

dc_924_14

**ÉRZÉKENYSÉGVIZSGÁLAT TERMELÉSTERVEZÉSI ÉS
TERMELÉSÜTEMEZÉSI MODELLEKNÉL**

MTA DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

KOLTAI TAMÁS

A MŰSZAKI TUDOMÁNY KANDIDÁTUSA

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
BUDAPEST, 2015

dc_924_14

TARTALOM

1. BEVEZETÉS	1
2. KUTATÁSI PROBLÉMÁK ÉS KUTATÁSI MÓDSZEREK.....	2
3. TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA.....	3
3.1. Lineáris programozási modellek érzékenységvizsgálatával kapcsolatos eredmények	3
3.2. Rugalmas gyártórendszerek kapacitáselemzésével kapcsolatos eredmények.....	5
3.3. Egyszerű gyártósor-kiegyenlítési modellekkel kapcsolatos eredmények.....	7
3.4. Az átfutási idő érzékenységvizsgálatával kapcsolatos eredmények	8
3.5. Egyetlen erőforrást tartalmazó rendszer ütemezésével kapcsolatos eredmények	9
4. ÖSSZEFOGLALÁS	10
5. A TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEKET TARTALMAZÓ JELENTŐSEBB PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA	12
5.1 A tudományos eredményekhez kapcsolódó lektorált folyóiratcikkek	12
5.2. A tudományos eredményekhez kapcsolódó megjelent konferencia-előadások	13
5.3. A tudományos eredményekhez kapcsolódó egyéb publikációk.....	14
6. IRODALOMJEGYZÉK.....	15
7. FÜGGELÉK: A TÉZISEKNÉL ALKALMAZOTT JELÖLÉSEK LISTÁI	17

dc_924_14

1. BEVEZETÉS

A mérnöki tevékenység egyik kiemelten fontos feladata a termelő- és szolgáltatórendszerek gazdasági szempontból is hatékony működtetése. Henry Towne, az Amerikai Gépészmérnök Társaság (American Society of Mechanical Engineers = ASME) 1886-ban tartott egyik ülésén ismertette *“A mérnök, mint közgazdász”* című tanulmányát. Ennek során azt javasolta, hogy az ASME keretein belül egy külön szekciót hozzanak létre azon gépészmérnökök részére, akik a termelés gazdasági aspektusai iránt is érdeklődnek [I33]. Részben Towne javaslatára indult gyors fejlődésnek a mérnöki tevékenység egy új ága, amelyet angol nevén Industrial Engineering-nek (IE) neveznek [I14]. E mérnöki terület legjelentősebb szakmai szervezete, az Institute of Industrial Engineering (IIE) hivatalosan elfogadott definíciója szerint [I31]:

„Az industrial engineering (IE) emberek, anyagok, információk, gépek és berendezések, valamint energia által alkotott integrált rendszerek tervezésével, megvalósításával és működésének javításával foglalkozik. Ennek során egyrészt a matematika, élettelen természettudományok, valamint társadalomtudományok területére tartozó speciális ismereteket és képességeket, továbbá a mérnöki elemzés és tervezés elveit és módszereit egyesíti annak érdekében, hogy meghatározza, vagy előre jelezze, valamint értékelje az ilyen rendszerek működésével kapcsolatos eredményeket.”

E doktori értekezés témája a termelés tervezés és termelésütemezés területéhez tartozik, amely szerves része az IE tevékenységnek. A termelés tervezés és termelésütemezés a rendelkezésre álló erőforrások termelési feladatokhoz rendelésével foglalkozik rövid és középtávon. A termelési terv meghatározza, hogy az egyes termékekből, alkatrészekből mikor és mennyit gyártsunk és ehhez a szükséges erőforrások mekkora mennyiségét használjuk fel.

A termelés tervezés és termelésütemezés bonyolult problémáinak megoldását operációkutatási modellek támogatják. A modellek eredménye alapján hozott döntés végrehajtásának kezdeti időpontjára azonban számos olyan feltétel, paraméter, amelyeket a modellalkotásnál alkalmaztunk, megváltozhat. Néhány változás mértéke indokolttá teheti a működés módosítását. Más változások azonban nem feltétlenül befolyásolják a megvalósítandó megoldást, bár a működés végeredményére hatással lehetnek. A terv *robosztussága*, a kapott eredmény *érzékenysége* néhány meghatározó modellparaméter változására tehát fontos információ a döntéshozók számára (lásd például [I23], [I27], [I29]).

Az *érzékenységvizsgálat* segítségével információt kaphatunk bizonyos paraméterek változásának egy megoldásra kifejtett hatásáról. Az érzékenységvizsgálat célja annak számszerű meghatározása, hogy a tervezési fázisban alkalmazott paraméterértékek és/vagy feltételek megváltozása hogyan befolyásolja bizonyos, a döntéshozatal számára fontos működési mutatók értékét. Az érzékenységvizsgálat elvégzéséhez használható módszer függ attól, hogy milyen modellt alkalmazunk a tervezés során, hogy mely paraméterek változását vizsgáljuk, illetve attól is, hogy mely működési mutató változását elemezzük.

Gyakran az érzékenységvizsgálat a vizsgált paraméterváltozás hatását leíró függvény egyszerű *analitikus elemzésével* elvégezhető. A termelésmenedzsment egyik klasszikus érzékenységvizsgálata az optimális rendelésítétel-nagyság (EOQ) robusztusságának elemzése, amely szinte minden termelésmenedzsmenttel foglalkozó egyetemi tankönyvben megtalálható [I2], [I28], [I35].

A vizsgált működési mutató változtatására épülő analitikus elemzés azonban nem minden esetben lehetséges. Gyakran az alkalmazott *modell tulajdonságainak vizsgálata* segítheti a robusztussággal kapcsolatos információ meghatározását. Lineáris programozási modellek alkalmazásakor például a szimplex módszer információt szolgáltat az optimális célfüggvényérték bizonyos paraméterek szerinti gradienséről és a gradiens érvényességi tartományáról [I16]. Diszkrét rendszerek szimulációjakor pedig perturbációelemzéssel kaphatunk információt egyes működési mutatók érzékenységéről [I18].

Komplex problémák esetén sokszor a célfüggvényérték változásának egy meghatározott tartományban történő *numerikus* vizsgálata vezet csak eredményre. Az ilyen vizsgálatok azonban jelentős mennyiségű számítás elvégzését igénylik, és csak ritkán vezetnek *általános* következtetések levonásához.

Az érzékenységvizsgálat mind elméleti mind pedig gyakorlati szempontból rendkívül fontos, ezért jelentős kutatások segítik az érzékenységi információk meghatározását a termelési folyamatokkal kapcsolatos modellek esetén (lásd például [I13], [I15], [I30], [I34]).

Az érzékenységvizsgálat alkalmazása a termelési döntések támogatásakor azonban nem csak lehetőség, hanem egyben szükségszerűség is. Az adatbányászat elméletének és technológiájának fejlődése a vállalati folyamatokkal kapcsolatos döntések területén is új kihívásokat jelent [I19]. Davenport szerint a vállalati folyamatokkal kapcsolatos nagy mennyiségű adat gyűjtése és feldolgozása a versenyképesség egyik jelentős forrása lehet [I8]. Ha ezeket az adatokat (a vevők viselkedéséről, a folyamatok működéséről, a környezeti feltételek változásáról) hatékonyan gyűjtik és megfelelő (statisztikai, operációkutatási) módszerekkel dolgozzák fel, továbbá az eredmények hasznosulni tudnak a döntéshozatali folyamatban, akkor a vállalat a versenytársakkal szemben előnybe kerülhet. A nagytömegű adat gyűjtésére és feldolgozására épülő adatbányászat fejlődése egy új menedzsmentparadigma megjelenéséhez vezetett, amelyet magyarul *kvantitatív elemzésekre épülő versenyzésnek* nevezhetünk (competing on analytics) [I9], [I10].

A működéssel kapcsolatos nagy mennyiségű információ könnyű elérhetősége, valamint az információ feldolgozására alkalmas számítástechnikai környezet fejlettsége tehát lehetőséget teremt az érzékenységvizsgálati információk előállításához. Ugyanakkor az érzékenységvizsgálati eredményeket igényli is a versenyképesség érdekében folyamatait állandóan javítani kívánó vállalati környezet.

2. KUTATÁSI PROBLÉMÁK ÉS KUTATÁSI MÓDSZEREK

Az értekezés összefoglalja a termelésstervezési és termelésütemezési modellek eredményének érzékenységvizsgálatával kapcsolatos, az elmúlt 25 évben elért fontosabb kutatási eredményeimet. Az értekezés a következő öt kutatási probléma megoldását tárgyalja:

1.) Lineáris programozási modelleket gyakran használnak a termelésstervezés támogatásához. Lineáris termelésstervezési modelleknél, degenerált optimális megoldás esetén azonban a hagyományos LP algoritmusokkal menedzsmentszempontról helytelen érzékenységvizsgálati eredményeket kapunk [I11], [I12], [I20]. Megvizsgáltam, hogy az ilyen esetekben kapott félrevezető érzékenységvizsgálati információknak mi az oka és azok hogyan korrigálhatók.

