

Válasz
Dr. Kovács György Professzor Úrnak
a *Sensitivity analysis at production planning and production scheduling models*
című MTA doktori értekezés bírálatára

Nagyon köszönöm Dr. Kovács György Professzor Úr bírálatát és külön köszönöm az értekezés eredményeivel kapcsolatos elismerő szavait. A bírálatban lévő kritikai megjegyzéseket, kérdéseket vastagon szedve kimásoltam a bírálatból. Válaszaim közvetlenül a kérdések, megjegyzések után találhatók. A két hosszabb kifejtést igénylő kérdés szerepel válaszsom elején.

„A 4. fejezet végén a jelölt kitér a tanulás szerepére és jelzi, hogy annak hatása lehet a ciklusidőre és az optimális tevékenység-hozzárendelésre, de ezzel kapcsolatban csak általános megállapításokat tesz. Az általános megállapításon túl, formálisan is kifejezhető ez a hatás?”

Gyártósor-kiegyenlítési problémáknál a tanulási hatás figyelembevétele akkor válik különösen fontossá, amikor a gyártási sorozatnagyság csökken és ezért a tanulási hatás által lényegesen érintett időtartam az átfutási idő meghatározó részévé válik.

A tanulási hatásnak a gyártósor-kiegyenlítési modellek eredményére kifejtett hatásával kapcsolatos legfontosabb eredmények Cohen és Dar-El nevéhez fűződnek. Cohen és Dar-El (1998) egy nemlineáris matematikai programozási modellt állított fel a munkaállomások számának minimalizálására tanulási hatásnak kitett gyártósorok esetén. A modellnek azonban egyik feltétele az volt, hogy a szűk-keresztmetszet az utolsó állomáson van. Cohen, Vitner és Sarin (2006) bebizonyította, hogy az átfutási idő minimalizálása esetén az optimális gyártósor-konfiguráció nem kiegyenlített és a szűk-keresztmetszet optimális esetben a sor végétől indulva előre vándorol. E megállapítást azonban csak abban az elméleti esetben igazolták, amikor a műveleti idők tetszőleges mennyisége rendelhető egy műveleti helyhez.

A tanulásnak a ciklusidőre, és ezen keresztül az átfutási időre kifejtett hatása az állomásidők változásának vizsgálatára épül. Állomásidő alatt az egy munkaállomáshoz rendelt tevékenységek fajlagos idejének összegét értjük, tehát azt az időt, amennyit egy munkás eltölt a munkaállomáshoz érkező munkadarabhoz kapcsolódó feladatok (gyártás, szerelés, ... stb.) elvégzésével. Azt kell megvizsgálni, hogy mely munkaállomásnál legmagasabb az állomásidő, mert az az állomás van a szűk-keresztmetszetben és határozza meg a kibocsátás ütemét, tehát a ciklusidőt. Az állomásidő azonban a tanulási hatás miatt folyamatosan csökken valamennyi, a tanulás által érintett állomáson, ezért változik a ciklusidő is. Az állomásidők változását egy öt munkahelyből álló egyszerű gyártósor esetén és a klasszikus, exponenciális tanulási hatást feltételezve, az 1. Ábra szemlélteti. A vízszintes tengely az utolsó munkahelyen gyártott darab sorszámát mutatja. Látható, hogy a gyártási darabszám függvényében csökken az egyes munkahelyek állomásideje. Mindig az a munkahely van a szűk-keresztmetszetben, amelyiknek az állomásideje a legnagyobb.

Az ábra alapján megállapítható, hogy a ciklusidő két ok miatt csökken. Egyrészt azért, mert minden állomásidő a tanulás miatt a gyártási darabszám függvényében csökken. Másrészt azért, mert egyes állomásidők jobban, mások kevésbé csökkennek a gyártás egyes szakaszaiban, így az állomások a szűk-keresztmetszetben válthatják egymást. Az ábrán például először az 5. munkahely található a szűk-keresztmetszetben. Néhány darab gyártása után a 3. munkahely kerül a szűk-keresztmetszetbe. További néhány darab gyártása után az első állomás lesz a szűk-keresztmetszet és az is marad a gyártás végéig. A ciklusidő állandó változása miatt, tanulási hatás esetén, a gyártósor-kiegyenlítés fókuszában már nem a ciklusidő csökkentése, hanem az átfutási idő minimalizálása áll. Az átfutási idő meghatározó részét az egyes munkaállomásoknak a szűk-

keresztmetszetben eltöltött ideje adja. Ez az idő az állomásidők burkológörbéjének integráljával közelíthető a gyártás tartományán. Az átfutási idő egy Q mennyiség legyártása esetén a következőképpen írható fel:

