alsó és felső határ között kell lennie:

$$a_k^{min} \leq a_k \leq a_k^{max} \quad (5.10)$$

A hagyományos keverési probléma alapvető korlátozása az a technológiai jellegű előírás, mely a késztermék minőségével kapcsolatos. A komponensek paramétereiből származó, késztermékre vonatkozó minőségi paramétereknek az alsó és felső határértékek között kell lenniük:

$$\delta_{il}^{min} \leq \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij} \delta_{jl}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}} \leq \delta_{il}^{max} \quad (5.11)$$

A döntési változók csak nemnegatív értékeket vehetnek fel, ezért a döntési változókhoz előjelkorlátozást rendelünk:

$$a_k, \beta_{uj} \geq 0 \quad (5.12)$$

ahol

$$\beta_{uj} = h_{uj}^{SC} \sum_{i=1}^m x_{ij} \quad (5.13)$$

Esettanulmányok

A fent leírt LP-modell lehetővé teszi a döntési változók optimális értékének meghatározását, mint például a marketing költségek (a megvásárolt médiamegjelenések mennyisége az egyes médiacsatornán) és a komponensek optimális hozzárendelése a késztermékekhez a termékek minőségének biztosítása érdekében.

Az első scenárió a keverési technológiákon alapuló gyártás általános modelljét írja le. Adott három termék és három komponens, a késztermékek három különböző médiacsatornán kommunikálhatók. A médiacsatornák hatékonysága ismert, melyet a médiamegjelenések által indukált keresletnövekedés jellemez. Az optimalizálás bemenő paramétereit a 13. táblázat foglalja össze.

13. táblázat Az első scenárió bemenő paramétereit

Paraméter	P1	P2	P3	Paraméter	C1	C2	C3
Igény [db]	1000	1000	1000	Fajlagos vásárlási költség [\$]	2.25	2.10	3.55
Fajlagos ár [\$]	30	30	15	Fajlagos szállítási költség [\$]	1.15	2.25	4.95
Fajlagos anyagkezelési költség [\$]	10	10	5	Fajlagos tárolási költség [\$]	0.25	1.25	0.85
Termelési kapacitás korlát [db]	1100-2500	1050-2500	1100-2500	Fajlagos anyagkezelési költség [\$]	0.50	1.20	2.20
Első paraméter alsó és felső korlátja	6-10	7-10	7-10	Fajlagos feldolgozási költség [\$]	1.25	3.25	2.45
Második paraméter alsó és felső korlátja	1-8	1-10	1-6	Paraméter 1, 2	6; 7	8; 5	7; 2
Médiamegjelenés hatékonysága csatornánként [db/megjelenés]	25; 19; 27	8; 15; 20	10; 9; 30	Vásárolható mennyiségre vonatkozó korlátok [db]	100-3000	100-4000	100-4000
Médiacsatorna 1			Médiacsatorna 2		Médiacsatorna 3		
Fajlagos ár [\$]	40			60		50	
Rendelhető médiamegjelenések korlátai [db]	10; 100			10; 100		10; 100	

A definiált LP feladatot megoldva a 14. táblázatban összefoglalt eredmények adódnak a bemutatott módszerrel. A célfüggvény értéke (a profit) 48455\$, a költség 84985\$ és a bevétel 133440\$.

14. táblázat Az első scenárió megoldása

	Késztermék 1	Késztermék 2	Késztermék 3
Komponens 1 [db]	1863	693	444
Komponens 2 [db]	549	695	654
Komponens 3 [db]	88	10	2
Médiamegjelenés az első médiacsatornán [db]	60	1	1
Médiamegjelenés a második médiacsatornán [db]	0	10	0
Médiamegjelenés a harmadik médiacsatornán [db]	0	12	2

A második scenárió a gyártás/összeszerelés módosított, keverési technológiákon alapuló modelljét írja le. A késztermékek, a komponensek és az értékesítési csatornák száma nem változik, de a logisztikához és a feldolgozáshoz kapcsolódó

fajlagos költségek és a minőségi elvárásokat definiáló alsó és felső paraméterkorlátok változnak. A második scenárió bemeneti paramétereit a 15. táblázat foglalja össze.