2.) Rugalmas gyártórendszereknél egy alkatrész több eltérő gyártási útvonalon előállítható. Az alkatrészek gyártási útvonalakhoz rendelése befolyásolja a gyártórendszer kapacitását. Gyakran azonban a kapacitással kapcsolatos döntéseket már akkor meg kell hozni, amikor az alkatrészek gyártási útvonalakhoz rendelése még nem ismert. Ezekben az esetekben a hagyományos, az úthozzárendelésre épülő gépkapacitás-feltételek nem alkalmazhatók [I4], [I32], [T1]. Megvizsgáltam, hogy rugalmas gyártórendszerek kapacitása hogyan határozható meg akkor, amikor az alkatrészek gyártási útvonalai még nem ismertek, továbbá hogy a kapott eredmény mennyire érzékeny a tervezési paraméterek változására.

3.) Egyszerű gyártósorok esetén gyakran 0-1 matematikai programozási modellekkel oldják meg a tevékenységek munkahelyekhez rendelését. E modellek alkalmazásának egyik korlátja, hogy azok számos, a gyakorlatban jelentkező feltételt nem vesznek figyelembe [I5]. A feltételek között kiemelten fontos a munkaerő képzettsége [I7], [I26]. Az egyszerű gyártósor-kiegyenlítési modellekbe integrálhatóan, általánosan megfogalmaztam a munkaerő képzettségére vonatkozó feltételeket és vizsgáltam e feltételek hatását az optimális

megoldásra. Vizsgáltam továbbá, hogy a gyártósr-kiegyenlítési probléma megoldását hogyan befolyásolja a gyártási mennyiség változása.

4.) Termelési folyamatok ütemezésekor diszkrét szimuláció alkalmazható az ütemezési probléma megoldásának támogatására. Az ütemezés során használt ütemezési kritérium (működési mutató) érzékenysége egyes kiemelten fontos paraméter változására fontos információ a döntéshozó számára. Bizonyos feltételek teljesülése esetén perturbációelemzéssel meghatározható az átfutási idő valamely műveleti idő szerinti gradiense, de nem ismert e gradiens érvényességi tartománya [I17], [I18]. Perturbációelemzéssel vizsgáltam az átfutási és várakozási idő érzékenységet egyes műveleti idők változására termelésütemezési problémák esetén, és meghatároztam a kapott érzékenységi információ érvényességi tartományát.

5.) Termelésütemezési problémáknál a készlettartási költség minimalizálása fontos célkitűzés [I1], [I2], [I6]. A készlettartási költség meghatározása azonban többféle módon történhet. Megvizsgáltam, hogy egy egyetlen erőforrásból álló ütemezési probléma optimális megoldását hogyan befolyásolja a készlettartási költség számításának módja. Analitikusan és empirikusan is vizsgáltam a levezetett ütemezési szabályok robusztusságát.

A fentiekben megfogalmazott kutatási problémák vizsgálatának elsődleges eszköze a matematikai modellezés. Az első három kutatási probléma megoldásakor matematikai programozási modelleket alkalmaztam. Az első esetben folytonos, a második esetben diszkrét, a harmadik esetben pedig 0-1 változós lineáris programozási feladat megoldása és az eredmények vizsgálata volt a cél. A matematikai programozási feladatokat a STORM döntéstámogató szoftver felhasználásával, valamint a Lingo matematikai programozási szoftver segítségével oldottam meg. A Lingo használatakor az input adatok és a végeredmény tárolása az Excel táblázatkezelő szoftverben történ a kapott eredmények további feldolgozásának megkönnyítése érdekében. A lineáris programozási modellek koordinált, a kidolgozott algoritmusok szerinti többszöri megoldását Visual Basic Application (VBA) szubrutinok segítségével szerveztem meg.

A negyedik kutatási probléma esetében a matematikai modellezés eszköze a diszkrét szimuláció. A szimulációs modelleket a SIMAN IV szimulációs szoftver segítségével készítettem el. A szimuláció során szükséges számításokat az *event blokkok* felhasználásával Fortranban írt szubrutinok végezték.

Végezetül az ötödik kutatási probléma egy kombinatorikus feladat megoldását tette szükségessé. A felcserélési (swaping) algoritmusokra épülő optimális megoldások ebben az esetben az Excel segítségével könnyen előállíthatók.

Az eredmények ellenőrzéséhez és vizsgálatához a szakirodalomból vett, és már megoldott egyszerű mintafeladatokat, saját fejlesztésű tesztfeladatokat, valamint valós gyakorlati problémákat használtam. Az eredmények értékelésében és gyakorlati alkalmazhatóságának vizsgálatában fontos szerepet töltött be többek között az ENSIDESA spanyol acélgyártó üzem, a GE Lighting Tungsum gépgyártó üzeme, az Olympia Kerékpár Kft. kerékpár összeszerelő üzeme, valamint a Kalendart naptárgyártó vállalkozás.

3. TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A következőkben összefoglalom a 2. pontban felsorolt öt kutatási problémával kapcsolatos, az MTA értekezésben részletesen ismertetett legfontosabb tudományos eredményeimet. Az öt probléma eredményeit a következőkben külön pontokban ismertetem.

3.1. Lineáris programozási modellek érzékenységvizsgálatával kapcsolatos eredmények

A lineáris programozási szoftverek érzékenységvizsgálati eredményei az optimális bázis érzékenységre vonatkoznak. Segítségükkel azt határozzuk meg, hogy egy célfüggvény-

együtthathó vagy egy jobb oldali paraméter mely tartományon belül változhat úgy, hogy az optimális megoldáshoz tartozó bázis ne változzon. Degenerált optimális megoldás esetén azonban a bázis változása nem feltétlenül jelenti a vizsgált döntési változó megváltozását, tehát a kapott érzékenységi információ a döntéshozó számára félrevezető lehet.

A lineáris programozási modellek érzékenységvizsgálati eredményeinek matematikai és menedzsmentszemponitú értelmezése közötti ellentmondás feloldása érdekében az érzékenységvizsgálati eredmények három típusát definiáltam és kidolgoztam egy algoritmust, amely alkalmas a III. típusú érzékenységi információk meghatározására.

1/1. tézis

Lineáris programozási modelleknél az optimális megoldás érzékenységvizsgálati eredményeinek meghatározásához az érzékenységi információk három típusát definiáltam:

I. típusú érzékenység: Az I. típusú érzékenység egy bizonyos modellparaméter azon tartományát határozza meg, amely tartományon belül maradv a egy optimális *bázis* a paraméter változása ellenére is optimális marad.

II. típusú érzékenység: A II. típusú érzékenység egy bizonyos modellparaméter azon tartományát határozza meg, amely tartományon belül maradv a egy primál és duál optimális megoldás *pozitív változói* a paraméter változása ellenére is pozitívak maradnak, tehát ugyanazok a tevékenységek maradnak aktívak.

III. típusú érzékenység: A III. típusú érzékenység egy bizonyos modellparaméter azon tartományát határozza meg, amely tartományon belül maradv a a célfüggvény-érték függvénynek a vizsgált paraméter szerinti *gradiense* a paraméter változása ellenére is változatlan marad.

1/2. tézis

A *III. típusú* érzékenységi információk számításához kidolgoztam egy algoritmust, amely az 1. táblázatban összefoglalt LP modellek megoldására épül. A táblázatban található modellek segítségével a célfüggvény-együtthathók (OFC) és a jobb oldali paraméterek (RHS) *III. típusú* érzékenységi tartományai egyaránt meghatározhatók.

Az I. típusú érzékenységvizsgálat az LP modellek hagyományosan elterjedt érzékenységvizsgálatát jelenti.

A *III. típusú* érzékenységi információ a vizsgált döntési kritérium optimális értékének érzékenységét határozza meg (például egy kapacitás milyen mértékű változása esetén állandó a fajlagos célfüggvényérték-változás) és a vizsgált paraméter lehetséges változásának *legtágabb* tartományát jelöli ki.

A II. típusú érzékenységi információ akkor használható, amikor a menedzsment az optimális működés egy fontos *jellemzőjének* érzékenységét vizsgálja (például ugyanazok a gépek alkotják a szűk keresztmetszetet). Ebben az esetben a III. típusú vizsgálat során kapott érvényességi tartomány *szűkítése* történik az optimális megoldás vizsgálni kívánt jellemzőjét kifejező feltételek segítségével. A vizsgálat elvégzéséhez az 1. táblázat modelljei szintén felhasználhatók, kiegészítve az optimális megoldás előírt jellemzőjét kifejező feltételeket.

Az 1. táblázatban alkalmazott jelölések listáját a függelék F1. táblázata tartalmazza.

A három érzékenységvizsgálat-típus definícióját és részletes magyarázatát a [T17], [T36] publikációk tartalmazzák. A *III. típusú* érzékenységi információk számítására kidolgozott algoritmus leírása a [T13], [T32], [T33] munkákban található. Az érzékenységvizsgálati információk értelmezésével, a kapott eredmények jelentőségével a termelésstervezési modellek kapcsán a [T2], [T11], [T32], [T41] publikációk foglalkoznak.