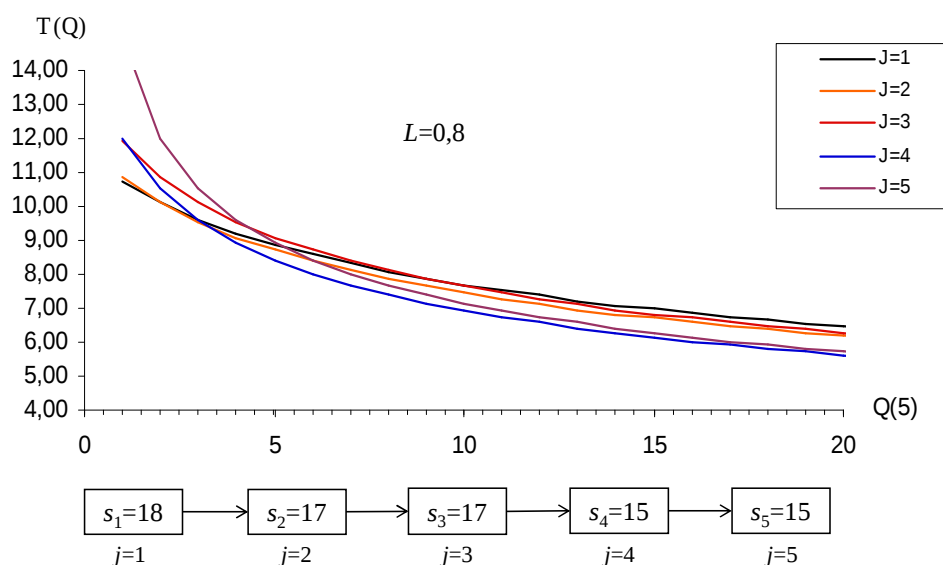
$$TH(Q) = \sum_{j=1}^{j=i-1} s_j + \sum_{(l,v),(k,l) \in I_{Sol}} \left(\sum_{q=Q(l,v)}^{q=Q(k,l)} s_l q^b \right) + \sum_{j=f+1}^{j=J} s_j Q^b \quad (1)$$

Az (1) összefüggés felírásakor a következő jelöléseket alkalmaztam:

- j – munkaállomások indexe,
- k – munkaállomások indexe,
- l – munkaállomások indexe,
- v – munkaállomások indexe,
- i – a szűk-keresztmetszetbe először belépő munkaállomás indexe,
- f – a szűk-keresztmetszetbe utoljára belépő munkaállomás indexe,
- q – gyártási mennyiség futó indexe,
- J – a munkaállomások száma,
- Q – gyártási mennyiség,
- $Q(k,l)$ – az a gyártási mennyiség, amelynél munkaállomás k belép, l pedig kilép a szűk-keresztmetszetből,
- s_j – munkaállomás j kezdeti állomásideje,
- b – az exponenciális tanulási görbe kitevője ($L=2^b$),
- $TH(Q)$ – átfutási idő függvény,
- I_{Sol} – a szűk-keresztmetszet váltásokhoz tartozó belépő és kilépő munkahelyek indexeit jelölő indexpárok halmaza.

Az átfutási idő értéke három részből tevődik össze:

- Az (1) összeg első tagja azt az időt jelenti, amely ahhoz szükséges, hogy a gyártás indulása után az első darab elérje az első szűk-keresztmetszetet.
- Az (1) összeg harmadik tagja azt az időt jelenti, amely ahhoz szükséges, hogy az utolsó darab, távozva a szűk-keresztmetszetből, elhagyja a gyártórendszert.
- Az (1) összeg középső tagja azt határozza meg, hogy az egyes munkahelyek mennyi időt töltenek a szűk-keresztmetszetben.