15. táblázat A második scenárió bemenő paramétereit

Paraméter	P1	P2	P3	Paraméter	C1	C2	C3
Igény [db]	1000	1000	1000	Fajlagos vásárlási költség [\$]	6.25	0.85	3.55
Fajlagos ár [\$]	20	20	20	Fajlagos szállítási költség [\$]	2.25	4.65	2.65
Fajlagos anyagkezelési költség [\$]	5	10	15	Fajlagos tárolási költség [\$]	0.10	0.25	0.25
Termelési kapacitás korlát [db]	1100-2500	1050-2500	1100-2500	Fajlagos anyagkezelési költség [\$]	0.20	0.20	0.20
Első paraméter alsó és felső korlátja	1-9	2-9	3-9	Fajlagos feldolgozási költség [\$]	1.25	3.25	2.45
Második paraméter alsó és felső korlátja	3-7	3-8	3-9	Paraméter 1, 2	6; 7	8; 5	7; 2
Médiamegjelenés hatékonysága csatornánként [db/\$]	20; 20; 30	12; 10; 12	5; 5; 5	Vásárolható mennyiségre vonatkozó korlátok [db]	100-3000	100-4000	100-4000
Médiacsatorna 1			Médiacsatorna 2		Médiacsatorna 3		
Fajlagos ár [\$]	40			30		50	
Rendelhető médiamegjelenések korlátai [db]	0; 100			0; 100		0; 100	

A második scenárió megoldását a 16. táblázat foglalja össze. A döntési változók a médiacsatornák ellátási lánc szerkezetére gyakorolt hatását mutatják. A célfüggvény értéke (profit) 7700\$, míg a költségek 85300\$ és a bevétel 93000\$. Mindkét scenárió esetében a teljes termelési (keverési) kapacitás felső határa 5000 darab volt. A bemeneti paraméterek lehetővé tették az optimális megoldás megtalálását úgy, hogy a termelési kapacitás teljes mértékben kihasználható a vásárlói igények kielégítésére.

16. táblázat A második scenárió megoldása

	Késztermék 1	Késztermék 2	Késztermék 3
Komponens 1 [db]	98	2	1
Komponens 2 [db]	670	347	365
Komponens 3 [db]	1732	701	734
Médiamegjelenés az első médiacsatornán [db]	0	0	0
Médiamegjelenés a második médiacsatornán [db]	0	5	20
Médiamegjelenés a harmadik médiacsatornán [db]	50	0	0

A leírt matematikai modell lehetővé teszi a keverési technológiákat alkalmazó gyártóüzemek ellátási láncának optimalizálását. A leírt integrált modell mind a

termékparaméterek alsó és felső határával leírt minőségét, mind az ellátási lánc költségeit figyelembe veszi.

Tudományos eredmény

Kidolgoztam a keverési technológiák tervezésének egy olyan integrált modelljét, mely a hagyományos értelemben vett technológiai paramétereken túlmenően figyelembe veszi a késztermékbe beépülő komponensek ellátási láncában megvalósuló logisztikai tevékenységek (szállítás, tárolás, anyagkezelés) költségeit. A kidolgozott modellt és módszert esettanulmányok segítségével validáltam [S15,S16].