1. táblázat: Az érzékenységvizsgálathoz szükséges további LP modellek

	Maximális csökkenés	Maximális növekedés
Célfüggvény-együtthatók érzékenységvizsgálata (OFC)	$\mathbf{A}^T \underline{\mathbf{y}} \geq \underline{\mathbf{c}} + \gamma_i \mathbf{e}_i$ $\underline{\mathbf{b}}^T \underline{\mathbf{y}} = OF^* + \gamma_i x_i^* \quad (1)$ $\gamma_i \leq 0$ $\text{Min}(\gamma_i);$ Optimális megoldás: γ_i^-	$\mathbf{A}^T \underline{\mathbf{y}} \geq \underline{\mathbf{c}} + \gamma_i \mathbf{e}_i$ $\underline{\mathbf{b}}^T \underline{\mathbf{y}} = OF^* + \gamma_i x_i^* \quad (2)$ $\gamma_i \geq 0$ $\text{Max}(\gamma_i);$ Optimális megoldás: γ_i^+
Bal oldali árnyékár érzékenységvizsgálata ($\delta < 0$) (v_j^-)	$\mathbf{A}\underline{\mathbf{x}} \leq \underline{\mathbf{b}} + \delta \mathbf{e}_j + \xi_j \mathbf{e}_j$ $\underline{\mathbf{c}}^T \underline{\mathbf{x}} = OF^* + \xi_j y_j^* \quad (3)$ $\xi_j \leq 0$ $\text{Min}(\xi_j)$ Optimális megoldás: ξ_j^-	$\mathbf{A}\underline{\mathbf{x}} \leq \underline{\mathbf{b}} + \delta \mathbf{e}_j + \xi_j \mathbf{e}_j$ $\underline{\mathbf{c}}^T \underline{\mathbf{x}} = OF^* + \xi_j y_j^* \quad (4)$ $\xi_j \geq 0$ $\text{Max}(\xi_j)$ Optimális megoldás: ξ_j^+
Jobb oldali árnyékár érzékenységvizsgálata ($\delta > 0$) (v_j^+)	$\mathbf{A}\underline{\mathbf{x}} \leq \underline{\mathbf{b}} + \delta \mathbf{e}_j + \xi_j \mathbf{e}_j$ $\underline{\mathbf{c}}^T \underline{\mathbf{x}} = OF^* + \xi_j y_j^* \quad (5)$ $\xi_j \leq 0$ $\text{Min}(\xi_j)$ Optimális megoldás: ξ_j^-	$\mathbf{A}\underline{\mathbf{x}} \leq \underline{\mathbf{b}} + \delta \mathbf{e}_j + \xi_j \mathbf{e}_j$ $\underline{\mathbf{c}}^T \underline{\mathbf{x}} = OF^* + \xi_j y_j^* \quad (6)$ $\xi_j \geq 0$ $\text{Max}(\xi_j)$ Optimális megoldás: ξ_j^+

3.2. Rugalmas gyártórendszerek kapacitáselemzésével kapcsolatos eredmények

Rugalmas gyártórendszereknél egy alkatrész több eltérő gyártási útvonalon állítható elő. Az alkatrészek gyártási útvonalakhoz rendelése azonban befolyásolja a gyártórendszer kapacitását. Gyakran a kapacitással kapcsolatos döntéseket már akkor meg kell hozni, amikor az alkatrészek gyártási útvonalhoz rendelése (routing) még nem ismert. Az ilyen esetek vizsgálatára kidolgoztam egy kapacitáselemzési modellt, amely a gépkapacitás helyett a művelettípus-halmaz kapacitásának meghatározására épül. Megvizsgáltam továbbá, hogy a kapacitásfeltételek teljesülése mennyire érzékeny a kapacitásigény és a gépkapacitás megváltozására.

2/1. tézis

Művelettípusként definiálom a műveleteknek egy olyan halmazát, amelyhez tartozó műveletek a gépek egy meghatározott halmazán belül bármely gépen elvégezhetők. A művelettípus-halmazt a művelettípusok egy meghatározott részhalmaza alkotja.

A k művelettípus-halmaz *felső* kapacitáskorlátjának meghatározására a következő összefüggést vezettem le:

$$u_k = \sum_{\{k' | S_{k'} \in S_k^*\}} \sum_{m=1}^M c_m \cdot z_{k'm} \quad k=1, \dots, K \quad (7)$$

A k művelettípus-halmaz *alsó* kapacitáskorlátjának meghatározására a következő összefüggést vezettem le:

$$l_k = \sum_{\{k' | S_{k'} \in S_k'\}} \sum_{m=1}^M c_m \cdot z_{k'm} \quad k=1, \dots, K \quad (8)$$

Megmutattam, hogy akkor van elegendő kapacitás a termelési feladat végrehajtására úgy, hogy felesleges kihasználatlan kapacitások sem keletkeznek az egyes gépeken, ha a

művelettípus-halmazok iránti kapacitásigény a felső és alsó kapacitáskorlát közé esik, tehát,

$$(1-\alpha)l_k \leq \sum_{i=1}^I x_i ps_{ki} \leq (1+\beta)u_k \quad k=1, \dots, K \quad (9)$$

A művelettípus kapacitásigénye (rt_h) megváltozhat többek között a vevői rendelés módosításakor, illetve bizonyos technológiai változások esetén. Érzékenységvizsgálattal ellenőrizhető, hogy milyen mértékű változásnál teljesülnek a (9) szerinti kapacitásfeltételek.

2/2. tézis

Egy termékszerkezet kielégíti a művelettípus-halmazra vonatkozó kapacitásfeltételeket a művelettípus kapacitásigényének csökkenésekor abban az esetben, ha a csökkenés mértéke kisebb a művelettípus megengedett kapacitásigény-csökkenésénél (Δrt_h^-). A Δrt_h^- érték kiszámításához a következő összefüggést határoztam meg:

$$\Delta rt_h^- = \underset{(k|ot_h \in S_k)}{\text{Min}} [rs_k - l_k(1-\alpha)] \quad h=1, \dots, H; \quad k=1, \dots, K \quad (10)$$

Egy termékszerkezet kielégíti a művelettípus-halmazra vonatkozó kapacitásfeltételeket a művelettípus kapacitásigényének növekedésekor abban az esetben, ha a növekedés mértéke kisebb a művelettípus megengedett kapacitásigény-növekedésénél (Δrt_h^+). A Δrt_h^+ érték kiszámításához a következő összefüggést határoztam meg:

$$\Delta rt_h^+ = \underset{(k|ot_h \in S_k)}{\text{Min}} [u_k(1+\beta) - rs_k] \quad h=1, \dots, H; \quad k=1, \dots, K \quad (11)$$

A gépek kapacitása (c_m) a gyártási folyamat során számos műszaki és szervezési ok miatt megváltozhat. Érzékenységvizsgálattal ellenőrizhető, hogy a változás ellenére teljesülnek-e a (9) szerinti kapacitásfeltételek.

2/3. tézis

Egy termékszerkezet kielégíti a művelettípus-halmazra vonatkozó kapacitásfeltételeket a gépkapacitás csökkenésekor abban az esetben, ha a csökkenés mértéke kisebb a megengedett gépkapacitás-csökkenésénél (Δc_m^-). A Δc_m^- érték kiszámításához a következő összefüggést határoztam meg:

$$\Delta c_m^- = \underset{(k|z_{k''m}=1 \cap S_{k''} \in S_k^*)}{\text{Min}} [u_k(1+\beta) - rs_k] \quad m=1, \dots, M; \quad k=1, \dots, K; \quad k''=1, \dots, K'' \quad (12)$$

Egy termékszerkezet kielégíti a művelettípus-halmazra vonatkozó kapacitásfeltételeket a gépkapacitás növekedésekor abban az esetben, ha a növekedés mértéke kisebb a megengedett gépkapacitás-növekedésénél (Δc_m^+). A Δc_m^+ érték kiszámításához a következő összefüggést határoztam meg:

$$\Delta c_m^+ = \underset{(k|z_{k'm}=1 \cap S_{k'} \in S_k')}{\text{Min}} [rs_k - l_k(1-\alpha)] \quad m=1, \dots, M; \quad k=1, \dots, K; \quad k'=1, \dots, K' \quad (13)$$

A 2/1., 2/2. és 2/3. téziseknél alkalmazott jelölések listáját a függelék F2. táblázata tartalmazza.

A gyártási útvonalak (routing) jelentőségével és kapacitást befolyásoló hatásával a [T1], [T10] publikációk foglalkoznak. A művelettípus definíciója és a művelettípus-halmazokra épülő kapacitáselemzési modell részletes leírása a [T12], [T29] publikációkban található. A művelettípus-alapú aggregálás egyéb alkalmazási lehetőségeit a [T25], [T30], [T31], [T39], [T42] publikációk tárgyalják. A számítások elvégzésének néhány technikai problémáját a [T19] publikáció tartalmazza.

3.3. Egyszerű gyártósor-kiegyenlítési modellekkel kapcsolatos eredmények

Az egyszerű gyártósor-kiegyenlítési modellek a tevékenységeket úgy rendelik az egyes munkahelyekhez, hogy közben valamilyen a menedzsment számára fontos működési mutató (munkahelyek száma, ciklusidő) optimalizálására törekednek. A hozzárendelés során számos feltételt kell kielégíteni. E feltételek egyik fontos csoportja a munkaerő képzettségére vonatkozik. Definiáltam három különböző képzettségikorlát-típust és kidolgoztam egy egységes rendszert, amelyben a *többszintű képzettségi korlátok* megfogalmazhatók. Megvizsgáltam továbbá, hogy az optimális hozzárendelés mennyire érzékeny a gyártási mennyiség megváltozására.

