



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gyártástudomány és -technológia Tanszék



Magyar Tudományos Akadémia
Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet

Termelés- és kapacitástervezési módszerek rugalmas és újrakonfigurálható szerelőrendszerekhez

PhD tézisfüzet

Gyulai Dávid

Témavezető:

Dr. Monostori László, akadémikus

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gyártástudomány és -technológia Tanszék

Magyar Tudományos Akadémia
Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet

Budapest, 2018.

1. Bevezetés és célkitűzés

1.1. Problémafelvetés és motiváció

A vevői megrendelések napjainkban tapasztalható, a korábbiaknál is nehezebb előrejelezhetősége, illetve az összetett termékportfóliók kezelése komoly kihívásokat jelentenek a termelő vállalatok számára, a termékek költséghatékony gyártása ugyanis új, speciális termelés- és kapacitástervezési módszereket igényel. Amennyiben egy cég változatos termékválasztékkal rendelkezik, az ipari gyakorlatban általánosan elterjedt gyártórendszer struktúrák nem minden esetben kellően rugalmasak ahhoz, hogy biztosítsák a gazdaságos termelést a termékek életciklusának különböző szakaszaiban.

Kutatómunkám olyan módszerek kifejlesztésére irányult, melyek szerelőrendszerekkel kapcsolatos termelés- és kapacitástervezési problémákra nyújtanak költséghatékony megoldást, kihasználva a különböző struktúrájú erőforrások (dedikált, rugalmas, újrakonfigurálható) nyújtotta előnyöket. A módszereket valós autóiipari problémákat szem előtt tartva dolgoztam ki, elsősorban azért, mert ebben az iparágban különösen gyakori a széles termékpaletta, és az —úgynevezett „ostorcsapás effektus”¹ (bullwhip effect) miatt főként a beszállítókat érintő— ingadozó gyártási igény. Az autóiiparban széles körben alkalmazott manuális és hibrid (kézi és gépi erőforrásokat egyaránt alkalmazó) szerelőrendszerek sajátossága, hogy kapacitásaik rugalmasan igazíthatóak a vevői igényekhez, a kapacitásváltoztatás azonban mindig költségekkel jár, melyek csökkentése —lehetőség szerint minimalizálása— rövid és hosszútávon egyaránt fontos cél.

1.2. A kutatás célkitűzései

A kutatómunka során az elsődleges célom olyan kapacitástervezési módszerek kidolgozása volt, melyek a tervezési hierarchia mindhárom szintjén, vagyis hosszú- (stratégiai), közép- (taktikai) és rövidtávon (operatív szint) is hatékonyan képesek összehangolni a termelési folyamatokat a változó vevői igényekkel széles termékválaszték esetén is. Ennek megfelelően olyan modelleket vizsgáltam, amelyek képesek biztosítani a költséghatékony termelést a belső (technológiai) és külső (vevői) korlátozások figyelembevételével. Kutatásomat a szerelőrendszerekre fókuszálva a célom egy olyan döntéstámogatási módszer kidolgozása volt, amely támogatja a rendszerek költséghatékony kapacitásmenedzsmentjét, és beilleszthető a

¹Az ellátási láncban a vevőtől visszafelé haladva a rendelések változása által okozott negatív hatások (például készletszintek) mértéke egyre inkább felerősödik.

már meglévő tervezési folyamatokba.

A stratégiai, vagyis hosszútávú döntések esetén az elsődleges feladat a becsült, gyakran bizonytalan adatokra támaszkodó előrejelzések alapján történő rendszer-konfiguráció, valamint az ezzel járó esetleges kapacitásbővítés és újrakonfigurálás. A döntések során a várható jövőbeli igények mellett fontos figyelembe venni a szerelőrendszer aktuális állapotát, vagyis az aktuálisan gyártott termékeket és a hozzájuk rendelt különböző erőforrásokat. A gyártási darabszámok függvényében eltérő rendszerstruktúrák biztosítják a költséghatékony termelést: a teljes szerelőrendszer úgynevezett heterogén erőforráskészlettel rendelkezik, amennyiben egyaránt tartalmaz dedikált (tömeggyártás), rugalmas (közepes sorozatnagyság) és újrakonfigurálható szerelősorokat (kis sorozatú, és egyedi gyártás). Az egyes erőforrástípusok üzemeltetési és beruházási költsége sok tényezőtől függ, melyeket a gyakorlatban igen nehéz a jövőre vonatkozóan pontosan becsülni. Fontos kiemelni továbbá, hogy hosszútávon az üzemeltetési költségek gyakran egy nagyságrendbe esnek a beruházási költségekkel, vagyis mindkettőt figyelembe kell venni a döntések során. Stratégiai szinten tehát a cél egy olyan új módszer kidolgozása, amely a gyártórendszer aktuális állapota, valamint a jövőben várható gyártandó mennyiségek figyelembevételével támogatja a rendszer-konfigurációt —vagyis az egyes termékek dedikált, rugalmas és újrakonfigurálható erőforrásokhoz rendelését— és a gyártáshoz szükséges erőforráskészlet meghatározását.

Taktikai és operatív szinteken már sokkal kisebb a döntéshozók mozgástere az erőforrás-gazdálkodás terén, vagyis csak indokolt esetben és korlátozott mértékben lehetséges a kapacitások bővítése, vagyis jellemzően csak a rendelkezésre álló erőforrásokkal lehet számolni a termelés- és kapacitástervezés során. A termelési folyamatokra általánosságban igaz, a kézi szerelőrendszerekre pedig fokozottan érvényes, hogy a tervezési folyamatot, valamint a tervek végrehajtását is megnehezítik a változó, sztochasztikus paraméterek (például a kézi szerelési műveletek ideje). A középtávon történő tervezés során az emberi erőforrások helyes tervezése nagyobb jelentőséggel bír mint a stratégiai szintű rendszer-konfigurációnál, ezért a kutatás során olyan új, robusztus módszerek fejlesztése volt a cél, melyek képesek az emberi erőforrásokat is hatékonyan kezelni. A számított tervekkel szembeni elvárás, hogy a tervek bizonyos paraméterek változása (gyártási idők, rendelkezésre álló kapacitás stb.) esetén is végrehajthatóak legyenek a gyakorlatban. A robusztusság mellett a modellekkel szemben további követelmény, hogy kezelni tudják a rendszerek moduláris felépítését valamint gyakori újrakonfigurálását.