3. Összefoglalás

A PhD fokozat megszerzését követő több mint húsz évben számos olyan alap- és alkalmazott kutatási projektben vehettem részt, melyek a logisztikai rendszerek tervezésére fókuszáltak. Kutatásaim során a termelési és szolgáltatási folyamatokhoz kapcsolódóan számos olyan részterületet érintettem, melyek optimális kialakítása és működtetése nélkül a hatékony működés elképzelhetetlen. Az ezen területeken elért eredményeim az alábbi pontokban foglalhatók össze:

1. Kidolgoztam egy olyan valós idejű optimalizálási módszert, mely kihasználva a digitális iker technológia adta lehetőségeket, alkalmas kiberfizikai termelési környezetben a karbantartási stratégia valós idejű optimalizálására. Egy funkcionális modellben összefoglaltam azon főbb technológiai megoldásokat, melyek a valós idejű optimalizálás megvalósításához szükségesek: intelligens szerszámok, intelligens termékek, okos szenzorok, edge computing, digitális iker, folyamatszimuláció [S3]. Kidolgoztam egy matematikai modellt és annak többfázisú optimalizálási algoritmusát. Az optimalizálási algoritmus első fázisa a kiinduló karbantartási stratégia meghatározására szolgál Markov döntési folyamat, Howard stratégiai iterációs módszere és értékmeghatározó egyenletek segítségével. A második fázis a valós idejű optimalizálás, mely értékmeghatározó egyenleteken és evolúciós heurisztikán alapszik. A kidolgozott modellt és módszert numerikus scenáriók segítségével validáltam [S2].
2. Kidolgozásra került egy olyan elnyelő Markov-láncon alapuló szimulációs módszer, melynek révén vizsgálható, hogy a humán erőforrás fejlesztési stratégiák hogyan befolyásolják egy vállalat jövőbeli humán erőforrás struktúráját. A modell tranzitív és elnyelő állapotokat egyaránt tartalmaz az előléptetési folyamat leírása érdekében. A különböző adatokkal elvégzett számítások igazolták a humán erőforrás gazdálkodási stratégiák fontosságát: a stratégia számszerűsítésével és módosításával lehetséges az optimális alkalmazotti létszám és struktúra kialakítása [S5-S7].
3. Kidolgozásra került a konszignációs raktárak létrehozása során alkalmazható olyan döntéstámogató módszer, melynek segítségével meghatározhatók azon rendszerparaméterek, melyek alapján megadható a szállításból, tárolásból és a forgóeszköz lekötöttségéből adódó költségek által definiált optimális vételár. Amennyiben sikerül a konszignációs szerződésben szereplő árat ezen mindkét fél számára kedvező sávon belül tartani, akkor a konszignációs raktár mind a felhasználó, mind a beszállító számára biztosítja a konszignációs áruk ellátási

- rendszerének optimális működtetését. Esettanulmányok segítségével validáltam a kidolgozott elméleti modell helyességét [S8-S10].
4. Kidolgoztam egy többszintű cross-docking ellátási rendszer modelljét és matematikai leírását just-in-sequence ellátás esetén. Az ellátási rendszer modellje tartalmazza a beszállítókat, akik termékeiket a cross-docking létesítmények különböző szintjeire szállíthatják. Ezen ellátási lánc optimalizálásának célfüggvénye egy költségfüggvény, amely magában foglalja a szállítás, az anyagmozgatás és a raktározás költségeit. Az említett költségfüggvény segítségével lehetővé válik az alkatrészellátás nagyléptékű tervezése. A kidolgozott modellt és módszert esettanulmányok segítségével validáltam [S13].
 5. Kidolgoztam a keverési technológiák tervezésének egy olyan integrált modelljét, mely a hagyományos értelemben vett technológiai paramétereken túlmenően figyelembe veszi a késztermékbe beépülő komponensek ellátási láncában megvalósuló logisztikai tevékenységek (szállítás, tárolás, anyagkezelés) költségeit. A kidolgozott modellt és módszert esettanulmányok segítségével validáltam [S15,S16].