1. Ábra: Öt munkehelyből álló mintapéllda állomásidő-függvényei

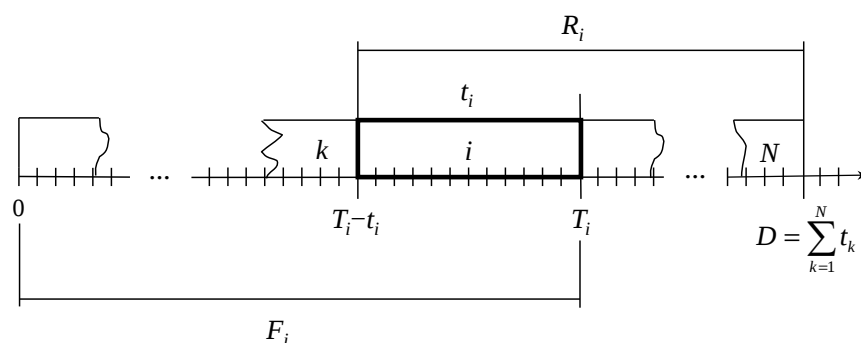
A szűk-keresztmetszet váltás úgy történik, hogy állomás l belép a szűk-keresztmetszetbe a v állomás helyett. Egy idő után azonban állomás k felváltja a szűk-keresztmetszetben az l állomást. A váltások a $Q(l,v)$ és $Q(k,l)$ darabok gyártásakor történnek. A $[Q(l,v); Q(k,l)]$ tartományban az egyes darabok gyártási ideje az $s_l q^b$ függvény szerint alakul és ezen idők összege adja az l munkahely szűk-keresztmetszetben eltöltött idejét. Az átfutási idő számításának, tehát meghatározó része a szűk-keresztmetszet váltásokhoz tartozó $Q(i,j)$ mennyiségek meghatározása. E mennyiségek meghatározására mutat egy lehetséges példát a Koltai, Kalló és Györkös (2015) által közölt algoritmus.

A bíráló kérdésére összefoglalóan az válaszolható, hogy formálisan is kifejezhető a tanulásnak a ciklusidőre és az átfutási időre kifejtett hatása. Ehhez azonban ismerni kell a szűk-keresztmetszet váltásokhoz tartozó gyártási mennyiségeket.

- Cohen, Y. és Dar-El, M.E., 1998. Optimizing the number of stations in assembly lines under learning for limited production. *Production Planning & Control*, 9 (3), 230-240.
- Cohen, Y., Vitner, G., and Sarin, S., 2006. Optimal allocation of work in assembly lines for lots with homogeneous learning. *European Journal of Operational Research*, 168 (3), 922-931.
- Koltai, T., Kalló, N. és Györkös R., 2015. Calculation of the Throughput-Time in Simple Assembly Lines with Learning Effect. *IFAC-PapersOnline* 48 (3), 314-319. 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing – INCOM 2015. Ottawa, Kanada: 2015.05.11 - 2015.05.13. (IFAC)

„A 6. fejezet 6.2.1 pontjában a jelölt levezeti a leghosszabb műveleti idő szabályt (LPT), mint optimalitási kritériumot, az általa vizsgált problémára. Ugyanakkor a gyakorlatban hasonló (de nem azonos) problémákra gyakran alkalmazzák a legrövidebb műveleti idő (SPT) szabályt, ami éppen ellenkezője a jelölt által levezetett szabálynak. Az SPT szabály elterjedtsége miatt talán érdemes lenne részletesen kifejteni, hogy mi az alapvető különbség a két egymással éppen ellentétes eredményt adó probléma között. További optimalizálási kritériumok is megfogalmazhatók lennének (pl. random műveleti idők).”

Az értekezésben levezetett LPT (leghosszabb műveleti idő) szabály és a klasszikus SPT (legrövidebb műveleti idő) szabályok közötti különbséget az 2. Ábra szemlélteti.



2. Ábra: A folyamidő és tartózkodási idő szemléltetése

Az **SPT szabály** esetén a cél az összes folyamidő minimalizálása. A folyamidő az első ütemezett feladat gyártásának kezdetétől a termék elkészültéig eltelt idő (F_i), melynek értéke a 2. Ábra alapján a következő,

$$F_i = \sum_{k=1}^i t[k] \quad (2)$$

Ahol a $[k]$ index a k -adiknak ütemezett alkatrészt/terméket jelöli.