2. A kutatás előzményei és módszertana

2.1. A kutatási előzményei

A széles termékportfólió kezelése az úgynevezett *product variety management*, vagyis termékváltozatosság-menedzsment, amely napjaink egyik legnagyobb kihívása a termelő vállalatok számára, ugyanis befolyásolja a terméktervezési, valamint a termelés- és művelettervezési folyamatokat is [1]. A vevői igények kielégítése és a belső hatékonyság növelése érdekében olyan gyártórendszer struktúrák alkalmazására van szükség, amelyek képesek gyorsan alkalmazkodni a darabszámok és a termékportfólió változásához. A gyártási mennyiség és a gyártott terméktípusok számától függően más-más gyártórendszer típusok biztosítják a költséghatékony termelést: a tömeggyártás jellemzően úgynevezett dedikált gyártórendszerek segítségével történik, míg a rugalmas rendszerek adott számú terméktípus gyártására alkalmasak, kötött struktúrában, de állítható technológiai paraméterek segítségével. A gyakorlatban egyre elterjedtebbek az úgynevezett változtatható gyártórendszerek (*changeable manufacturing systems*) [2], melyek egyes típusai esetén a rendszer struktúrája is gyorsan módosítható, ezáltal igazítva azt a különböző terméktípusok eltérő gyártási, technológiai igényeihez (újrakonfigurálható rendszerek) [3].

Napjainkban jelentős azon vállalatok száma, amelyek széles termékportfóliót kezelnek, és az adott termékek gyártási darabszámai között akár nagyságrendbeli eltérés is lehetséges. Ilyen esetekben a hatékony termeléshez szükséges a heterogén struktúrájú gyártórendszerek alkalmazása, amelyek stratégiai szintű tervezése és konfigurációja során a legfontosabb feladat a különböző erőforrások számának meghatározása, valamint a termékek gyártásának hozzárendelése a dedikált, rugalmas vagy újrakonfigurálható erőforrásokhoz. Az ilyen döntések minden esetben költségalapon történnek, azonban a gyártási és beruházási költségek becslése összetett feladat olyan esetben, amikor a rendszer struktúrája időben dinamikusan változik [4]. Az olyan, beruházással és rendszer-konfigurációval kapcsolatos döntési feladatok megoldására, ahol heterogén erőforráskészlet meghatározása a cél, többen jelenérték számítási módszereket (*net present value, NPV*) alkalmaznak döntési folyamat részeként [5], [6]. Az NPV alapú modellek azonban sok esetben korlátozzák a döntéshozók rugalmasságát, és nem képesek megfelelően kezelni a beruházási döntésekben rejlő lehetőségeket, ezért a feladatok megoldására esetenként alkalmasabb a reálopció (*real options*) alapú számítás [7], [8]. A stratégiai döntések során gyakran csak a be-

ruházási költségeket veszik figyelembe, azonban hosszú távon az üzemeltetési költségek is egy nagyságrendbe esnek ezekkel, ezért egyiket sem szabad elhanyagolni. Léteznek olyan rendszer-konfigurációs optimalizálási modellek, amelyek figyelembe veszik a különböző típusú erőforrások üzemeltetési költségeit, azonban ezek jellemzően automatizált gyártórendszerek konfigurálását támogatják, és a rendszer eltérő struktúrája miatt nem alkalmazhatóak gyorsan újrakonfigurálható, moduláris szerelőrendszerek konfigurálásához [9]–[11].

A szerelőrendszerek stratégiai szintű kapacitásmenedzsmentje nem lehet hatékony abban az esetben, ha csupán közgazdaságtani szempontból vizsgáljuk a felmerülő költségeket, és ezek alapján döntünk [2]. Ennek elsődleges oka az, hogy az üzemeltetéssel kapcsolatos költségek —amelyek jellemzően közép- és rövidtávon jelentkezők— valamint a rendszer konfigurációja szoros összefüggésben állnak a technológiai igényekkel [12]. A középtávon jelentkező üzemeltetési költségek elsősorban a termelésstervezés szintjén kezelhetők az erőforrások és a vevői megfelelő igények összehangolása révén, azonban a termelési tervekkel, valamint a végrehajtásukkal járó költségekkel csak kevesen foglalkoztak eddig a rendszerek tervezési és konfigurációs fázisában. A legnagyobb kihívás, hogy ekkor még nem áll rendelkezésre elegendő, a termelésstervezéssel kapcsolatos információ, ezért kevés olyan megoldás létezik amely hatékonyan figyelembe veszi az előbbi tényezőket [13]–[15]. Mivel a moduláris, gyorsan újrakonfigurálható rendszerek struktúrája dinamikusan változik, a tervezési feladat megoldása speciális erőforráskorlátok bevezetését igényli [16], és egyelőre nincs olyan kiforrott rendszer-konfigurációs módszer moduláris szerelőrendszerekhez, amely hatékonyan kezelné az üzemeltetéssel járó költségeket.

A szerelési folyamatokat sok esetben nem lehet, vagy gazdaságilag nem érdemes automatizálni, ezért az iparban elterjedtek a kézi, vagy félig automatizált szerelőrendszerek. Az ilyen rendszerekhez kapcsolódó gyártásszervezési feladatok megoldása során az egyik legnagyobb kihívást a kézi műveleti idők szórása jelenti, megnehezítve a sorkiegyenlítést valamint a kapacitásstervezést is. A szerelősorokat jellemzően a paraméterek determinisztikus jellegét feltételezve tervezik, és a termelésstervezés során is ennek megfelelően történik a dolgozói létszámok meghatározása a kívánt kihozatal elérése érdekében. Amennyiben a műveleti idők bizonyos szórással rendelkeznek, a kapacitások terhelésének egyensúlya felborul, és instabillá, bizonytalanná válik a rendszer teljesítménye, ezáltal pedig a kihozatal is [17]. Kézi szerelősorokkal kapcsolatban főleg csak sorkiegyenlítési megoldások léteznek olyan esetekre, amikor a műveleti idők nem determinisztikusak [18], [19], a kapacitás- és termelésstervezésre

nincs a gyakorlatban általánosan elfogadott és alkalmazott módszer. Ahhoz, hogy a tervezésben megfelelően lehessen kezelni a sztochasztikus műveleti időket, valamint az általuk létrejövő kapacitásterhelési változásokat, robusztus módszerekre van szükség, melyek biztosítják, hogy a vizsgált tényezők adott tartományon belüli változása esetén is az előre elvárt módon teljesíthető lesz a terv. Az ilyen tervek számítására még a korszerű, integrált termelés-tervező és ütemező alkalmazások (*advanced planning and scheduling, APS*) sem képesek [20]. Az említett okok miatt a kutatás során fontos szerepet kapott az ipari gyakorlatban is alkalmazható, robusztus tervezési módszerek fejlesztése.