4. Summary

In the present habilitation thesis work, results of research carried out after my PhD dissertation entitled „Design methods of just-in-time supply” are summarized according to the following topics:

1. Development of a digital twin technology-based real-time approach for maintenance policy optimization. Development of a functional model based on Industry 4.0 technologies. Development of a multi-phase optimization algorithm including Markov decision processes, Howard’s policy optimization, value description, and evolutionary heuristics.
2. Development of the model framework of Markov-chain simulation of a human resource deployment problem. Mathematical description of different human resource deployment strategies with sub-diagonal and super-diagonal promotion matrices. Analysis of different human resource strategies and the Markovian human resource deployment process of a company.
3. Development of a novel decision support approach for the design and operation of consignment storage-based supply solutions. The proposed approach makes it possible to find the optimal system parameters for both the suppliers and the users.
4. Development of the functional and mathematical model of multi-tier, cross-docking facility-based supply solutions for just-in-sequence supply. The objective function of the model is a cost function including logistics related costs (transportation, material handling, warehousing).
5. Development of a novel approach to optimize blending technologies from both technological and logistic aspects point of view. The integrated model focuses on both the parameters of the quality parameters of the blended products and the costs of logistics operations, while not only the quality of components, but also the constraints related to logistics processes are taken into consideration.

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.

Pályafutásom során aktívan részt vettem a logisztikai mérnöki alap- és mesterszak akkreditációs folyamatában, a tantervek kidolgozásában, majd az elmúlt két évben mindkét szak vonatkozásában a tantervek megújításában. Kutatási eredményeim beépítésre kerültek az alap-, mester- és doktori képzésben oktatott tantárgyakba, melyek közül szeretném kiemelni a következőket:

- Beszerzési és elosztási logisztikai folyamatok (GEALT157M)
- Beszerzési és elosztási logisztika (GEALT412)
- Globális logisztika (GEALT418)
- Globális logisztika, ellátási láncok és újrahasznosítási logisztika (GEALT245M)
- Ipar 4.0 és logisztika (GEALT173M)
- Logisztikai menedzsment (GEALT250M)
- Logisztikai rendszerek (GEALT081-B)
- Termelési és szolgáltatási logisztika (GEALT259N)

Kutatási eredményeimet számos kutatás-fejlesztési munka kapcsán sikerült hasznosítani, melyek közül az alábbiakat kívánom kiemelni:

- Az AZOV különleges gazdasági övezet integrált logisztikai rendszere kialakítása (Mariupoli Állami Tengeri Kereskedelmi Kikötő)
- Raktározási, beszerzési és elosztási rendszerek felülvizsgálatának módszertana (ÉMÁSZ Rt.)
- A Diósgyőri Nemesacélmű UHP elektrokemence szilárdbetéttellátás logisztikai rendszerének fejlesztése (Diósgyőri Nemesacélmű)
- A Dunafer logisztikai alrendszerének fejlesztése (Dunafer Energiaszolgáltató Kft.)
- Az IBM Storage Products Kft. disk gyártórendszere vezérlőkártya szerelés, minőség-ellenőrzés és csomagolás logisztikai folyamatának intenzifikálása (IBM Storage Products Kft.)
- Az ALCOA-KÖFÉM Kft. anyagáramlási-logisztikai rendszerének felülvizsgálata és korszerűsítési javaslatok kidolgozása (ALCOA-KÖFÉM Kft.)
- A 6S300 hajtómű alkatrészeinek kanban rendszer szerint történő gyártásának termelésütemezési koncepciójának kidolgozása (ZF Hungária Kft.)

A kutatási eredményeim nemzetközi kutatási és együttműködési projekteken is hasznosításra kerültek, melyek közül az alábbiakat kívánom kiemelni:

- Development of a Bologna-Based Master Curriculum in Resource Efficient Production Logistics, Erasmus+585967-EPP-1-2017-1-DE-EPPKA2-CBHE-JP.
- Reinforce the scientific excellence and innovation capacity in logistic technology of the University of Miskolc, H2020-EU4.B-691942.
- Development of a Management Concept for Optimising the Location Strategy in Urban and Suburban Commercial Properties. EU-5-OPTIAS, EVK4-CT-2002-30007.
- Entwicklung einer Open-Source-Planungsplattform für das Gebiet der Distributionslogistik, DAAD D-51/02.
- Closing the loop of electronic products and domestic appliances from product planning to end-of-life technologies, BRITE EURAM BRRT-CT98-5076.
- Die theoretischen Grundlagen der Steuerung von Materialflußsystem, TÉT D-40/96.