Ebben az esetben azt feltételezzük, hogy a kezdeti időpontban bármely termék gyártása elkezdődhetne, mert minden alapanyag és a gyártáshoz szükséges erőforrás a rendelkezésre áll és kizárólag az ütemezési döntés eredménye, hogy melyik termék gyártása indul először. Ekkor a termékeknek a gyártás előtti várakozási idejét és a gyártásban eltöltött idejét minimalizáljuk, tehát az alapanyag és műveletközi készletek csökkentésére próbálunk hatni. A cél az összes feladat együttes folyamidejének minimalizálása, tehát

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N F_i \quad (3)$$

Többek között, a szomszédos feladatok felcserélésével bebizonyítható, hogy ebben az esetben az optimális folyamidőt akkor kapjuk meg, ha a feladatokat a műveleti idők nem-csökkenő sorrendje szerint hajtjuk végre.

Az **LPT szabály esetén** a cél a tartózkodási idő minimalizálása. A tartózkodási idő az ütemezett feladat gyártásának kezdetétől az összes termék elkészültéig eltelt idő (R_i), tehát a 2. Ábra alapján,

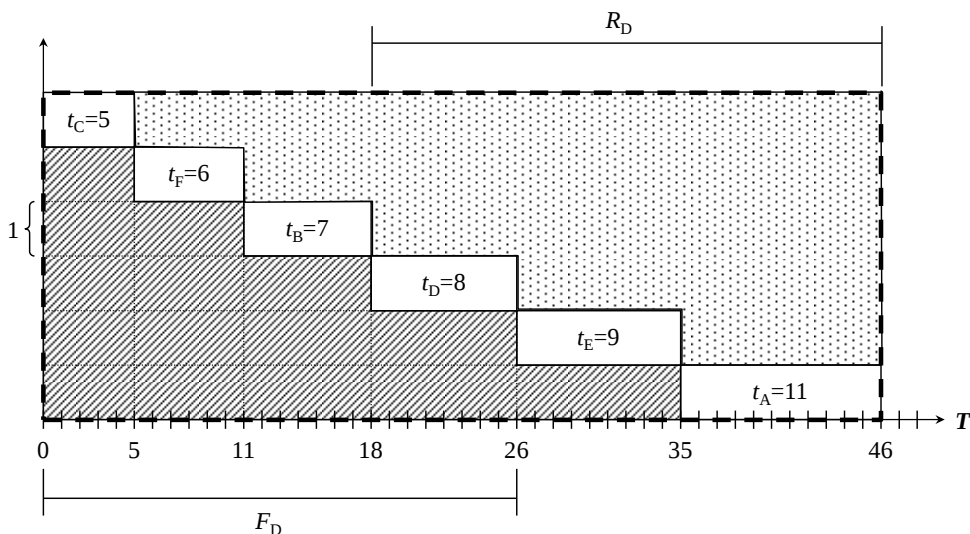
$$R_i = \sum_{k=1}^N t_k - (T_i - t_i) \quad (4)$$

Azt feltételezzük tehát, hogy valamennyi termék egyszerre hagyja el a gyártórendszert, de a szükséges alapanyagok, alkatrészek csak akkor érkeznek oda, amikor azok felhasználása elkezdődik. Ebben az esetben a termékeknek a gyártásban eltöltött és a gyártás után a raktárban töltött idejét minimalizáljuk, tehát a műveletközi és végtermék készletek csökkentésére próbálunk hatni. A cél az összes termék együttes tartózkodási idejének a minimalizálása, tehát

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N R_i \quad (5)$$

Az értekezésben bebizonyítottam, hogy ebben az esetben az optimális folyamidőt akkor kapjuk meg, ha a feladatokat a műveleti idők nem-növekvő sorrendje szerint hajtjuk végre.

A (3) és (5) feladatok optimális megoldása éppen ellenkező gyártási sorrendet eredményez. A két optimális megoldás kapcsolatát a 3. Ábra szemlélteti egy 6 alkatrész gyártási sorrendjét meghatározó példa segítségével.