2.2. A kutatás módszertana

A kutatás, során fontos szempont volt az, hogy a különböző vizsgált problémák megoldására hatékony, korszerű eszközöket alkalmazzak. Az úgynevezett digitális gyártási és digitális vállalati technológiák széles eszköztárat kínálnak, melyből a módszerek kidolgozásakor minden esetben igyekeztem kiválasztani az adott célnak leginkább megfelelőt. Nagy hangsúlyt fektettem továbbá a problémák formális leírására, és az így kapott optimalizálási modellek (jellemzően valamilyen lineáris, kevert-egészértékű modell, MIP) megoldására. Stratégiai és taktikai szinteken deklaratív környezetben definiált matematikai modellek alkalmazásával oldottam meg a felmerülő problémákat, emellett operatív szinten alkalmaztam olyan korlátozás-programozási eszközöket, amelyek kifejezetten alkalmasak erőforrás-korlátos ütemezési problémák megoldására. A matematikai modellek által kiszámított megoldásokat (rendszer-konfiguráció, termelési terv) a valós termelési környezetet részletesebben leíró szimulációs modellek segítségével elemeztem, a tervek valós végrehajtását szimulálva. Az úgynevezett diszkrét, eseményvezérelt szimulációs modellek egyik legnagyobb erőssége, hogy lehetővé teszik részletes folyamatmodellezést akár nagyon komplex rendszerek és irányítási logikák esetén is. A másik nagy előnye az ilyen modelleknek, hogy hatékonyan képesek figyelembe venni a véletlenszerű hatásokat (pl. gépleállások) és a különböző sztochasztikus paramétereket, jól kiegészítve ezáltal a matematikai modelleket, melyekben az említett tényezők legtöbbször csak körülményesen kezelhetők.

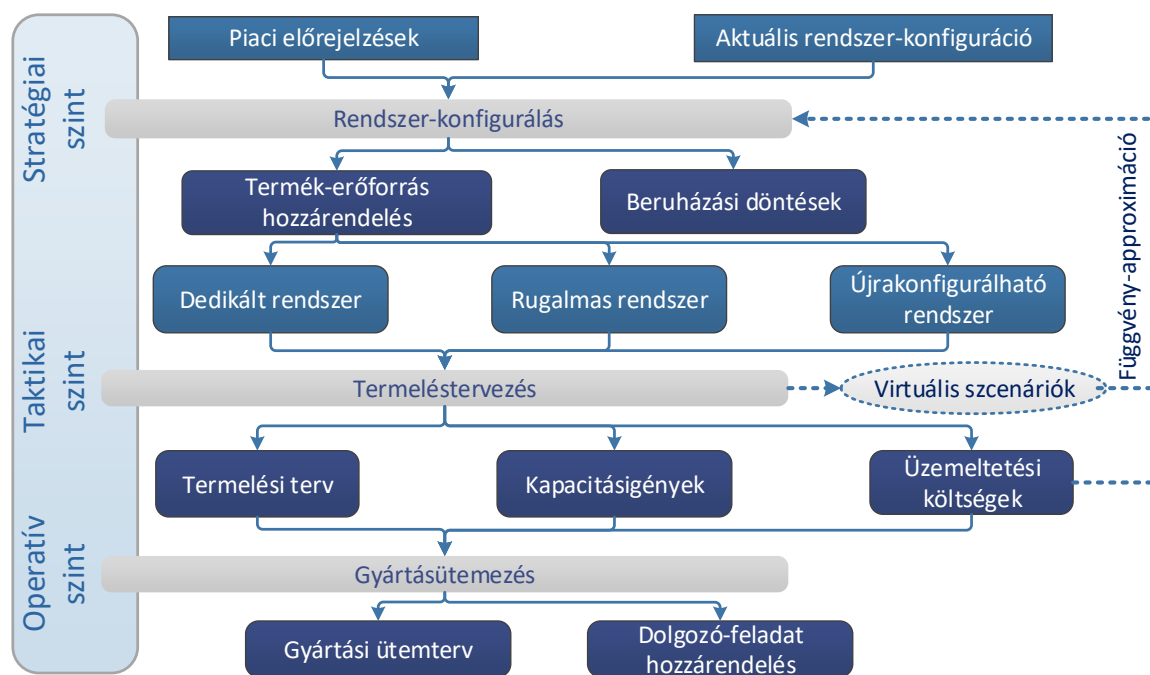
A korszerű, úgynevezett kiberfizikai gyártó- és szerelőrendszerek nagy mennyiségű, jellemzően technológiai jellegű információt hordozó adatot állítanak elő az üzemeltetés során, továbbá a szimulációs és matematikai modelleken végzett kísérletek is további adatokat generálnak, melyek feldolgozásához hatékony adatelemzési eszköztár alkalmazására van

szükség. Ebből kifolyólag a szimuláció és az optimalizálás mellett az alkalmazott eszköztár fontos részei voltak a különböző adatelemzési és statisztikai tanulási modellek. Az új módszerek —elsősorban a robusztus termelés-tervezési modellek— működésének alapjául szolgálnak a különböző gyártási adatok, amelyeket folyamatosan gyűjtve és feldolgozva az alkalmazott modellek mindig a rendszer kvázi-valós állapotát reprezentálják, ezáltal megbízható eredményeket képesek szolgáltatni.

3. Új tudományos eredmények

3.1. Moduláris szerelőrendszerek többszintű kapacitásmenedzsmentje

Kidolgoztam egy olyan új módszert, amely a moduláris, heterogén erőforráskészletű szerelőrendszerek esetén a tervezési hierarchia mindhárom szintjén biztosítja a költséghatékony tervek kiszámítását, széles termékpaletta és változó vevői igények esetén is (1. ábra). A módszerhez tartozó keretrendszer felső szintje felelős a stratégiai, beruházással kapcsolatos döntések támogatásáért, a középső szint a termelés- és kapacitás-tervezési feladatok megoldásáért, az alsó szint pedig az operatív termelésirányítási döntéstámogatásért. A keretrendszer felsőbb szintjein számított megoldások az alsóbb szinten végrehajtott modellekben bemenetként szerepelnek, biztosítva a döntések és megoldások vertikális integritását.



1. ábra. Hierarchikus módszer moduláris, kézi szerelőrendszerek kapacitásmenedzsmentjéhez.