Kutatási eredményeimet a tehetséggondozás keretében is hasznosítottam és kívánom hasznosítani a jövőben is. Alap- és mesterszakos hallgatók tudományos diákköri munkájuk keretében végeznek kutatásokat szakmai irányítással, melynek eredményei TDK dolgozatok és közös publikációk formájában jelennek meg. A doktori képzés keretében olyan doktoranduszok irányítását láthattam el és látom el jelenleg is, akiknek a kutatási témája szorosan illeszkedik a tézisfüzetben felvázolt tématerületekhez; a sikeres együttműködést doktori védések és számos közös publikáció is igazolja.

A negyedik ipari forradalom olyan mértékben átalakítja a termelési és szolgáltatási tevékenységeket, és az azokhoz kapcsolódó logisztikai folyamatokat, hogy ezen technológiák alkalmazása megkerülhetetlenné válik a korszerű ellátási láncok kialakítása és működtetése során, ezért jövőbeli terveim között szerepel ezen technológiák mélyebb megismerése és alkalmazásuk hatásainak elemzése különböző logisztikai feladatok megoldása során. Ezt az a tény is indokolja, hogy a logisztikai rendszerek fejlesztését célzó ipari megbízások során egyre nagyobb igény mutatkozik ezen technológiák hatékony alkalmazására.

6. Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet szeretném kifejezni Cselényi József és Illés Béla professzor uraknak, akik szakmai tanácsaikkal segítették kutatásaimat és támogatták szakmai fejlődésemet. Hálás szívvel gondolok vissza Lévai Imre és Kulcsár Béla professzor urakra, akiktől rengeteget tanulhattam oktatói-kutatói pályafutásom során. Köszönet illeti Dietrich Ziems és Reinhardt Jünemann professzor urakat, akik révén már fiatal kutatóként is bekapcsolódhattam nemzetközileg elismert kutató műhelyek munkájába pályázatok, projektek és részképzések keretében. Köszönetemet fejezem ki a Logisztikai Intézet vezetőjének, Tamás Péter professzor úrnak és az intézeti kollektívának a szakmai és erkölcsi támogatásért. Végül, de nem utolsó sorban köszönettel tartozom Családomnak azért a támogatásért, amivel lehetővé tették a tézisfüzetben vázolt szakmai-tudományos tevékenység elvégzését.