3. Ábra: Az SPT és LPT ütemezési szabályok eredményének szemléltetése

Az ábra 6 alkatrész SPT ütemezését szemlélteti grafikusán. Minden feladathoz egy egységnyi magas sáv tartozik és az egyes alkatrészekhez tartozó téglalapok helyzete alapján meghatározhatók a kezdeti és befejezési idők. A D alkatrész gyártását például a 18. időegységnél kezdjük és a 26. időegységnél fejezzük be. A D alkatrészhöz tartozó nem sátozott téglalap grafikusán jeleníti meg az alkatrészhöz tartozó 8 időegységnyi műveleti időt. A D alkatrész előtti egységnyi magas ferdén sátozott sáv a várakozási időt ábrázolja, míg a sátozott és üres sáv együtt a folyamidő nagyságát jeleníti meg. A folyamidő szempontjából optimális ütemezés esetén az ábra ferdén sátozott területe a lehető legkisebb.

Ha az alkatrészek gyártásához szükséges alapanyagok, részegységek csak a gyártás elkezdésekor érkeznek és valamennyi kész alkatrész egyszerre távozik a raktárból, akkor a tartózkodási idő ábrázolása szükséges. Az összes alkatrész a 46. időegységnél készül el, tehát valamennyi alkatrész tartózkodási ideje akkor ér véget. Az ábráról leolvasható, hogy például a D alkatrész tartózkodási ideje $R_D = 46 - 18 = 28$ időegység. A pontozott terület az összes alkatrész elkészülés utáni várakozási idejének nagyságát ábrázolja. A végrehajtási időket mutató üres téglalap és a pontozott terület együtt, pedig az összes alkatrész együttes tartózkodási idejét jeleníti meg. Az ábrán szaggatott vonallal jelölt nagy téglalap területe három részre osztható:

- A ferdén sátozott rész az alkatrészek gyártás előtti várakozási idejét jelöli.
- A pontozott terület az összes alkatrésznek a végtermék raktárban eltöltött várakozási idejét ábrázolja.
- A nem sátozott terület pedig a végrehajtási idők összegét jeleníti meg.

A téglalap vízszintes oldalának hossza a műveleti idők összegével, függőleges oldalának hossza pedig az alkatrészek számával egyenlő. Ha nincsen sorrend függő átállási idő, akkor a téglalap területe minden sorrend esetén állandó, de a ferdén sátozott és pontozott területrészek aránya változik attól függően, hogy milyen sorrendben történik a gyártás. Ha a szaggatott vonallal jelzett téglalap területe állandó és a műveleti idők összege nem változik (nem sátozott rész), akkor a ferdén sátozott rész minimális értékekor a pontozott rész a lehető legnagyobb lesz. Az SPT szabály esetén tehát, az összes tartózkodási idő a legnagyobb, ezért a vonatkozó feladatra a legkedvezőtlenebb megoldást kapjuk. Ha viszont az LPT szabály segítségével minimalizáljuk a tartózkodási idők összegét, akkor a folyamidő szempontjából kapjuk a legkedvezőtlenebb megoldást.

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy bár az SPT az egyik leggyakrabban alkalmazott ütemezési szabály, alkalmazása előtt fontos megvizsgálni az ütemezési kritériumot. Az SPT szabály akkor ad kedvező megoldást, ha a gyártáshoz szükséges alapanyagok, alkatrészek az első feladat végrehajtása előtt már a raktárban vannak és minden termék/alkatrész azonnal távozik, amint elkészült. Az LPT szabály viszont akkor ad kedvező megoldást, ha az alapanyagok, alkatrészek „just-in-time” szerűen érkeznek, a termékek viszont egy közös határidővel távoznak. Minden más, az SPT és LPT szabályoktól eltérő sorrend, a vonatkozó feladat nem optimális megoldását eredményezi.

A értekezés címére vonatkozó kritikai észrevételek:

- „A cím megfelelően leírja a dolgozat tartalmát, bár kicsit általánosabb közelítést sejtet, mint ahogy az a tárgyalás során ténylegesen megvalósult.”
- „Talán szerencsés lett volna ezért utalni a címben arra, hogy néhány alapvető termelés-tervezési és termelés-ütemezési modell érzékenységvizsgálatáról van szó.”
- „Kár, hogy a cél, ami a címben is van, nem a valóságra vonatkozik, hanem „csak” a modellekre.”