3.1.1. Stratégiai szinten történő rendszer-konfiguráció és erőforrás-hozzárendelés

Moduláris, heterogén erőforrás-készletű szerelőrendszerek esetén a legfontosabb stratégiai döntések a termékek gyártási folyamatainak különböző típusú erőforrásokhoz való hozzárendelésére vonatkoznak. A fő kérdés, hogy hosszú távon —jellemzően több hónapos vagy éves horizonton— mely termékeket érdemes dedikált, rugalmas, illetve újrakonfigurálható erőforrások segítségével gyártani. A döntések során a cél a költségek hosszútávon történő minimalizálása, figyelembe véve a jövőben várható vevői rendeléseket, valamint az aktuálisan rendelkezésre álló erőforráskészletet. Mivel a döntések a termék-erőforrás hozzárendelés esetén beruházásokat is maguk után vonhatnak, ezért a hozzárendeléssel egy időben egy rendszer-konfigurációs feladatot is meg kell oldani, amely során biztosítani kell, hogy a rendelkezésre álló kapacitások minden esetben összhangban vannak a vevők által követelményként támasztott gyártási kihozattal. A stratégiai döntések a termékek szempontjából kétféleképpen lehetnek: termékalapú döntések, illetve termék-portfólió alapú döntések:

Termékalapú döntések során a cél a költségek minimalizálása oly módon, hogy termékenként meghatározzuk azt az erőforrástípust, amellyel az adott termék gyártása a legkisebb költséggel jár. A döntések során a legnagyobb kihívást az jelenti, hogy az újrakonfigurálható erőforrások üzemeltetési költsége nemlineáris függvénykapcsolatban áll a gyártási darabszámokkal, a szerelősorok ugyanis egy közös erőforráskészletből épülnek fel, és a költségekkel kapcsolatos fő teljesítménymutatók az alkalmazott termelési tervektől függően változnak (pl. gyártási idő) [C1]. Új módszereket dolgoztam ki termékalapú döntéstámogatáshoz, ahol a nemlineáris költségfüggvényeket szimulációs, valamint optimalizálási módszerek által szolgáltatott adathalmazok alapján, regressziós modellekkel közelítettem. A modellek segítségével az úgynevezett sor-hozzárendelési feladatot oldottam meg, meghatározva azt, hogy mely terméket érdemes dedikált illetve újrakonfigurálható szerelősorokon gyártani, vagy a termék a gyártását kiszervezni. A termékalapú döntések segítségével elért eredmények igazolták, hogy a középtávon felmerülő, az újrakonfigurálható rendszerekkel kapcsolatos költségek lineáris approximációs eljárások segítségével becsülhetőek.

A sor-hozzárendelési feladatban elért eredmények alapján kidolgoztam egy olyan *termék-portfólió alapú* döntéstámogatási módszert, amely az erőforrás hozzárendeléssel kapcsolatos

rendszer-konfigurációs feladatra is szolgáltat megoldást, figyelembe véve az egyes termékek gyártási folyamatai közötti kapcsolatot, amely a közös erőforráskészlet alkalmazása miatt elsősorban az újrakonfigurálható erőforrások esetén fontos. A feladat megoldására egy olyan új, egészértékű optimalizálási modellt javasoltam, ahol a különböző, üzemeltetéssel és beruházással kapcsolatos költségek becslése regressziós modellekkel történik, oly módon, hogy a regresszió tanítóhalmazát a középszintű tervezési feladat megoldásai szolgáltatják, virtuális scenáriók alapján. A függvények segítségével a gyártási és beruházási költségek az alkalmazott szerelőrendszer struktúra és a kapacitásigények alapján hatékonyan becsülhetőek mindhárom erőforrástípus esetén. A modellekben új változók bevezetésével nemlineáris függvénykapcsolatok is kezelhetők, amelyek kifejezik az adott termékek gyártási folyamatai közötti összefüggéseket a modell linearitásának megőrzése mellett.

1. Tézis: Tervezési keretrendszerben a heterogén erőforrás-készletű szerelőrendszerek stratégiai szintű erőforrás-hozzárendelési és rendszerkonfigurációs feladata az alábbi egészértékű optimalizálási modell segítségével oldható meg. A modellben az üzemeltetéssel járó, középtávon jelentkező költségek becslése regresszióval történik, ahol a regressziós modell tanítóhalmazát a középszintű tervezési feladat virtuális scenáriókon történő megoldásai szolgáltatják. Az optimalizálási modell általános alakja a következő:

minimize

$$\Psi(z_{pu}^s, w_{pu}^s) + \Theta(z_{pu}^s, w_{pu}^s) + \Gamma(z_{pu}^s, w_{pu}^s) + \Lambda(z_{pu}^s, g_{bu}^s) \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{s \in S} z_{pu}^s = 1 \quad \forall p \in P, u \in U \quad (2)$$

$$w_{pu}^s \geq z_{pu}^s - z_{p,u-1}^s \quad \forall p \in P \quad (3)$$

$$g_{bu}^s \geq z_{pu}^s \quad \forall b \in B = \{1 \dots p_b\} \quad (4)$$

$$\Phi(z_{pu}^s) \leq h^{\max} \quad \forall p \in P, u \in U, s \in S \quad (5)$$

$$\Upsilon(z_{pu}^s) \leq m^{\max} \quad \forall p \in P, u \in U, s \in S \quad (6)$$

$$z_{pu}^s \in \{0, 1\} \quad w_{pu}^s \in \{0, 1\} \quad g_{bu}^s \in \{0, 1\} \quad \forall p \in P, u \in U, s \in S, b \in B \quad (7)$$

A modell célfüggvényében (1) Ψ az eszközök elavulási, Θ a termékek új erőforráshoz rendelésének, Λ a beruházások, Γ pedig az üzemeltetési költségek

függvénye. A (2)-(4) korlátozások a megoldás érvényességét garantálják, míg (5) és (6) technológiai jellegű összefüggések, melyek a gyártás során igénybe vett emberi (5) és gépi (6) erőforrásmennyiségek felső korlátait fejezik ki. A nemlineáris Ψ , Θ , Λ és Γ függvények a középszintű tervezési feladat által szolgáltatott adathalmazra illesztett többváltozós lineáris regressziós modell segítségével közelíthetők, megőrizve ezzel a teljes modell linearitását. A modellek bemenő paraméterei a termékek gyártási kapacitásigénye (idő), valamint az egyes erőforrástípusokhoz rendelt termékek száma. A döntési változók közül z_{pu}^s megadja, hogy p terméket u periódusban s rendszerben szereljük-e, g_{bu}^s pedig a termékek tetszőlegesen választott b részhalmazaira fejezi ki, hogy az azokban található termékek mindegyikét s rendszerben szereljük-e u periódusban.