3/1. tézis

Egyszerű gyártósor-kiegyenlítési problémák esetén a következő többszintű képzettségikorlát-típusokat definiáltam:

- *Alacsonyképzettség-korlát* (Low-Skill-Constraint = LSC): Meghatározott számú k képzettségi szintű munkást alkalmazni *kell* a gyártósoron. Ezek a munkások a k képzettségi szintnél magasabb képzettségi szintet igénylő feladatokat nem tudnak végrehajtani, alacsonyabb szintű feladatot viszont igen, és az ilyen képzettséget igénylő munkahelyek száma *alulról* korlátos.

- *Magasképzettség-korlát* (High-Skill-Constraint = HSC): Meghatározott számban állnak rendelkezésre k képzettségi szinttel rendelkező munkások. Ezek a munkások a k képzettségi szintnél magasabb képzettségi szintet igénylő feladatokat nem tudnak végrehajtani, alacsonyabb szintű feladatot viszont igen, és az ilyen képzettséget igénylő munkahelyek száma *felülről* korlátos.

- *Kizárólagosképzettség-korlát* (Exclusive-Skill-Constraint = ESC): A munkások egyes csoportjai kizárólag csak a képzettségüknek megfelelő feladatokat tudják elvégezni. Ebben az esetben az egyes munkáscsoportok nem tudják másik munkáscsoport feladatait elvégezni, ezért a hozzárendelésnél az egyes csoportokhoz tartozó feladatok nem keveredhetnek.

A három képzettségi típushoz tartozó egyenlőtlenségeket a 2. táblázat foglalja össze.

3/2. tézis

Egy egyszerű gyártósor hatékonysága a *gyártási mennyiség* lineáris függvénye. A gyártási mennyiségek meghatározott értékeire igaz, hogy minden mennyiségnél ugyanaz a gyártósor-konfiguráció (tevékenység-hozzárendelés) optimális. Ezen gyártási mennyiségek alkotják az optimális tevékenység-hozzárendelés *érvényességi tartományát*. Megmutattam, hogy N műveleti helyből álló egyszerű gyártósor esetén a tevékenység-hozzárendelés optimális, ha a gyártási mennyiség a következő tartományba esik:

$$Q_{\text{Max}}^{\text{OPT}}(N-1) < Q \leq Q_{\text{Max}}^{\text{OPT}}(N) \quad (17)$$

A jelzett tartományban a gyártósor hatékonysága a gyártási mennyiség függvényében (lineárisan) változik, de az adott mennyiséghez tartozó hatékonyság optimális; a hatékonyság a hozzárendelés változtatásával nem javítható.

A 3/1. és 3/2. téziseknél alkalmazott jelölések listáját a függelék F3. táblázata tartalmazza.

A képzettségikorlát-típusok értelmezésével, definiálásával és matematikai modellezésével a [T14], [T15], [T24], [T38], publikációk foglalkoznak. A matematikai modell gyakorlati alkalmazását, a javasolt modellezési elvek és eredmények felhasználásának lehetőségeit a [T16], [T23], [T26], [T34], [T35], [T37] publikációk tárgyalják. A képzettségnek a tanulási hatással kapcsolatos kérdéseit, valamint a tanulási hatás miatt nem-lineárisra váló hatékonysági függvény elemzését a [T18], [T27], [T28] publikációk tartalmazzák.

2. táblázat: Többszintű munkaerőképzettség-feltételek összefoglalása

Alacsony- képzettség- korlát (LSC)	$\sum_{i \in S_k} x_{ij} \leq z \sum_{v=k}^K l_{jv} \quad j=1, \dots, J; \quad k=1, \dots, K$ $\sum_{k=1}^K l_{jk} \leq 1 \quad j=1, \dots, J$ $\sum_{i=1}^I x_{ij} \geq l_{jk} \quad j=1, \dots, J; \quad k=1, \dots, K$ $\sum_{j=1}^J l_{jk} \geq W_k \quad j=1, \dots, J; \quad k=1, \dots, K$ $l_{jk} = 0 \quad j < LS_k \text{ és } j > US_k, \quad k=1, \dots, K$	(14)
Magas- képzettség- korlát (HSC)	$\sum_{i \in S_k} x_{ij} \leq z \sum_{v=1}^k h_{jv} \quad j=1, \dots, J; \quad k=1, \dots, K$ $\sum_{k=1}^K h_{jk} \leq 1 \quad j=1, \dots, J$ $\sum_{i=1}^I x_{ij} \geq h_{jk} \quad j=1, \dots, J; \quad k=1, \dots, K$ $\sum_{j=1}^J h_{jk} \leq W_k \quad j=1, \dots, J; \quad k=1, \dots, K$ $h_{jk} = 0 \quad j < LS_k \text{ és } j > US_k, \quad k=1, \dots, K$	(15)
Kizárólagos- képzettség- korlát (ESC)	$\sum_{i \in S_k} x_{ij} \leq ze_{jk} \quad j=1, \dots, J; \quad k=1, \dots, K$ $\sum_{i \notin S_k} x_{ij} \leq z(1 - e_{jk}) \quad j=1, \dots, J; \quad k=1, \dots, K$ $e_{jk} = 0 \quad j < LS_k \text{ és } j > US_k, \quad k=1, \dots, K$	(16)

3.4. Az átfutási idő érzékenységvizsgálatával kapcsolatos eredmények

Termelőrendszerek ütemezési problémáinak vizsgálatakor gyakran alkalmazott módszer a diszkrét szimuláció. A vizsgált működési mutató érzékenységének vizsgálata a változó paraméter módosított értékével megismételt szimuláció és differenciaszámítás segítségével elvégezhető. Bizonyos esetekben azonban nem szükséges a megváltozott paraméterértékkel új szimuláció végrehajtása, egyetlen szimulációs eredményből is kiolvasható az érzékenységi információ. A perturbációelemzés elméletét felhasználva levezettem az átfutási idő műveleti idő szerinti gradiensek érvényességi tartományát.

4. tézis

Diszkrét szimuláció végrehajtásakor az egyetlen kísérlet eredményeként kapott ütemezés $L(\theta, \xi)$ átfutási idejének θ_k műveleti idő szerinti gradiense a θ_k paraméterérték változásakor a paraméter felső és alsó határa közötti tartományban érvényes.

A θ_k paraméterérték megengedett felső határának meghatározására a következő összefüggést vezettem le:

$$UL(\theta_k, \xi) = \theta_k \cdot \min \left[-\frac{ni_{ij}}{D_{ij}^{(NI)}}; -\frac{fo_{ij}}{D_{ij}^{(FO)}}; -\frac{pni_{ij}}{D_{ij}^{(PNI)}}; -\frac{pfo_{ij}}{D_{ij}^{(PFO)}}; -\frac{ot_{ij}}{D_{ij}^{(OT)}} \right] \quad (18)$$

$$D_{ij}^{(NI)} \geq 0; D_{ij}^{(FO)} \leq 0; D_{ij}^{(PNI)} \leq 0; D_{ij}^{(PFO)} \geq 0; D_{ij}^{(OT)} \geq 0$$

A θ_k paraméterérték megengedett alsó határának meghatározására a következő összefüggést vezettem le:

$$LL(\theta_k, \xi) = \theta_k \cdot \min \left[-\frac{ni_{ij}}{D_{ij}^{(NI)}}; -\frac{fo_{ij}}{D_{ij}^{(FO)}}; -\frac{pni_{ij}}{D_{ij}^{(PNI)}}; -\frac{pfo_{ij}}{D_{ij}^{(PFO)}}; -\frac{ot_{ij}}{D_{ij}^{(OT)}} \right] \quad (19)$$

$$D_{ij}^{(NI)} \geq 0; D_{ij}^{(FO)} \leq 0; D_{ij}^{(PNI)} \geq 0; D_{ij}^{(PFO)} \leq 0; D_{ij}^{(OT)} \geq 0$$

Az $UL(\theta_k, \xi)$ és $LL(\theta_k, \xi)$ értékek számítása a no-input, full-output, potenciális no-input, potenciális full-output, valamint előzési mátrixok meghatározására épül. A számítások alapadatait diszkrét szimuláció generálja, de az adatok egy Gantt diagram formájában megadott – bárhogyan előállított – ütemezés ismeretében is előállíthatók. Így a javasolt számítás bármely termelési ütemterv esetén alkalmazható az érvényességi tartomány meghatározására és ezáltal az ütemezés robusztusságának elemzésére.

A 4. tézisnél alkalmazott jelölések listáját a függelék F4. táblázata tartalmazza.

Az átfutási idő gradiens érvényességi tartományának definiálásával és meghatározásával a [T5], [T6], [T20] publikációk foglalkoznak. Az érvényességi tartomány számítását általános esetre, Gantt diagram formájában megadott ütemezés esetén, a [T7], [T20] publikációk ismertetik. A gradiens és érvényességi tartomány számítás gyakorlati alkalmazását, valamint a vizsgálat kiterjesztését más működési mutatókra a [T5], [T8], [T9], [40] publikációk tárgyalják.