Jogosnak érzem a bíráló címmel kapcsolatban felvetett észrevételeit. A cím kiválasztásakor két fő szempontot próbáltam figyelembe venni. Az egyik szempont az értekezés tartalmának lehető legpontosabb leírása. A másik szempont az értekezés által képviselt szemléletmód,

tudományos problémakör általános megfogalmazása. Az értekezés ugyan csak *néhány alapvető* termelésstervezési és termelésütemezési modell érzékenységvizsgálatával foglalkoznak, de a problémák kapcsán megfogalmazott érzékenységvizsgálati célok és a vizsgálathoz használt módszerek hasonló problémáknál *általánosan* alkalmazhatók. A „konkrét” és az „általános” cím párharcából végül az általánosabb cím került ki győztesen.

A címben szerepel, hogy az érzékenységvizsgálat a modellekre vonatkozik. Ha a modell megfelelően írja le a valós problémát, akkor természetesen az érzékenységvizsgálati eredmény a valóságra is vonatkozik. Sokszor azonban, például kutatási vagy szemléltetési célból, elméleti problémákat vizsgálunk. Ekkor az érzékenységvizsgálat eredménye már nem köthető konkrét gyakorlati esethez, de kutatási célú problémák vizsgálatát, egyes speciális problémák sajátosságainak szemléltetését segíthetik a kapott érzékenységi eredmények.

„Minden tárgyalt kutatási probléma fejezete önálló jelölésjegyzékkel rendelkezik. Ez nagyjából indokolt is, mert a sok, gyakran eltérő modellezési elvekre épülő jelölések egyetlen jegyzékbe foglalása nehézkessé tenné a képletek és magyarázatok értelmezését. Ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy jelentős többletmunkával ugyan, de megoldható lett volna egy – általában elvárt és elfogadott – egységes jelölésrendszer alkalmazása.”

Elfogadom a bírálónak a jelölésjegyzékkel kapcsolatos észrevételét. Amikor mérlegeltem az egységes jelölésjegyzék és a konkrét kutatási problémához kialakított külön jelölésjegyzék kérdését, akkor a modellek leírásának, a magyarázatoknak és levezetéseknek a könnyű követhetőségét tartottam a legfontosabb szempontnak. Ezért döntöttem végül a fejezetekhez tartozó önálló jelölésjegyzék mellett.

„A jelölt az értekezés 5 fő fejezetének eredményeit 5 téziscsoportban foglalta össze, összesen 11 tézise van. Ez elég sok, de még kezelhető. Ha a doktori folyamat során a jelölt megkérdezhetett volna, akkor bizonyára javaslok összevonásokat, de ez most közzététel lenne, így elfogadom, ahogy van.”

Elfogadom a bírálónak a tézisek összevonhatóságára vonatkozó megjegyzését. Az 5 téziscsoport és a csoportokon belül megfogalmazott több tézis az értekezés struktúrájához illeszkedik. Mindegyik tézis egy önálló eredményhez tartozik, de ezek az eredmények más csoportosításban, összevontan is megfogalmazhatók lennének.

„Az LP (lineáris programozás) modellek túlzott hangsúlyozása és sokoldalú vizsgálata azt az érzetet kelthetik, mintha a gyártórendszerek többségére alkalmazhatók lennének. Pedig, ha figyelembe vesszük a gyártórendszerek néhány, a tervező és üzemeltető számára „kellemetlen” tulajdonságát (pl. nem lineáris, dinamikus, heurisztikus), akkor az LP modellek általában nem életképesek.”

Egyetértek a bírálóval abban, hogy sok probléma nemlineáris természetű és ezért a linearitás feltételezésére épülő módszerek téves eredményre vezethetnek. Az értekezés 2. fejezete kifejezetten a lineáris programozási (LP) modellek érzékenységvizsgálatával foglalkozik. Nemlineáris termelésstervezési problémák esetén sem ritka azonban a nemlineáris feltételek linearizálása. Példaként említhető a nemlineáris költségfüggvény esetén gyakran alkalmazott szakaszonkénti linearizálás, ami természetesen jelentősen megnöveli a változók és a feltételek számát (lásd például Nahmias, 1993, 128. oldal). Amennyiben a linearizálás után kapott LP feladat mérete túl nagy, illetve ha a linearizált modell már nem írja le megfelelően a valós problémát, akkor az LP feladat és a hozzá tartozó érzékenységvizsgálat nem alkalmazható. Ilyen

esetekben is végezhető azonban analitikus, vagy empirikus érzékenységvizsgálat. Ezekkel az értekezésben nem foglalkoztam, de jelentőségükkel egyetértek.