Az 1. tézis eredményeit az értekezés 3. fejezete tárgyalja, a tézishez kapcsolódó publikációk: [J1],[J2],[C2],[C3],[C1],[C4],[O1]

3.1.2. Taktikai szinten történő termelés- és kapacitásstervezés

A vizsgált heterogén erőforrás-készletű, moduláris szerelőrendszerek esetén a középtávú termelésstervezési döntések célja a gyártási sorozatnagyságok (*lot size*) meghatározása a vevői rendelések és a rendelkezésre álló kapacitások alapján. Dedikált és rugalmas erőforrások tervezéséhez léteznek kiforrott modellek, azonban a gyorsan újrakonfigurálható, moduláris szerelősorokhoz még nincs a szakirodalomban elérhető tervezési módszer. Olyan új, egészértékű programozási modellek kifejlesztésével foglalkoztam, amelyek nem csak a középtávú döntések támogatását célozzák meg, hanem általánosan alkalmazhatóak a stratégiai, valamint a későbbi operatív szintű döntések meghozatalában dedikált, rugalmas és újrakonfigurálható erőforrások esetén is. Azokat virtuális szcenáriókon alkalmazva, a kidolgozott modellek a stratégiai szintű döntési feladatokban alkalmazott költségbecslési függvények tanítóhalmazát szolgáltatják. Ebben az esetben a termelésstervezési modellt kapacitásbővítési lehetőséggel kiegészített, módosított célfüggvénnyel kell alkalmazni. Az újrakonfigurálások számának kezelésére két lehetőség áll rendelkezésre a modellekben: új korlátozások és segédváltozók bevezetésével, vagy pedig részfeladatként egy speciális utazóügynök probléma megoldásával. Utóbbi esetben feltételezzük, hogy egy újrakonfigurálható soron adott időegységben csak legfeljebb adott számú (felső korlát) terméktípust tudunk gyártani.

2. Tézis: A moduláris, újrakonfigurálható kézi szerelőrendszerek középtávú termelés- és kapacitástervezési feladatát az alábbi egészértékű optimalizálási modell segítségével írtam le, minimalizálva a gyártással járó költségeket és figyelembe véve az emberi és gépi erőforrásigényeket.

minimize

$$\sum_{t \in T} h_t c^{\text{opr}} + \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} y_{pt} c^{\text{set}} + \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} x_{nt} c_{nt} + \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} \sum_{j \in J} c^{\text{opn}} x_{nt} r_{jp_n} \quad (8)$$

subject to

$$\sum_{t \in T} x_{nt} = 1 \quad \forall n \in N \quad (9)$$

$$n_j \leq r_j^{\text{avail}} \quad \forall j \in J \quad (10)$$

$$\sum_{p \in P} r_{jp} y_{pt} \leq n_j \quad \forall j \in J, t \in T \quad (11)$$

$$x_{nt} \leq y_{pt} \quad \forall t \in T, n \in N, p = p_n \quad (12)$$

$$\sum_{n \in N} x_{nt} t_p^{\text{proc}} + y_{pt} (t_p^{\text{rec}} + t_p^{\text{set}}) \leq h_t t^w \quad \forall t \in T, p = p_n \quad (13)$$

$$h_t \in \mathbb{Z}^+ \quad n_j \in \mathbb{Z}^+ \quad y_{pt} \in \mathbb{Z}^+ \quad x_{nt} \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J, t \in T, n \in N, p = p_n \quad (14)$$

A modellben J az erőforrástípusok, T az időegységek, P a termékek, N pedig a rendelések halmaza. A költségparaméterek jele c , t_p^{proc} a p termék kézi műveleti időinek összege, t_p^{rec} és t_p^{set} a p termékhez tartozó újrakonfigurálási és átállási idők, t^w az időegységek hossza. Az n rendeléshez tartozó terméktípust p_n definiálja, r_j^{avail} a rendelkezésre álló modulkészlet (szerelőállomások), r_{jp} a p termék által igényelt j modulok száma. A modell döntési változói közül x_{nt} definiálja, hogy n rendelést mely t időegységben gyártjuk, y_{pt} az átállásokat fejezi ki, h_t a dolgozók létszáma t időegységben, n_j pedig a j típusú modulok száma. A célfüggvényben (8) c^{opr} , c^{set} , c_{nt} és c^{opn} költségparaméterek kifejezik a dolgozók, átállások, határidőtől való eltérés valamint az üzemeltetés költségét. A korlátozások közül (9) a rendelések legyártását, (10) és (11) az erőforrások használatát, (12) és (13) pedig az átállásokat és a dolgozói kapacitásokat hangozza össze. A modell célfüggvényét a $\sum_{j \in J} n_j c_j^m$ taggal bővítve (15), ahol c_j^m a modulok beszerzési költsége, valamint a korlátozások közül (11)-t elhagyva, lehetőség van az erőforráskészlet megváltoztatására új modulok beszerzésével, így

a modell alkalmazható a stratégiai tervezési feladat költségbecsléséhez virtuális szcenáriók megoldásával.

$$\sum_{t \in T} h_t c_t^{\text{opr}} + \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} y_{pt} c^{\text{set}} + \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} x_{nt} c_{nt} + \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} \sum_{j \in J} c^{\text{opn}} x_{nt} r_{jp_n} + \sum_{j \in J} n_j c_j^{\text{m}} \quad (15)$$

Amennyiben a tervezési időegységen belüli újrakonfigurálást nem engedjük meg a modellben, úgy az újrakonfigurálások számának csökkentése megoldható a tervezési feladatból levezetett utazóügynök probléma megoldásával. A súlyozott állapotgráf csúcsai az egyes időegységek, a gráf élein szereplő súlyok pedig a konfigurációk között definiált távolságfüggvénnyel adhatók meg, kifejezve a két csúcsban gyártott termékek által igényelt erőforráskészletek közötti különbséget. A modell megoldása a moduláris szerelőrendszerek időindexált termelési terve, amely megadja a gyártási sorozatnagyságokat és az ezekhez tartozó erőforrás-hozzárendelést.