3.5. Egyetlen erőforrást tartalmazó rendszer ütemezésével kapcsolatos eredmények

Ütemezési szabályok gyakran alkalmazhatók egyszerű ütemezési problémák optimális megoldásának, illetve heurisztikaként bonyolult problémák kielégítő megoldásának a meghatározására. Egyetlen erőforrást tartalmazó rendszer esetén optimális megoldást adó ütemezési szabályokat vezettem le arra az esetre, amikor az ütemezési kritérium a készlettartási költség minimalizálása.

5/1. tétel

Bebizonyítottam, hogy ha egy egyetlen erőforrást tartalmazó ütemezési probléma esetén

- a műveleti idők (t_i) determinisztikusak,
- az átállási idő része a műveleti időnek (t_i) és sorrendtől független,
- a feladatok között nincs logikai kapcsolat,
- valamennyi feladatot *azonos határidőre* kell elkészíteni,
- és a lekötött tőke költségét csak az ütemezési periódus végén a tartózkodási idő alapján számoljuk (*periodikus kamatszámítás*),

akkor a készlettartási költséget minimalizáló gyártási sorrend bármely két szomszédos i és j ($i < j$) feladatára igaz, hogy

$$\frac{t_i}{c_i} \geq \frac{t_j}{c_j} \quad (20)$$

A (20) feltételt WLPT szabálynak neveztem el a súlyozott leghosszabb műveleti idő angol fordításának rövidítése alapján (Weighted Longest Processing Time).

Ha a lekötött tőke költségét *folyamatos kamatozással* számoljuk, akkor a készlettartási költséget minimalizáló sorrend bármely két szomszédos i és j ($i < j$) feladatára igaz, hogy

$$\frac{1 - e^{-\frac{q}{365}t_i}}{c_i} \geq \frac{1 - e^{-\frac{q}{365}t_j}}{c_j} \quad (21)$$

A (21) feltételt WLTEPT szabálynak neveztem el a súlyozott leghosszabb exponenciálisan transzformált műveleti idő angol fordításának rövidítése alapján (Weighted Longest Transformed Exponential Processing Time).

5/2. tézis

Bebizonyítottam, hogy ha egy egyetlen erőforrást tartalmazó ütemezési probléma esetén

- a műveleti idők (t_i) determinisztikusak,
- az átállási idő része a műveleti időnek és sorrendtől független,
- a feladatok között nincs logikai kapcsolat,
- valamennyi feladatot *eltérő határidőre* (d_i) kell elkészíteni,
- és a lekötött tőke költségét csak az ütemezési periódus végén a tartózkodási idő alapján számoljuk (*periodikus kamatszámítás*),

akkor a készlettartási költséget minimalizáló sorrend bármely két szomszédos i és j ($i < j$) feladatára igaz, hogy

$$\frac{t_i}{c_i} \geq \frac{t_j}{c_j} \quad (22)$$

tehát az optimális megoldás *nem függ* a határidőktől.

A (22) feltétel a (20) feltételhez hasonlóan WLPT szabálynak nevezhető.

Ha a lekötött tőke költségét *folyamatos kamatozással* számoljuk, akkor a készlettartási költséget minimalizáló sorrend bármely két szomszédos i és j ($i < j$) feladatára igaz, hogy

$$\frac{f(t_i)}{c_i e^{\frac{q}{365} d_i}} \geq \frac{f(t_j)}{c_j e^{\frac{q}{365} d_j}} \quad (23)$$

tehát az optimális megoldás *függ* a határidőktől.

A (23) feltételt szintén WLTEPT szabálynak neveztem el a súlyozott leghosszabb exponenciálisan transzformált műveleti idő angol fordításának rövidítése alapján (Weighted Longest Transformed Exponential Processing Time), de a súlyszámok ebben az esetben tartalmazzák a *határidőket* (d_i) is.

5/3 tézis

Bebizonyítottam, hogy ha egy egyetlen erőforrást tartalmazó ütemezési probléma esetén

- a műveleti idők (t_i) determinisztikusak,
- az átállási idő része a műveleti időnek és sorrendtől független,
- a feladatok között nincs logikai kapcsolat,

akkor a készlettartási költség periodikus kamatszámításra épülő *alsó* becslése, valamint a készlettartási költség folytonos kamatszámításra épülő *felső* becslése alapján kapott, a készlettartási költséget minimalizáló optimális ütemezések csak a gyakorlatban nagyon ritkán előfordul, szélsőséges esetekben térnek el egymástól. A készlettartási költség számításának módja tehát gyakorlatilag nem befolyásolja az optimális ütemezést.

Az 5/1. 5/2. és 5/3. téziseknél alkalmazott jelölések listáját a függelék F5. táblázata tartalmazza.

Az optimális ütemezést meghatározó ütemezési szabály levezetése arra az esetre, amikor valamennyi feladat határideje azonos a [T21], [T22] publikációkban található. Az eredmény általánosítását eltérő határidők esetére, valamint a robusztusság vizsgálatát a [T3] publikáció tartalmazza.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A termelésstervezés és termelésütemezés területe rendkívül szerteágazó, mind a vizsgált problémák, mind pedig az alkalmazott modellek tekintetében. Attól függően, hogy milyen gyártási típust vizsgálunk, hogy melyek a gyártott termék iránti igény jellemzői és, hogy milyen vállalatirányítási rendszerben végzik a termelésstervezést és termelésütemezést, az

alkalmazott módszerek köre igen változatos. Függetlenül attól azonban, hogy milyen módszert alkalmaznak a termelési terv meghatározására, a tervezéshez használt paraméterek megváltozása gyakori jelenség. Ha valamely tervezési paraméter megváltozik, akkor a változás hatásának vizsgálata fontos feladat annak eldöntésénél, hogy a változás mértéke igényli-e a terv, illetve a működés módosítását.

A termelési tervezési és termelésütemezési modellek sokféleségének köszönhetően az érzékenységvizsgálatnak nincsen általános, minden problémára vonatkozó elmélete. Az értekezésben bemutatott esetek mindegyikénél más és más módszerrel vált lehetővé az érzékenységvizsgálati eredmények előállítását. A vizsgálat célja azonban valamennyi esetben azonos volt: *Valamely paraméter azon legnagyobb változását kell meghatározni, amely még nem igényli a terv/működés módosítását.*

A kidolgozott érzékenységvizsgálati módszerek elméleti és gyakorlati jelentősége eltérő. A 3.1. és 3.2. pontok tézisei inkább elméleti jelentőségűek, míg a 3.3., 3.4. és 3.5. pontok téziseinek, az elméleti vonatkozásokon túl, közvetlen gyakorlati hatása is van.

- A hivatkozások elemzése azt mutatja, hogy a lineáris programozási modellek érzékenységvizsgálati eredményeinek osztályozására tett javaslatom (3.1. pont) több kutatót ösztönzött a definiált érzékenységvizsgálati információk előállítására speciális LP modellek esetén ([I21], [I22], [I24]). Továbbá, a degenerált érzékenységi adatok helyes értelmezése és a menedzsmentszempontból korrekt érzékenységi információk előállítása hozzájárulhat az érzékenységi információkra épülő döntések megalapozottabbá válásához [I3].

- A 3.2. pontban javasolt új aggregálási módszer hozzájárulhat a rugalmas gyártórendszerek erőforrás-igénybevételének jobb megértéséhez, a nagy értékű berendezésekhez jól illeszkedő termszervezet kialakításához ([I25], [I36]).

- Az egyszerű gyártósort-kiegyenlítési modellek kiegészítésével kapcsolatos eredmények (3.3. pont) egy kerékpár-összeszerelő folyamat gyártósort-konfigurálási döntéseinek megalapozásához járulhatnak hozzá [T16].

- A perturbációelemzéssel előállított érzékenységi információk (3.4. pont) egy folyamatos acélöntési folyamat technológiai szempontból érzékeny pontján a várakozás idő kritikus értékeinek előrejelzését teszik lehetővé [T5].

- A levezetett ütemezési szabályok (3.5. pont) pedig egy naptárgyártási folyamat hatékonyabb működését segíthetik [T23].

Az értekezésben ismertetett kutatások elsősorban gyártórendszerek termelési tervezési és termelésütemezési kérdéseinek érzékenységvizsgálatára koncentráltak, azonban az érzékenységvizsgálat hasonlóan fontos a szolgáltatórendszerek esetében is. Egy áruház pénztári rendszerének működésekor például azt vizsgáltuk, hogy a vevők pénztárhoz érkezési folyamatának, valamint a vevők vásárlási szokásainak néhány fontos jellemzője (paramétere) hogyan befolyásolja a várakozási időt [T4]. Általánosan is kijelenthető, hogy az érzékenységvizsgálat célja érvényes és aktuális a termelő- és a szolgáltatórendszerekben egyaránt:

Néhány fontos tervezési paraméter értéke megváltozhat. Ilyenkor speciális módszerekkel vizsgálható a változás hatása a folyamat legfontosabb működési mutatóira. Az így kapott információ segítségével dönthető csak el megalapozottan, hogy indokolt-e a terv, illetve a működés módosítása.

Napjainkban a versenyképesség nagymértékben függ a vállalati folyamatokkal kapcsolatos információk hatékony gyűjtésétől, azok megfelelő módszerekkel történő feldolgozásától, és az eredmények sikeres alkalmazásától a döntéshozatali folyamatban. Ebben a termelési környezetben az érzékenységvizsgálati módszerekkel kapcsolatos kutatások aktuálisak, releváns kérdéseket vizsgálnak, továbbá a kutatási problémák köre állandóan bővül. Az értekezésben bemutatott kutatási eredmények e terület fejlődéséhez kívánnak hozzájárulni.