Nahmias, S., 1993. *Production and Operations Analysis*. Irwin, 1993.

„Annak dacára, hogy az értekezésben vannak alkalmazások, amelyek az eredményeket igazolják a Tézisfüzetben a jelölt csak felsorolja a felhasználási mintapéldákat. Emiatt a téziseknek csak az elméleti ereje vizsgálható. Ugyanakkor a termelésstervezés és a termelésütemezés a gyakorlatban mutatja csak meg, hogy mit ér egy-egy algoritmus- javítás, -módosítás.”

Az értekezés több fejezetéhez is tartozik alkalmazási példa. Így az átfutási idő érzékenységvizsgálatával foglalkozó 5. fejezetében egy acélöntöde (ENSIDESA) gyártási folyamatával szemléltetem az érzékenységi információk felhasználhatóságát. A gyártósor- kiegyenlítési modellek kiegészítését munkaerő-feltételekkel egy kerékpár-összeszerelő üzem (OLYMPIA) példája szemlélteti a 6. fejezetben. Az ütemezési szabályok érzékenységvizsgálatával foglalkozó 7. fejezetben pedig egy naptárgyártó üzem (CalendArt) ütemezési problémájának megoldása található. Ezen alkalmazások csak szemléltetik a fejezetekben bemutatott és levezetett elméleti eredményeket. A gyakorlati munkák részletes dokumentálásához az értekezés keretei szűknek bizonyultak. A tézisfüzet az alkalmazási területeket pedig valóban csak felsorolja.

„A Tézisfüzet Bevezetés 2. bekezdésében: működésének javítása helyett a működtetése és javítása jobban hangzana, és talán a valóságnak is jobban megfelelne.”

Egyetértek a bíráló megjegyzésével. A javasolt megfogalmazás pontosabb.

„Jó lenne néhány alapfogalom meghatározása/megmagyarázása: rögtön a legelején a „félművelt” olvasó kedvéért. (pl. termelésstervezés és termelésütemezés).”

A termelésstervezés definíciója a szakirodalomban az egészen általános megfogalmazástól kezdve a konkrét tervezési probléma leírásáig rendkívül változatos és függ attól, hogy vezetéstudományi, vagy mérnöki alapon közelítjük a feladatot.

Az értekezés közelítéséhez legjobban illeszkedő definíció szerint a termelésstervezés 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 *termelésütemezés* pedig a már erőforrásokhoz rendelt feladatok végrehajtási sorrendjét, és/vagy a feladatok kezdési és befejezési idejének meghatározását jelenti.

E meghatározás elég általános ahhoz, hogy lefedje az értekezésben tárgyalt valamennyi problémát. Az egyes tervezési és ütemezési feladatok részletes definiálása pedig az egyes fejezetekben a konkrét feladatok kapcsán megtörténik.

„A 2.2-ben szó esik a rugalmas gyártórendszerekről, ahol rugalmasságként a „routing” rugalmasság szerepel. Ezen kívül ismerünk még egy csomó fajta rugalmasságot mint pl.

a volume, machine, production, process stb. Ezek közül is érdemes lenne még 1-2-vel foglalkozni.”

Egyetértek a bírálóval abban, hogy a rugalmasság értelmezése nagyon széleskörű, sokféle rugalmasság ismert. Rugalmas gyártórendszerekkel (FMS) kapcsolatban alapvetőnek számít többek között Browne et. al (1984) osztályozása, amely szerint a rugalmasság a következő területeken értelmezhető:

- gép rugalmasság (machine),
- folyamat rugalmasság (process),
- termék rugalmasság (product),
- volumen rugalmasság (volume),
- útirány rugalmasság (routing),
- bővítési rugalmasság (expansion),
- gyártási rugalmasság (production).

Egyes rugalmassági tényezők összefüggnek, mások egymástól függetlenek lehetnek. A termelés-tervezési modellek ritkán tekintik valamennyi rugalmassági szempontot egyszerre, nem ritka azok elkülönült, de ugyanakkor hierarchikus kezelése (lásd például Stecke, 1986), ami lehetővé teszi a modellezés egyszerűsítését.