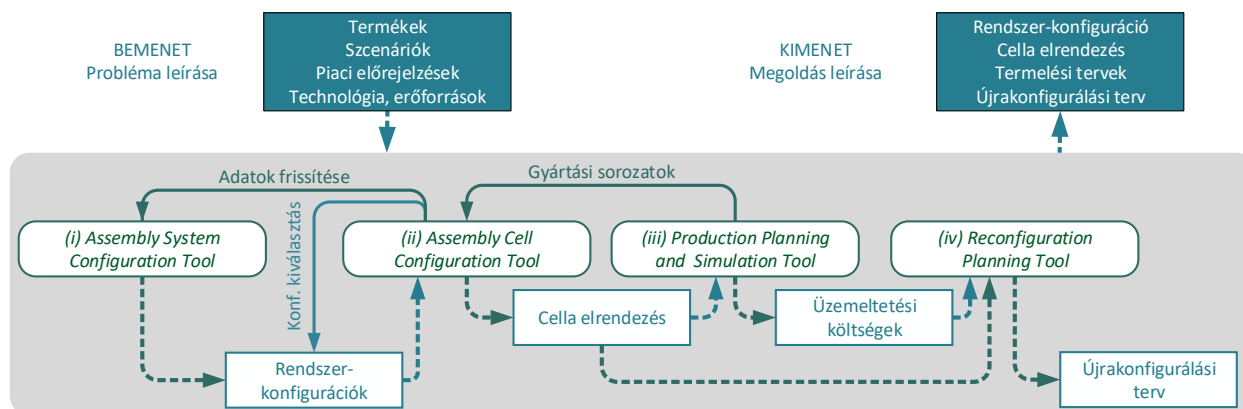
A modell egy speciális változatát definiálva, a döntési változókat megváltoztatva olyan megoldásokat kerestem, amelyek a gyártási sorozatnagyságok mellett a szerelésükhöz szükséges dolgozói létszámot is definiálják. Ebben az esetben a feladat megoldása operatív szinten tovább vizsgálható azzal a céllal, hogy adott időegységen belül a teljes dolgozói létszámot minimalizálni lehessen, figyelembe véve az újrakonfigurálások során lehetséges erőforrás-átcsoportosításokat.

Az 2. tézis eredményeit az értekezés 3. fejezete tárgyalja, a tézishez kapcsolódó publikációk: [J1],[J2],[C2],[C3],[C1],[C4],[C5],[O1]

3.2. Moduláris, robotizált szerelőcellák kapacitásmenedzsmentje

Az újrakonfigurálható kézi szerelőrendszerekhez hasonlóan az automatizált, robotos szerelőcellák modularizálása és újrakonfigurálhatósága is kivitelezhető, növelve ezáltal a rendszer alkalmazkodóképességét a változó darabszámokhoz és a gyártandó terméktípusok növekvő számához. Az ilyen szerelőcellák alkalmazása az ipari gyakorlatban még meglehetősen ritka, ugyanakkor hatékony és innovatív megoldásnak számít elsősorban olyan autóipari beszállítók számára, melyeknek kihívást jelent az autógyártók által megkövetelt gyors válaszidő, széles termékpaletta, és az ehhez tartozó változatos technológia biztosítása. Olyan robotizált, karosszériaelemek szerelését végző gyártócellákat vizsgáltam, amelyek statikus (pl. rögzítetten telepített görgős pálya, és a rajta mozgó robot), valamint mobil ele-

meket (ún. *plug and produce* kivitelű technológiai modulok, pl. hegesztőgép) egyaránt tartalmaznak.



2. ábra. Robotizált, újrakonfigurálható szerelőrendszerek életciklus menedzsmentjét támogató döntési folyamat.

Kidolgoztam egy olyan új, matematikai programozáson és eseményvezérelt szimuláción alapuló módszert (*Production Planning and Simulation Tool*), amelyet a robotizált, újrakonfigurálható szerelőrendszerek már korai tervezési fázisában is jól lehet alkalmazni a később várható üzemeltetési költségek becslésére, lehetővé téve ezáltal az ilyen rendszerek költség-optimalis kivitelezését és életciklus menedzsmentjét. A kidolgozott módszer egy olyan döntési folyamat (2. ábra) egyik fő eleme, amely lehetővé teszi a robotizált, újrakonfigurálható cellák (i) nagyvonalú kapacitástervezését (*Assembly System Configuration Tool*), és a (ii) cellák részletes konfigurációját (*Assembly Cell Configuration Tool*). A módszer harmadik lépése a meghatározott konfigurációkhoz tartozó (iii) üzemeltetési költségek meghatározása, figyelembe véve —akár a vevői előrejelzések alapján, már a tervezés során— a jövőben várható rendelési tételek nagyságát. A módszert egy olyan (iv) sztochasztikus optimalizálási modell egészíti ki (*Reconfiguration Planning Tool*), amely diszkrét időhorizonton elvégzi a szerelőcella konfigurációjának optimalizálását, figyelembe véve az előző lépésekben számított beruházási, üzemeltetési és átalakítási költségeket valamint a különböző technológiai korlátozásokat.

A tézishez tartozó módszer és döntési folyamat (i)², (ii) és (iv)³ részének kidolgozása külföldi partnerekkel közösen történt, a (iii) rész kidolgozása és döntési folyamatba történő integrálása saját, önálló eredmény.

²(i): Johannes Unglert, Juan Manuel Jauregui Becker (Universiteit Twente, Hollandia)

³(ii) és (iv): Massimo Manzini, Marcello Urgo, Marcello Colledani (Politecnico di Milano, Olaszország)

3. Tézis: A moduláris és robotizált szerelőcellák középtávú optimális termelésstervezésénél, az üzemeltetési költségek a kiszámított tervek szimulációs kiértékelésével már a cella tervezésénél hatékonyan megbecsülhetők. A tervezési és szimulációs modellből álló döntési folyamat fő bemenő adatai a vevői rendelésekre vonatkozó előrejelzések, valamint a rendszer technológiai tulajdonságai (erőforrások és műveleti idők). Az előrejelzések alapján a jövőben várható gyártási sorozatnagyságokat az alábbi modell segítségével lehet kiszámítani:

minimize

$$\sum_{p \in P} \sum_{t \in T} (c^{\text{bl}} b_{pt} + c^{\text{stock}} i_{pt}) \quad (16)$$

subject to

$$s_{pt} \geq d_{pt} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (17)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{p \in P} r_{jp} y_{ptc} \leq r_j^{\text{avail}} \quad \forall t \in T, j \in J \quad (18)$$

$$\sum_{p \in P} (t_m^c x_{ptc} + t_m^s g_{ptc}) \leq t^w \quad \forall c \in C, t \in T \quad (19)$$

$$i_{pt} - b_{pt} = i_{p,t-1} - b_{p,t-1} - s_{pt} + \sum_{c \in C} x_{ptc} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (20)$$

$$g_{ptc}, y_{ptc} \in \{0, 1\} \quad x_{ptc}, s_{pt}, i_{pt}, b_{pt} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall c \in C, p \in P, t \in T \quad (21)$$