5. A TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEKET TARTALMAZÓ JELENTŐSEBB PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA

5.1 A tudományos eredményekhez kapcsolódó lektorált folyóiratcikkek

- [T1] Guerrero, F., Lozano, S., Koltai, T. and Larraneta, J., 1999. Machine loading and part type selection in flexible manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 37(6), pp.1303-1317. (IF=0,512)
- [T2] Koltai, T., 1995. Fixed cost oriented bottleneck analysis with linear programming. *Omega: International Journal of Management Science*, 23(1), pp.89-95. (IF: 0,286)
- [T3] Koltai, T., 2009. Robustness of a production schedule to inventory cost calculations. *International Journal of Production Economics*, 121(2), pp.494-504. (IF=2,07)
- [T4] Koltai, T., Kalló, N. and Lakatos, L., 2009. Optimization of express line performance: Numerical examination and management considerations. *Optimization and Engineering*, 10(3), pp.377-396. (IF=1,00)
- [T5] Koltai, T., Larraneta, J. and Onieva, L., 1993. Examination of the sensitivity of an operation schedule with perturbation analysis. *International Journal of Production Research*, 31(12), pp.2777-2787. (IF=0,314)
- [T6] Koltai, T., Larraneta, J. and Onieva, L., 1994. An operations management approach to perturbation analysis. *JORBEL, Belgian Journal of Operations Research Statistics and Computer Science*, 33(4), pp.17-41.
- [T7] Koltai, T., Larraneta, H., Onieva, L. and Lozano, S., 1994. Sensitivity examination of the simulation result of discrete event dynamic systems with perturbation analysis. *Questió: Quaderns D Estadística Sistemes Informàtica Investigació Operativa*, 18(2), pp.209-228.
- [T8] Koltai, T. and Lozano, S., 1996. The illustration of the routing sensitivity calculation of flexible manufacturing systems with perturbation analysis. *Periodica Polytechnica-Social and Management Sciences*, 4(1), pp.5-28.
- [T9] Koltai, T. and Lozano, S., 1998. Sensitivity calculation of the throughput of an FMS with respect to the routing mix using perturbation analysis. *European Journal of Operational Research*, 105, pp.483-493. (IF=0,413)
- [T10] Koltai, T., Lozano, S., Guerrero, F. and Onieva, L., 2000. A flexible costing system for flexible manufacturing systems using activity based costing. *International Journal of Production Research*, 38(7) pp.1615-1630. (IF=0,504)
- [T11] Koltai, T., Romhányi G. és Tatay V., 2009. Optimalizálás bizonytalan paraméterekkel a termelés- és szolgáltatásmenedzsmentben. *Vezetéstudomány*, 40 (különszám), pp.68-73.
- [T12] Koltai, T. and Stecke, K.E., 2008. Route-independent analysis of available capacity in flexible manufacturing systems. *Production and Operations Management*, 17(2), pp.211-223. (IF=1,933)
- [T13] Koltai, T. and Tatay, V., 2011. A practical approach to sensitivity analysis in linear programming under degeneracy for management decision making. *International Journal of Production Economics*, 131(1), pp.392-398. (IF=1,76)
- [T14] Koltai, T. and Tatay, V., 2011. Formulation of simple workforce skill constraints in assembly line balancing models. *Periodica Polytechnica-Social and Management Sciences*, 19(1), pp.43-50.
- [T15] Koltai, T. and Tatay, V., 2013. Formulation of workforce skill constraints in assembly line balancing models. *Optimization and Engineering*, 14, pp.529-545. (IF=0,955)
- [T16] Koltai, T., Tatay, V. and Kalló, N., 2014. Application of the results of simple assembly line balancing models in practice: The case of a bicycle manufacturer. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 27(9), pp.887-898. (IF=1,019*)
- [T17] Koltai, T. and Terlaky, T., 2000. The difference between the managerial and mathematical interpretation of sensitivity results in linear programming. *International Journal of Production Economics*, 65(3), pp.257-274. (IF=0,258)

5.2. A tudományos eredményekhez kapcsolódó megjelent konferencia-előadások

- [T18] Györkös, R., Koltai, T. and Kalló, N., 2014. Empirical analysis of the significance of learning effect and task assignment on assembly line performance. In: *microCAD 2014: XXVIII. microCAD International Scientific Conference: Economic Challenges in the 21st Century*. Miskolc, Hungary: University of Miskolc Innovation and Technology Transfer Centre, pp.1-6. (CD-ROM)
- [T19] Juhász, V. and Koltai, T., 2003. Some practical issues of the capacity analysis of FMS based on the concept of operation types. In: L. Lehoczky and L. Kalmár, eds. *microCAD 2003, International Computer Science Conference: Production engineering, manufacturing systems*. Miskolc, Hungary: University of Miskolc Innovation and Technology Transfer Centre, pp.89-94.
- [T20] Koltai, T., 1992. Sensitivity analysis of discrete event dynamic systems. In: R. Trappel, ed. *Cybernetics and systems research'92 Vol. 1*. Singapore: World Scientific, pp.145-151.
- [T21] Koltai, T., 2006. Robustness of a production schedule to the method of cost of capital calculation. In: R.W. Grubbström and H.H. Hinterhuber, eds. *14th International Working Seminar on Production Economics: Pre-Prints Volume 1*. Innsbruck, Ausztia, pp.207-216.
- [T22] Koltai, T., 2006. Economic analysis of production scheduling of a calendar manufacturing process. In: L. Huw, B. Gaughran, S. Burke, W.G. Sullivan and A. Munir, eds. *Proceedings of the 16th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*. Limerick, Ireland: University of Limerick, pp.617-624.
- [T23] Koltai, T., 2012. Supporting line configuration decisions with assembly line balancing models: A practical case. In: E. Ilie-Zudor, Zs. Kemény and L. Monostori, eds. *Proceedings of the 14th International Conference on Modern Information Technology in the Innovation Processes of the Industrial Enterprises*. Budapest, Hungary: HAS Computer and Automation Research Institute, pp.68-79.
- [T24] Koltai, T., 2013. Formulation of multi-level workforce skill constraints in assembly line balancing models. In: *Preprints of the IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control*. Saint-Petersburg, Russia: IFAC by Pergamon Press, pp.802-807.
- [T25] Koltai, T., Farkas, A. and Stecke, K.E., 2001. An aggregate capacity analysis model for a flexible manufacturing environment. In: *Proceedings of the 2000 Japan-USA Flexible Automation Conference*. Ann Arbor, USA: ASME, pp.1381-1388.
- [T26] Koltai, T. and Györkös, R., 2012. Comparison of the optimal performance of assembly line configurations with simple assembly line balancing models. In: P. Bikfalvi, ed. *XXVI. microCAD International Scientific Conference: Economic Challenges in the 21st Century*. Miskolc, Hungary: University of Miskolc Innovation and Technology Transfer Centre, pp.1-6. (CD-ROM)
- [T27] Koltai, T. and Györkös, R., 2013. Analysis of the efficiency of task assignment in the presence of learning effect. In: *microCAD 2013: XXVII. International Scientific Conference: Economic Challenges in the 21st Century*. Miskolc, Hungary: University of Miskolc Innovation and Technology Transfer Centre, pp.1-6. (CD-ROM)
- [T28] Koltai, T., Györkös, R. and Kalló, N., 2014. Analysis of the bottleneck of simple assembly lines with learning effect. In: R.W. Grubbström and H.H. Hinterhuber, eds. *18th International Working Seminar on Production Economics: Pre-prints Volume 3*. Innsbruck, Ausztia, pp.289-300.
- [T29] Koltai, T., Juhász, V. and Stecke, K.E., 2004. A new formulation of capacity constraints in the production planning of flexible manufacturing systems. In: L. Wang, J. Xi, W.G. Sullivan, A. Munir, eds. *Proceedings of the 14th International Conference of Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*. Toronto, Kanada, pp.775-782.
- [T30] Koltai, T., Juhász, V., Stecke, K.E. and Varlaki, P., 2004. A new approach for the production planning of flexible manufacturing systems based on the concept of operation types. In: S. Gupta, ed. *Proceedings of the 2nd World Congress on Production and Operations Management*. Cancun, Mexiko, pp.1-25. (CD-ROM)
- [T31] Koltai, T., Stecke, K. and Juhász, V., 2004. Planning of flexibility of flexible manufacturing systems. In: *Proceedings of the 2004 Japan-USA Symposium on Flexible Automation*. New York, USA: ASME, pp.1-8. (CD-ROM)