Az értekezés valóban csak az útirány (routing) problémakörével foglalkozik. Korábbi munkáimban érintőlegesen foglalkoztam a volumen rugalmasság és a folyamat rugalmasság kérdéskörével is, de ezekkel kapcsolatban érzékenységvizsgálati kutatásokat nem végeztem, ezért azok nem szerepelnek az értekezésben (Guerrero et al. 1999; Farkas, Koltai és Stecke, 1999).

Brown, J., Rathmmill, K., Sethi, S.P., Stecke, K.E., 1984. Classification of flexible manufacturing systems. *The FMS Magazine*, April, pp.114-117.

Farkas, A., Koltai, T. and Stecke, K.E., 1999. *Workload balancing using the concept of operation types*. Michigan: University of Michigan Business School, 1999. 31 p. (Working Paper Series; 99-002.)

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.

Stecke, K.E., 1986. A hierarchical approach to solving machine grouping and loading problems of flexible manufacturing systems. *European Journal of Operational Research*, 24, pp.369-378.

„A 2.5-ben hiányolom a mesterséges intelligens megközelítést, itt szakértő rendszerekre, vagy pl. mesterséges neurális hálókra gondolok.”

Valóban e témakör kapcsán szóba jöhetnek a mesterséges intelligencia alapú módszerek és a neurális hálók, illetve más evolúciós algoritmusok. Ezekkel a bemutatott kutatások kapcsán nem foglalkoztam. Az említett módszereket elsősorban azokban az esetekben tartom célszerűnek, amikor a matematikai programozási modellekkel nem, vagy csak nagy idő- és erőforrás-ráfordítás mellett lehet megtalálni az optimális vagy kielégítő megoldást. Az értekezésben vizsgált problémák ezeket a módszereket nem igényelték, de az alkalmazásukat indokolt esetben feltétlenül fontosnak tartom.

„A SIMAN IV. ma már elavult szimulációs rendszernek tekinthető”

Egyetértek a tisztelt bíráló észrevételével. A perturbációelemzéssel kapcsolatos kutatásokat a 90-es évek elején végeztem egy spanyolországi projekt keretében. A SIMAN diszkrét szimulációs programnyelv azokban az években újjult meg és ARENA néven került forgalomba. Néhány évvel később én is áttértem az ARENA szoftvert használatára, de az értekezésben közölt kutatási projektben a SIMAN IV állt rendelkezésünkre. Az eredmények pontos dokumentálása érdekében szükségesnek tartottam megemlíteni a konkrét számításokhoz akkor felhasznált szoftvert.

„Az ötödik kutatási probléma egy kombinatorikus ” kezdetű mondatban az „egy” nem világos, és nehezen hihető.”

Egyetértek a bírálóval, hogy a megfogalmazás nem szerencsés. A mondat arra utal, hogy az optimális gyártási sorrend meghatározása a kombinatorikus optimalizálás területére tartozik, és a megfogalmazott probléma „egy” ilyen probléma. Szerencsésebb megfogalmazás lenne a következő:

„Az ötödik kutatási probléma a kombinatorikus optimalizálás területére tartozik.”

„Nem vehető zokon, de a Tézisek szakcikkekben lévő publikálása meglehetősen szétszórta, nyilván az egyes cikkek nem a tézisek közzétételét célozták, hanem kellő számú és minőségű cikk már jó alapot adott a tézissé fogalmazáshoz.”

Egyetértek a bíráló észrevételével és következtetésével. Az értekezés az elmúlt 25 évben végzett, a termeléstervezési és termelésütemezési problémák kérdéseivel kapcsolódó több kutatás eredményét összegzi. Az egyes kutatások eredményeit igyekeztem mindig a vizsgált probléma és az elért eredmények szempontjából legmegfelelőbb folyóiratokban publikálni. Előbb születtek meg tehát az eredmények és a publikációk. Ezen eredményeket foglaltam össze az értekezésben az érzékenységvizsgálat, mint szakmai keret, segítségével.

Ismételten köszönöm Professzor Úr szakértő, alapos és a további kutatási lehetőségekre is rámutató bírálatát.

Budapest, 2015. október 18.

Dr. Koltai Tamás