A döntési változók közül i_{pt} a raktárkészlet, b_{pt} a rendeléshátralék, s_{pt} a vevőnek szállított mennyiség z_{ptc} pedig a gyártott mennyiség p termékekre, t időegységre, és c cellára vonatkozóan. A paraméterek kifejezik az időegységek hosszát, (t^w), a vevői igényeket (d_{pt}), a termékek átállási (t_m^s) és műveleti (t_m^c) idejét, az általuk igényelt erőforrásokat (r_{jp}), ahol J az erőforrás-típusok halmaza, r_j^{avail} pedig az erőforráskészlet. A modellben g_{ptc} és y_{ptc} indikátor változók az átállásokat és a termékek adott időben és erőforráson történő gyártását fejezik ki, számításuk a Pochet és Wolsey⁴ által definiált *LS-C-B/M1* lot-sizing modell alapján történik. A modell célfüggvénye (16) minimalizálja a rendeléshátralékok és raktárkészletek költségét, a korlátozások összehangolják a gyártandó mennyiségeket (17), moduláris erőforrások használatát (18), a gyártási időket (19), valamint összekötik az egymást követő időegységeket (20). A kiszámított tervet a szerelőrendszer

⁴Y. Pochet and L. A. Wolsey, *Production planning by mixed integer programming*. Springer, 2006.

működését reprezentáló, eseményvezérelt szimulációs modellben végrehajtva meghatározhatóak a jövőben várható üzemeltetési és logisztikai költségek.

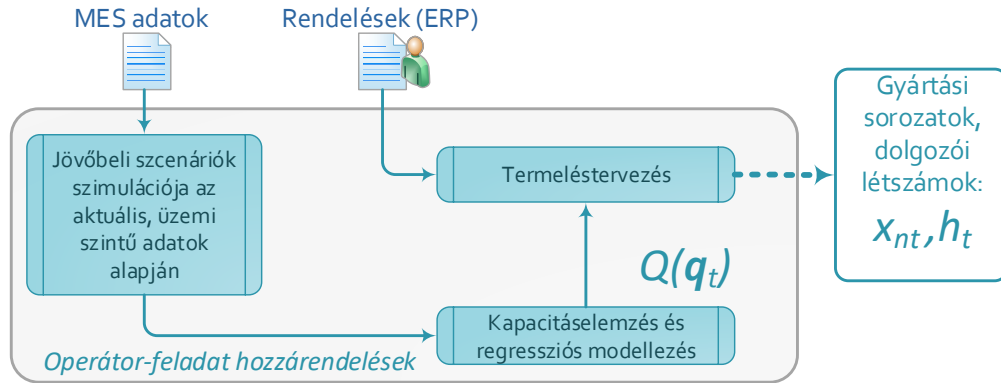
Az üzemeltetési költségek a korábbi, (i) és (ii) lépéseknél figyelembe vett értékénél pontosabb számítása mellett a tervezési modell visszacsatolást ad a cellakonfigurációs (ii) modellnek a várható gyártási sorozatnagyságokról, ezáltal pontosítva a korábban meghatározott elrendezést. Esettanulmány segítségével igazoltam, hogy a modell hatékonyan alkalmazható újrakonfigurálható robotos szerelőcellák termelésstervezéséhez is, ahol a cellák statikus elemekből és cserélhető technológiai modulokból épülnek fel. A modell támogatja a közös, megosztott erőforrások kezelését és a technológiai korlátozások figyelembevételét is.

A 3. tézis eredményeit az értekezés 4. fejezete tárgyalja, a tézishez kapcsolódó publikációk: [J3], [J4],[C6],[C7]

3.3. Robusztus termelésstervezési és –irányítási módszer rugalmas szerelősorokhoz

Rugalmas, kézi szerelősorok esetén a rövidtávú termelésstervezés során az *emberi tényező* hátrányosan befolyásolja a tervek végrehajthatóságát. A kézi műveleti idők szórása, és a termékek véletlenszerű hibaarányai dolgozói többletkapacitást igényelnek, melynek mértéke sztochasztikusan változik és nehezen becsülhető. Az ilyen változásokat még az APS rendszerek sem képesek megfelelően kezelni, ezért a tervek gyakorlati végrehajtása sok esetben késésekkel és/vagy kedvezőtlen erőforrás terhelésekkel jár. Egy olyan új, szimulációs optimalizáláson alapuló módszert dolgoztam ki, ahol a gyártórendszer aktuális állapotát tükröző közel-valósídejű adatok szolgáltatják a szimulációs modell paramétereit, a szimulációs vizsgálatok pedig különböző virtuális, de realisztikus termelési scenáriók alapján vetítik előre a rendszer jövőben várható viselkedését. A szimulációs vizsgálat eredményeként egy olyan adathalmazhoz jutunk, amely tartalmazza a különböző gyártási sorozatokhoz tartozó kapacitásigényeket a sztochasztikus paraméterek figyelembevétele mellett, ezáltal felhasználható robusztus tervek számításához (3. ábra).

4. Tézis: A rugalmas, kézi szerelősorokhoz tartozó középtávú termelési tervek robusztussága szimulációs optimalizálás segítségével proaktív módon növelhető. A tervezési problémát kevert-egészértékű optimalizálási modellként megfogalmazva, a dolgozói kapacitásigény kifejezhető az alábbi lineáris becslő függvénnyel:



3. ábra. Robusztus termelés-tervezési és -irányítási módszer rugalmas szerelősorokhoz.

$$Q(\bar{q}_t) = \beta_0 + \beta_1 h_t + \sum_{p \in P} \beta_p q_{pt}$$

A $Q(\bar{q}_t)$ kapacitásfüggvény olyan lineáris regresszió eredménye, ahol a be-menő adathalmazt a rendszer kvázi-valós állapotát tükröző szimulációs modell szolgáltatja, virtuális szcenáriókon végzett vizsgálatsorozat eredményeként. A függvényben β paraméterek a regressziós illesztés eredményei, h_t a sorhoz rendelt dolgozók létszáma t időegységben, q_{pt} pedig p termék gyártási darabszáma t időegységben. A függvény alkalmazása a középszintű tervezési probléma egészértékű optimalizálási modelljében biztosítja robusztus tervek kiszámítását, és megadja a gyártási sorozatnagyságokat, valamint a hozzájuk tartozó dolgozói létszámokat.

A kidolgozott módszer alapja a MES⁵ és ERP⁶ rendszerekben elkülönítetten tárolt adatok együttes alkalmazása a tervezésben adatgyűjtési, szimulációs, statisztikai tanulási és optimalizálási modellek kombinációja révén. A szimulációs modell a regressziós vizsgálatok mellett alkalmas a különböző létszámokhoz tartozó dolgozó-feladat hozzárendelések kiválasztására, figyelembe véve a már korábban említett sztochasztikus hatásokat. A kísérleti eredmények igazolják (Értekezés, 5.6 fejezet), hogy a kiterjesztett modell is biztosítja a határidőre történő gyártást sztochasztikus gyártási paraméterek esetén is.