- [T32] Koltai, T. and Tatay, V., 2008. Support of production management decisions by sensitivity analysis of linear production planning models. In: T. van der Vaart, D.P. van Donk, W. van Wezel, G. Welker, J. Wijngaard, eds. 2008. *15th International Annual EurOMA Conference*. Groningen, The Netherlands, pp.1-10. (CD-ROM)
- [T33] Koltai, T. and Tatay, V., 2008. The effect of degenerate LP sensitivity analysis results on management decision making. In: L. Lehoczky, ed. *microCAD 2008 International Scientific Conference: Company competitiveness in the XXI century*. Miskolc, Hungary: University of Miskolc Innovation and Technology Transfer Centre, pp.27-32.
- [T34] Koltai, T. and Tatay, V., 2010. Application of simple assembly line balancing models to support production quantity related decisions. In: R.W. Grubbström and H.H. Hinterhuber, eds. *16th International Working Seminar on Production Economics: Preprints Volume 1*. Innsbruck, Ausztria, pp.285-296.
- [T35] Koltai, T., Tatay, V. and Kalló, N., 2011. Application of simple assembly line balancing models to support quick response operation in a bicycle production process. In: *Proceedings of the 3rd Rapid Modelling Conference: Rapid Modelling for Sustainability*. Leuven, Belgium: Katholieke Universiteit Leuven, pp.1-10. (CD-ROM)
- [T36] Koltai, T. and Terlaky, T., 1999. Sensitivity analysis problems of linear programming in management decision making. In: L. Lehoczky and L. Kalmár, eds. *microCAD '99 International Computer Science Conference*. Miskolc, Hungary: University of Miskolc Innovation and Technology Transfer Centre, pp.83-88.
- [T37] Tatay, V. and Koltai, T., 2010. Solving assembly line balancing models in Excel environment to support production management decisions. In: P. Bikfalvy Péter, ed. *XXIV. microCAD International Scientific Conference: Economic Challenges in the 21st Century*. Miskolc, Hungary: University of Miskolc Innovation and Technology Transfer Centre, pp.165-170.
- [T38] Tatay, V. and Koltai, T., 2011. Supporting production management decisions with assembly line balancing models in the presence of skilled and unskilled workers. In: P. Bikfalvi, ed. *XXV. microCAD International Scientific Conference: Economic Challenges in the 21st Century*. Miskolc, Hungary: University of Miskolc Innovation and Technology Transfer Centre, pp.125-130.

5.3. A tudományos eredményekhez kapcsolódó egyéb publikációk

- [T39] Farkas, A., Koltai, T. and Stecke, K.E., 1999. *Workload balancing using the concept of operation types*. Working Paper. Michigan, USA: University of Michigan Business School, 1999. 31p.
- [T40] Koltai, T., 1994. Performance evaluation of production and service systems: Basic concepts, applications and future trends. In: S. Péter and A. Farkas, eds. *Business Research and Management Challenges. Papers and Cases from Central/Eastern Europe: IMC's Fifth Anniversary Yearbook*. Budapest, Hungary: International Management Center, pp. 95-121.
- [T41] Koltai T., 2006. *Termelésmenedzsment*. Budapest: Typotex Kiadó, 279p.
- [T42] Koltai, T., Farkas, A. and Stecke, K.E., 1998. *Aggregate production planning of flexible manufacturing systems using the concept of operation types*. Working Paper, 98/007. Michigan, USA: University of Michigan Business School, 29p.

6. IRODALOMJEGYZÉK

- [I1] Alidaee B., 1993. Numerical method for single machine scheduling with non-linear cost functions to minimize total cost. *Journal of the Operations Research Society*, 44(2), pp.125-132.
- [I2] Anderson, E.J., 1994. *The management of manufacturing. Models and analysis*. Addison-Wesley.
- [I3] Arsham, H., 2012. Foundation of linear programming: A managerial perspective from solving system of inequalities to software implementation. *International Journal of Strategic Decision Science*, 3(3), pp.40-60.
- [I4] Bernardo, J.J. and Mohamed, Z., 1992. The measurement and use of operational flexibility in the loading of Flexible Manufacturing Systems. *European Journal of Operational Research*, 60, pp.144-155.
- [I5] Boysen N., Flidner M. and Scholl A., 2008. Assembly line balancing: Which model to use when? *International Journal of Production Economics*, 111, pp.509-528.
- [I6] Conway, R.W., Maxwell, W.L. and Miller, W.L., 1976. *Theory of scheduling*. John Wiley and Sons.
- [I7] Corominas A., Pastor F. and Plans, J., 2008. Balancing assembly line with skilled and unskilled workers. *Omega*, 36, pp.1126-1132.
- [I8] Davenport, T.H., 2006. Competing on analytics. *Harvard Business Review*, January, pp.99-107.
- [I9] Davenport, T.H., 2013. Analytics 3.0. *Harvard Business Review*, December, pp.64-72.
- [I10] Davenport, T.H. and Harris, J.G., 2007. *Competing on analytics. The new science of winning*. Boston:Harvard Business School Press.
- [I11] Evans, J.R. and Baker, N.R., 1982. Degeneracy and the (mis)interpretation of sensitivity analysis in linear programming. *Decision Science*, 13, pp.348-354.
- [I12] Gal, T., 1986. Shadow prices and sensitivity analysis in linear programming under degeneracy. *OR Spektrum*, 8, pp.59-71.
- [I13] Hall, N.G. and Posner, M.E., 2004. Sensitivity analysis for scheduling problems. *Journal of Scheduling*, 7(1), pp.49-83.
- [I14] Hicks, P.E., 1977. *Introduction to industrial engineering and management science*. McGraw-Hill Company.
- [I15] Higle, J.L. and Wallace, S.W., 2003. Sensitivity analysis and uncertainty in linear programming. *Interfaces*, 33(4), pp.53-60.
- [I16] Hillier, S.F. and Lieberman, G.J., 1995. *Introduction to operations research*. McGraw-Hill International Editions.
- [I17] Ho, Y.C., 1987. Performance evaluation and perturbation analysis of discrete event dynamic systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-32, pp.563-572.
- [I18] Ho, Y.C. and Cao, X.R., 1991. *Perturbation analysis of discrete event dynamic systems*. Kluwer Academic Publisher.
- [I19] Jackson, J., 2002. Data mining: A conceptual overview. *Communications of the Association for Information Systems*, 8, pp.267-296.
- [I20] Jansen, B., de Jong, J.J., Roos, C. and Terlaky, T., 1997. Sensitivity analysis in linear programming: Just be careful! *European Journal of Operational Research*, 101, pp.15-28.
- [I21] Kavitha, K. and Pandian, P., 2012. Type II sensitivity analysis in solid assignment problems. *Modern Applied Science*, 6(12), pp.22-26.
- [I22] Lin, C.J. and Wen, U.P., 2003. Sensitivity analysis of the optimal assignment. *European Journal of Operational Research*, 149(1), pp.35-46.
- [I23] Little, J.D.C., 1970. Models and managers: The concept of a decision calculus. *Management Sciences*, 16(8), pp.B466-B485.
- [I24] Ma, K.T., Lin, C.J. and Wen, U.P., 2013. Type II sensitivity analysis of cost coefficients in the degenerate transportation problem. *European Journal of Operational Research*, 227(2), pp.293-

300.

- [I25] Matta, A., Tomasella, M. and Valente, A., 2007. Impact of ramp-up on the optimal capacity-related reconfiguration policy. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 19(3), pp.173-194.
- [I26] Miralles, C., Garcia-Sabater, J.P., Andres, C. and Carlos M., 2007. Advantages of assembly lines in sheltered work centres for disabled. A case study. *International Journal of Production Economics*, 110(1-2), pp.187-197.
- [I27] Monostori, L., Erdős, G., Kádár, B., Kis, T., Kovács, A., Pfeiffer, A. and Váncza, J., 2010. Digital enterprise solution for integrated production planning and control. *Computers in Industry*, 61, pp.112-126.
- [I28] Nahmias, S., 1993. *Production and operations analysis*. Boston: Richard D. Irwin, Inc.
- [I29] Ragsdale, C.T., 2007. *Managerial Decision Modeling*. Thomson South-Western.
- [I30] Saltelli, A., Tarantola, S. and Campolongo, F., 2000. Sensitivity analysis as an ingredient of modeling. *Statistical Science*, 15(4), pp.377-395.
- [I31] Salvendy, G. ed., 1992. *Handbook of industrial engineering*. Chichester: John Wiley and Sons Inc.
- [I32] Steckel, K.E. and Raman, N., 1994. Production planning decisions in flexible manufacturing systems with random materials flow. *IIE Transactions*, 26(5), pp.2-17.
- [I33] Towne, H., 1886., The engineer as an economist. *Transaction of the American Society of Mechanical Engineers*, 7, pp.428-432.
- [I34] Wagner, H.M., 1995. Global sensitivity analysis. *Operations Research*, 43(6), pp.948-969.
- [I35] Waters, D., 1996. *Operations management. Producing goods & services*. Addison-Wesley Publishing Company.
- [I36] Zaeh, M.F. and Mueller, N., 2007. A modeling approach for evaluating capacity flexibilities in uncertain markets. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 19(3), pp.151-172.