7. Kutatási témákhoz kapcsolódó fontosabb saját publikációk

- [S1] Cselényi, J.; Bányai, Á.; Illés, B.; Németh, J. Alvállalkozókra épülő, hálózatszerű karbantartási, beruházási, hálózatépítési, tevékenységek beszerzési logisztikai rendszerének néhány működtetési stratégiája és matematikai modellezése. *Mechatronika, Anyagtudomány: a Miskolci Egyetem Közleménye* **2003**, 1(1), 181–196.
- [S2] Bányai, Á. Energy consumption-based maintenance policy optimization. *Energies* **2021**, 14(18), 5674. <https://doi.org/10.3390/en14185674>
- [S3] Bányai, Á. Supply Chain: A Modeling-Based Approach for Cyber-Physical Systems. In: Bányai, T.; Bányai, Á.; Kaczmars, I. (szerk.) *Supply Chain - Recent Advances and New Perspectives in the Industry 4.0 Era*. London, Egyesült Királyság: IntechOpen, **2022**, pp. 173–202. <https://doi.org/10.5772/intechopen.105527>
- [S4] Bányai, Á. Das virtuelle Logistikzentrum als Koordinator der logistischen Aufgaben. In: Bányai, T., Cselényi, J. (szerk.) *Modelling and optimization of logistic systems: Theory and practice*. Miskolci Egyetem, **1999**, pp. 42–50.
- [S5] Bányai, T.; Landschützer, C.; Bányai, Á. Humán erőforrás struktúra vizsgálata Markov láncokkal. *Gépgyártás* **2018**, 57(1-2), 15-24.
- [S6] Bányai, T.; Landschützer, C.; Bányai, Á. Markov-chain simulation-based analysis of human resource structure: how staff deployment and staffing affect sustainable human resource strategy. *Sustainability* **2018**, 10(10), 3692. <https://doi.org/10.3390/su10103692>
- [S7] Landschützer, C.; Bányai, T.; Bányai, Á. Personaleinsatz und Personalbesetzung: Auswirkung auf die Human-Ressource-Strategie. In: Dunckert, R. *Jahrbuch Logistik 2020: Schwerpunktthema 2020: Personal in Logistik*. Wuppertal, Németország: Unikat Werbeagentur GmbH., 2020, pp. 64–67.
- [S8] Bányai, Á.; Bányai, T.; Cselényi, J. Mikor és kinek éri meg a konszignációs raktár létesítése? *Logisztikai Évkönyv* **2002**, 10:13–20.
- [S9] Bányai, Á.; Bányai, T.; Cselényi, J. When and whom is profitable a consignment store? In: Katalinic, B. (szerk.) *DAAAM International Scientific Book*. Bécs, Ausztria, DAAAM International. **2003**, pp. 53–60.
- [S10] Bányai, Á.; Bányai, T.; Illés, B. Optimization of consignment-store-based supply chain with black hole algorithm. *Complexity* **2017**, 6038973. <https://doi.org/10.1155/2017/6038973>
- [S11] Bányai, Á. Modelling of just-in-time supply chain solutions. *Academic Journal of Manufacturing Engineering* **2022**, 20(3): 84–92.
- [S12] Bányai, Á. Optimisation of intermediate storage network of JIT purchasing. In: Nowicka-Skowron, M. (szerk.) *Proceedings of the II. Central European Conference on Logistics 2011*. Czestochowa, Lengyelország: Politechnika Czestochowska, **2011**, pp. 167–172.
- [S13] Bányai, Á.: Just in sequence supply with multilevel cross docking. *Advanced Logistic Systems: Theory and Practice* **2013**, 7(2), 5–12.
- [S14] Bányai, Á. Material requirement planning for build-to-sequence supply: a multi-level optimisation approach. *Journal of Production Engineering* **2022**, 25(1), 25–30. <https://doi.org/10.24867/JPE-2022-01-025>

- [S15] Nagy, G.; Bányai, Á.; Illés, B.; Glistau, E. Analysis of supply chain efficiency in blending technologies. In: Jármái, K., Bolló, B. (szerk.) *Vehicle and Automotive Engineering 2. VAE* **2018**. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75677-6_23
- [S16] Bányai, Á.; Illés, B.; Schenk, F. Supply chain design of manufacturing processes with blending technologies. *Solid State Phenomena* **2017**, 261, 509–515. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.261.509>