7. FÜGGELÉK: A TÉZISEKNÉL ALKALMAZOTT JELÖLÉSEK LISTÁI

F1. táblázat: Az 1/1. és 1/2. téziseknél alkalmazott jelölések

Indexek: i – primal LP modell változóinak indexe ($i=1,\dots,I$), j – duál LP modell változóinak indexe ($j=1,\dots,J$).**Paraméterek:** A – együtthatómátrix, melynek elemei a_{ji} , $\underline{b}$ – jobb-oldali paraméterek vektora, melynek elemei b_j , $\underline{c}$ – célfüggvény-együtthatók vektora, melynek elemei c_i , $\underline{e}_i$ – I elemű egységvektor, melynek elemeire igaz, hogy $e_i=1$ és $e_k=0$ minden $k \neq i$ esetben, $\underline{e}_j$ – J elemű egységvektor, melynek elemeire igaz, hogy $e_j=1$ és $e_k=0$ minden $k \neq j$ esetben, δ – jobb oldali paraméter perturbációja.**Változók:** $\underline{x}$ – primál feladat változóit tartalmazó vektor, melynek elemei x_i , $\underline{x}^*$ – primál feladat optimális megoldását tartalmazó vektor, melynek elemei x_i^* , $\underline{y}$ – duál feladat változóit tartalmazó vektor, melynek elemei y_j , $\underline{y}^*$ – duál feladat optimális megoldását tartalmazó vektor, melynek elemei y_j^* , OF^* – célfüggvény optimális értéke, y_j^- – jobb oldali paraméter b_j ($\delta < 0$) bal oldali árnyékára, y_j^+ – jobb oldali paraméter b_j ($\delta > 0$) jobb oldali árnyékára, γ_i – célfüggvény-együttható c_i változása, γ_i^- – célfüggvény-együttható c_i megengedett csökkenése, γ_i^+ – célfüggvény-együttható c_i megengedett növekedése, ξ_j – jobb oldali paraméter b_j változása, ξ_j^- – jobb oldali paraméter b_j megengedett csökkenése, ξ_j^+ – jobb oldali paraméter b_j megengedett növekedése, $n\xi_j^-$ – jobb oldali paraméter b_j bal oldali árnyékárhoz tartozó megengedett csökkenése, $n\xi_j^+$ – jobb oldali paraméter b_j bal oldali árnyékárhoz tartozó megengedett növekedése, $p\xi_j^-$ – jobb oldali paraméter b_j jobb oldali árnyékárhoz tartozó megengedett csökkenése, $p\xi_j^+$ – jobb oldali paraméter b_j jobb oldali árnyékárhoz tartozó megengedett növekedése.

F2. táblázat: A 2/1., 2/2. és 2/3. téziseknél alkalmazott jelölések

Indexek:

- i – alkatrésztípus indexe (1,...,I),
- h – művelettípus indexe (1,...,H),
- k – művelettípus-halmaz indexe (1,...,K),
- k' – egy művelettípus-halmaz részhalmazának indexe (1,...,K'),
- k'' – valamennyi művelettípus halmazt tartalmazó halmaz részhalmazának indexe (1,...,K''),
- m – gépek indexe (1,...,M).

Paraméterek:

- S_k – művelettípus-halmaz k ,
- S'_k – azon művelettípus-halmazok halmaza, amelyek kizárólag az S_k halmazba tartozó művelettípust tartalmazznak,
- S''_k – azon művelettípus-halmazok halmaza, amelyek tartalmazznak S_k halmazba tartozó művelettípust,
- c_m – gép m kapacitása,
- z_{km} – művelettípus-halmaz hozzárendelési paraméter. Ha művelettípus-halmaz k -t gép m -hez rendeljük, akkor $z_{km}=1$, különben $z_{km}=0$.
- u_k – művelettípus-halmaz k felső kapacitáskorlátja,
- l_k – művelettípus-halmaz k alsó kapacitáskorlátja,
- α – kapacitáskihasználatlanság elfogadható aránya,
- β – kapacitástúllépés elfogadható aránya,
- ps_{ki} – alkatrésztípus i azon műveleteinek műveleti ideje, melyek a művelettípus-halmaz k -ba tartoznak,
- Δr_{th}^- – művelettípus h kapacitásigényének megengedett csökkenése,
- Δr_{th}^+ – művelettípus h kapacitásigényének megengedett növekedése,
- Δc_m^- – gép m kapacitásának megengedett csökkenése,
- Δc_m^+ – gép m kapacitásának megengedett növekedése.

Változók:

- x_i – alkatrésztípus i gyártási mennyisége.

F3. táblázat: A 3/1. és 3/2. téziseknél alkalmazott jelölések

Indexek:	
i	– műveletek indexe ($i=1,\dots,I$),
v	– műveletek egy részhalmazának indexe ($v=1,\dots,V$),
j	– munkaállomások indexe ($j=1,\dots,J$),
k	– képzettségi szint indexe ($k=1,\dots,K$).
Paraméterek:	
I	– műveletek száma,
J	– munkaállomások száma a modellben,
N	– munkaállomások tényleges száma,
K	– képzettségi szintek száma,
LS_k	– az a legkorábbi munkaállomás, amelyhez a k képzettségi szinthez tartozó műveletek a megelőző műveletek miatt hozzárendelhetők,
US_k	– az a legkésőbbi munkaállomás, amelyhez a k képzettségi szinthez tartozó műveletek a követő műveletek miatt hozzárendelhetők,
Q	– gyártási mennyiség,
W_k	– a k képzettségi szinthez tartozó munkásokra vonatkozó korlát,
z	– elegendően nagy szám (nagyobb mint I),
$Q_{\text{Max}}^{\text{OPT}}(N)$	– N munkaállomásból álló optimális gyártósor konfiguráció maximális gyártási mennyisége.
Halmazok:	
S_k	– a k képzettségi szinthez/típushoz tartozó műveletek indexhalmaza.
Változók:	
x_{ij}	– 0-1 döntési változó; ha $x_{ij}=1$, akkor feladat i -t munkaállomás j -hez rendeljük különben $x_{ij}=0$,
l_{jk}	– alacsonyképzettség-korláthoz tartozó 0-1 döntési változó; ha $l_{jk}=1$, akkor a k képzettségi szinthez tartozó munkást munkaállomás j -hez rendelünk, különben $l_{jk}=0$,
h_{jk}	– magasképzettség-korláthoz tartozó 0-1 döntési változó; ha $h_{jk}=1$, akkor a k képzettségi szinthez tartozó munkást munkaállomás j -hez rendelünk, különben $h_{jk}=0$,
e_{jk}	– kizárólagosképzettség-korláthoz tartozó 0-1 döntési változó; ha $e_{jk}=1$, akkor a k képzettségi szinthez tartozó munkást munkaállomás j -hez rendelünk, különben $e_{jk}=0$.

F4. táblázat: A 4. tézisnél alkalmazott jelölések

Indexek:

- i – entitások indexe ($i=1, \dots, I$),
 j – erőforrások indexe ($j=1, \dots, J$),
 k – annak az erőforrásnak az indexe, amelynél perturbáció keletkezik.

Változók:

- θ_k – erőforrás k műveleti idejének várható értéke,
 ξ – valószínűségi változó,
 $L(\theta_k, \xi)$ – a rendszer működési mutatójának egy meghatározott mintához tartozó értéke,
 $LL(\theta_k, \xi)$ – θ_k alsó korlátja, amelynél a determinisztikus hasonlóság még érvényes,
 $UL(\theta_k, \xi)$ – θ_k felső korlátja, amelynél a determinisztikus hasonlóság még érvényes,
 ni_{ij} – no-input esemény időtartama, amelyet E_i entitás okoz, amikor művelete az R_j erőforráson befejeződik,
 fo_{ij} – full-output esemény időtartama, amelyet E_i entitás tapasztal, amikor művelete az R_j erőforráson befejeződik,
 pni_{ij} – potenciális no-input esemény időtartama, amelyet E_i entitás okoz, amikor művelete az R_j erőforráson befejeződik,
 pfo_{ij} – potenciális full-output esemény időtartama, amelyet E_i entitás tapasztal, amikor művelete az R_j erőforráson befejeződik,
 ot_{ij} – R_j erőforráson az E_i entitás előzési lehetőséghez tartozó időtartama,
 $D_{ij}^{(NI)}$ – felhalmozott perturbációk együtthatója no-input esetén, amelyet E_i entitás okoz amikor művelete az R_j erőforráson befejeződik,
 $D_{ij}^{(FO)}$ – felhalmozott perturbációk együtthatója full-output esetén, amelyet E_i entitás tapasztal, amikor művelete az R_j erőforráson befejeződik,
 $D_{ij}^{(PNI)}$ – felhalmozott perturbációk együtthatója potenciális no-input esetén, amelyet E_i entitás okoz, amikor művelete az R_j erőforráson befejeződik,
 $D_{ij}^{(PFO)}$ – felhalmozott perturbációk együtthatója potenciális full-output esetén, amelyet E_i entitás tapasztal, amikor művelete az R_j erőforráson befejeződik,
 $D_{ij}^{(OT)}$ – felhalmozott perturbációk együtthatója, amikor az R_j erőforráson az E_i entitásnak előzési lehetősége van.

Egyéb jelölések:

- E_i – entitás i azonosítója,
 R_j – erőforrás j azonosítója.

F5. táblázat: Az 5/1. 5/2. és 5/3. téziseknél alkalmazott jelölések

Index:

- i – feladat indexe ($i=1, \dots, N$),
 j – feladat indexe ($j=1, \dots, N$),

Paraméterek:

- t_i – feladat i műveleti ideje,
 c_i – feladat i -hez tartozó alapanyagköltség,
 d_i – feladat i végrehajtásának határideje,
 q – folytonos kamatszámítás esetén a kamatláb éves értéke,
 $f(t_i)$ – feladat i exponenciálisan transzformált műveleti ideje.