8. Felhasznált szakirodalom

- [1] Telek P.; Bányai, T. Complex design of integrated material flow systems. *Advanced Logistic Systems - Theory and Practice* **2013**, 7, 105–110.
- [2] Andre L. 35 Latest Maintenance Statistics for 2021: Data, Adoption & Strategies. Elérhető: <https://financesonline.com/maintenance-statistics/> (Letöltve: 2021.07.22.)
- [3] Khanna A.; Gautam P.; Sarkar B.; Jaggi C.K. Integrated vendor–buyer strategies for imperfect production systems with maintenance and warranty policy. *Raior Operations Research* **2020**, 54, 435–450. <https://doi.org/10.1051/ro/2019029>
- [4] Sett B.K.; Sarkar S.; Sarkar B. Optimal buffer inventory and inspection errors in an imperfect production system with preventive maintenance. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2017**, 90, 545–560. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9359-9>
- [5] Ye, Y.; Grossmann, I.E.; Pinto, J.M.; Ramaswamy, S. Integrated optimization of design, storage sizing, and maintenance policy as a Markov decision process considering varying failure rates. *Computers & Chemical Engineering* **2020**, 142, 107052. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107052>
- [6] Savolainen J.; Urbani M. Maintenance optimization for a multi-unit system with digital twin simulation. *Journal of Intelligent Manufacturing* **2021**, 32, 1953–1973. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01740-z>
- [7] Vaurio, J.K. On time-dependent availability and maintenance optimization of standby units under various maintenance policies. *Reliability Engineering & System Safety* **1997**, 56, 79–89. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(96\)00132-9](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(96)00132-9)
- [8] Houdek P.; Koblovský P. Behavioural economics of organization: Employees and managers. *Ekonomie a Management* **2017**, 20(1), 4–15. <https://doi.org/10.15240/tul/001/2017-1-001>
- [9] Mazur, B. Sustainable human resource management in theory and practice. *Economics and Management* **2014**, 1, 158–170. <https://doi.org/10.12846/j.em.2014.01.09>
- [10] Delgoshaei, A.; Ali, A. An applicable method for scheduling temporary and skilled-workers in dynamic cellular manufacturing systems using hybrid ant colony optimization and tabu search algorithms. *Journal of Industrial and Production Engineering* **2017**, 34, 425–449. <https://doi.org/10.1080/21681015.2017.1360405>
- [11] Ibrahim O.; Nossei A. A combined AHP and source of power schemes for prioritising requirements applied on a human resources. *MATEC Web of Conferences* **2016**, 76, 04016. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167604016>
- [12] Labuttis J. Ergonomics as element of process and production optimization. *Procedia Manufacturing* **2015**, 3, 4168–4172. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.391>
- [13] Shibin K.T.; Gunasekaran A.; Papadopoulos T.; Childe S.J.; Dubey R.; Singh T. Energy sustainability in operations: an optimization study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2016**, 86, 2873–2884. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8398-6>

- [14] Ardeleanu M.P. Corporate environmental sustainability. *Quality - Access to Success* **2011**, 12(1), 347–351.
- [15] Huber, V.L.; Brown, K.A. Human resource issues in cellular manufacturing: A sociotechnical analysis. *Journal of Operations Management* **1991**, 10(1), 138–159. [https://doi.org/10.1016/0272-6963\(91\)90039-Z](https://doi.org/10.1016/0272-6963(91)90039-Z)
- [16] Zahran S.K.; Jaber M.Y.; Zaroni S. The consignment stock case for a vendor and a buyer with delay-in-payments. *Computers & Industrial Engineering* **2016**, 98, 333–349. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.06.010>
- [17] Hackett S.C. Consignment contracting. *Journal of Economic Behavior & Organization* **1993**, 20(2), 247–253. [https://doi.org/10.1016/0167-2681\(93\)90093-5](https://doi.org/10.1016/0167-2681(93)90093-5)
- [18] Bylka S. Non-cooperative consignment stock strategies for management in supply chain. *International Journal of Production Economics* **2013**, 143, 424–433. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.07.018>
- [19] Bazan E.; Jaber M.Y.; Zaroni S.; Zavanella L.E. Vendor Managed Inventory (VMI) with Consignment Stock (CS) agreement for a two-level supply chain with an imperfect production process with/without restoration interruptions. *International Journal of Production Economics* **2014**, 157, 289–301. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.02.010>
- [20] Li T.; Sethi S.P.; Zhang J. Supply diversification with isoelastic demand. *International Journal of Production Economics* **2014**, 157, 2–6. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.07.014>
- [21] Batarfi R.; Jaber M.Y.; Zaroni S. Dual-channel supply chain: A strategy to maximize profit. *Applied Mathematical Modelling* **2016**, 40, 9454–9473. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.06.008>
- [22] Srinivas, C. Consignment inventory simulation model for single vendor-multi buyers in a supply chain. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology* **2019**, 10(2), 341–349. <https://doi.org/10.34218/IJARET.10.2.2019.03311>
- [23] Zhang, T.; Hao, Y.; Zhu, X. Consignment inventory management in a closed-loop supply chain for deteriorating items under a carbon cap-and-trade regulation. *Computers and Industrial Engineering* **2022**, 171, 108410. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108410>
- [24] Zhang, P.; Pang, K.W.; Yan, H. Coordinating inventory sharing with retailer's return in the consignment contracts. *International Journal of Production Research* **2022**, 60(4), 1196–1209. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1854485>
- [25] Kiani Mavi, R.; Goh, M.; Kiani Mavi, N.; Jie, F.; Brown, K.; Biermann, S.; Khanfar, A. Cross-Docking: A Systematic Literature Review. *Sustainability* **2020**, 12, 4789. <https://doi.org/10.3390/su1211478922>
- [26] Coindreau, M.A.; Gallay, O.; Zufferey, N.; Laporte, G. Inbound and outbound flow integration for cross-docking operations. *European Journal of Operational Research* **2021**, 294(3), 1153–1163. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.02.031>
- [27] Chen, P.; Guo, Y.; Lim, A.; Rodrigues, B. Multiple crossdocks with inventory and time windows. *Computers and Operations Research* **2006**, 33(1), 43–63. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.06.002>

- [28] Li, Y.; Lim, A.; Rodrigues, B. Crossdocking – JIT scheduling with time windows. *Journal of the Operational Research Society* **2004**, 55(12), 1342–1351. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601812>
- [29] Musa, R.; Arnaout, J. P.; Jung, H. Ant colony optimization algorithm to solve for the transportation problem of cross docking network. *Computers and Industrial Engineering* **2010**, 59(1), 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.03.002> [14]
- [30] Alpan, G.; Ladier, A. L.; Larbi, R.; Penz, B. Heuristic solution for transshipment problems in a multiple door cross docking warehouse. *Computers and Industrial Engineering* **2011**, 61(2), 402–408. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.09.010>
- [31] Alpan, G.; Larbi, R.; Penz, B. A bounded dynamic programming approach to schedule operations in a cross docking platform. *Computers and Industrial Engineering* **2011**, 60(3), 385–396. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.08.012>
- [32] Yunus N.A.; Manan Z.A. Optimizations of blending-based products. *Computer Aided Chemical Engineering* **2017**, 39, 475–486. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63683-6.00017-4>
- [33] Paredes-Belmar G.; Lüer-Villagra A.; Marianov V.; Cortés C.E. The milk collection problem with blending and collection points. *Computers and Electronics in Agriculture* **2017**, 134, 109–123. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.01.015>
- [34] Moreno E.; Rezakhah M.; Newman A.; Ferreira F. Linear models for stockpiling in open-pit mine production scheduling problems. *European Journal of Operational Research* **2017**, 260(1), 212–221. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.12.014>
- [35] Kolodziej S.P.; Grossmann I.E.; Furman K.C.; Sawaya N.W. A discretization-based approach for the optimization of the multiperiod blend scheduling problem. *Computers & Chemical Engineering* **2013**, 53, 122–142. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.01.016>
- [36] Lotero I.; Trespalacios F.; Grossmann I.E.; Papageorgiou D.J. An MILP-MINLP decomposition method for the global optimization of a source based model of the multiperiod blending problem. *Computers & Chemical Engineering* **2016**, 87, 13–35. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.12.017>
- [37] Anosov A.A.; Efitov G.L.; Zusman S.D. N-line gasoline blending optimization with in-flow blend quality analysis. *Automation and Remote Control* **2017**, 78(3), 515–524. <https://doi.org/10.1134/S0005117917030110>
- [38] Wan L.; Biegler L.T. Structured regularization for barrier NLP solvers. *Computational Optimization and Applications* **2017**, 66(1), 401–424. <https://doi.org/10.1007/s10589-016-9880-7>
- [39] Baumrucker B.T.; Renfro J.G.; Biegler L.T. MPEC problem formulations and solution strategies with chemical engineering applications. *Computers & Chemical Engineering* **2008**, 32(12), 2903–2913. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2008.02.010>