A 4. tézis eredményeit az értekezés 5. fejezete tárgyalja, a tézishoz kapcsolódó publikációk: [J5],[C3],[C7],[C8],[C9],[C10],[C11],[O2]

⁵Manufacturing execution system

⁶Enterprise resource planning

4. Az értekezés eredményeinek alkalmazása és hasznosítása

A tézispontokban összefoglalt módszereket és modelleket —a gyakorlati alkalmazhatóságot is szem előtt tartva— valós ipari igények alapján definiált feladatok megoldására alkalmaztam. A módszerek és modellek validálása, tesztelése és kiértékelése —elsősorban a *RobustPlaNet*⁷ projekt keretében— ipari partnerekkel együttműködésben történt, valós termelési környezetben, valós gyártási adatok alapján. A *RobustPlaNet* és más ipari K+F projektekben kidolgozott esettanulmányok között elsősorban autóiipari példák szerepelnek, azonban a módszerek nem vállalat, hanem rendszer-specifikusak, ezáltal kiterjeszthetők más iparágakra és vállalatokra is, ahol rugalmas és újrakonfigurálható szerelőrendszereket alkalmaznak. Az 1-2. tézisben kidolgozott keretrendszer, és a hozzá kapcsolódó modellek több autóiipari esettanulmány alapján készültek. A modellek a gyakorlatban még nem kerültek bevezetésre, azonban az átfogó szimulációs tesztek alapján belátható, hogy a keretrendszer megfelelő alkalmazás mellett költségmegtakarítást (átalakítás, üzemeltetés és hely) eredményezhet más, az értekezésben bemutatott módszerekhez képest. A 3. tézisben bemutatott, robotizált szerelőcellák életciklus menedzsmentjét és újrakonfigurálását támogató módszer tesztelését és validálását a Hollandiában található *Voestalpine Polynorm B.V.* vállalat által biztosított esettanulmány segítségével végeztem. A teszteredmények alapján a módszer hatékonyan támogatja a cég által alkalmazott szerelőrendszerek tervezését, így a korábban tervezésre fordított idő jelentősen lerövidült. A 4. tézisben bemutatott robusztus termeléstervezési módszer kidolgozása és tesztelése a *Knorr-Bremse Fékrendszerek Kft.* kecskeméti gyárában történt, ahol a modelleket egy nagyszériás, rugalmas kézi szerelősor termeléstervezéséhez alkalmaztuk, és az eredményeket összehasonlítottuk a cég által hagyományos módon, normaidők alapján számított tervekkel. Az új módszer segítségével sikerült olyan termelési terveket kiszámítani, amelyek hatékonyabb gyártást (kihozatal/operátor) eredményeztek alacsonyabb műszakszám és nagyobb tervezési rugalmasság mellett. A kutatáshoz kapcsolódó fő K+F projektek:

- RobustPlaNet EU FP7 projekt (2013-2016)
- Knorr-Bremse Benchmark Factory (2012-2013)
- E.ON szolgáltatás-tervezési projekt (2012-2013)
- Knorr-Bremse SampleShop projekt (2010-2012)

⁷European Seventh Framework Programme, Grant No. 609087, <http://www.robustplanet.eu>

5. Irodalomjegyzék

5.1. Hivatkozások

- [1] H. A. ElMaraghy, G. Schuh, W. ElMaraghy, F. Piller, P. Schönsleben, M. Tseng, and A. Bernard, “Product variety management”, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 62, no. 2, pp. 629–652, 2013.
- [2] H.-P. Wiendahl, H. A. ElMaraghy, P. Nyhuis, M. F. Zäh, H.-H. Wiendahl, N. Duffie, and M. Brieke, “Changeable manufacturing-classification, design and operation”, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 56, no. 2, pp. 783–809, 2007.
- [3] M. G. Mehrabi, A. G. Ulsoy, and Y. Koren, “Reconfigurable manufacturing systems: Key to future manufacturing”, *Journal of intelligent manufacturing*, vol. 11, no. 4, pp. 403–419, 2000.
- [4] Y. Koren, “General RMS characteristics. Comparison with dedicated and flexible systems”, in *Reconfigurable manufacturing systems and transformable factories*, Springer, 2006, pp. 27–45.
- [5] O. Kuzgunkaya and H. ElMaraghy, “Economic and strategic perspectives on investing in RMS and FMS”, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 217–246, 2007.
- [6] D. A. Elkins, N. Huang, and J. M. Alden, “Agile manufacturing systems in the automotive industry”, *International Journal of Production Economics*, vol. 91, no. 3, pp. 201–214, 2004.
- [7] M. Amico, F. Asl, Z. Pasek, and G. Perrone, “Real options: an application to RMS investment evaluation”, in *Reconfigurable manufacturing systems and transformable factories*, A. I. Dashchenko, Ed., Springer, 2006, pp. 675–693.
- [8] J. Milberg and N. Möller, “Valuation of changeable production systems”, *Production Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 417–424, 2008.
- [9] I. Niroomand, O. Kuzgunkaya, and A. A. Bulgak, “Impact of reconfiguration characteristics for capacity investment strategies in manufacturing systems”, *International Journal of Production Economics*, vol. 139, no. 1, pp. 288–301, 2012.

- [10] I. Niroomand, O. Kuzgunkaya, and A. A. Bulgak, “The effect of system configuration and ramp-up time on manufacturing system acquisition under uncertain demand”, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 73, pp. 61–74, 2014.
- [11] W. Wang and Y. Koren, “Scalability planning for reconfigurable manufacturing systems”, *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 31, no. 2, pp. 83–91, 2012.
- [12] S. J. Hu, J. Ko, L. Weyand, H. A. ElMaraghy, T. Lien, Y. Koren, H. Bley, G. Chrysosouris, N. Nasr, and M. Shpitalni, “Assembly system design and operations for product variety”, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 60, no. 2, pp. 715–733, 2011.
- [13] E. Nazarian, J. Ko, and H. Wang, “Design of multi-product manufacturing lines with the consideration of product change dependent inter-task times, reduced changeover and machine flexibility”, *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 35–46, 2010.
- [14] N. Boysen, M. Fliedner, and A. Scholl, “A classification of assembly line balancing problems”, *European Journal of Operational Research*, vol. 183, no. 2, pp. 674–693, 2007.
- [15] D. Battini, M. Faccio, A. Persona, and F. Sgarbossa, “New methodological framework to improve productivity and ergonomics in assembly system design”, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 41, no. 1, pp. 30–42, 2011.
- [16] M. Abbasi and M. Houshmand, “Production planning and performance optimization of reconfigurable manufacturing systems using genetic algorithm”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 54, no. 1-4, pp. 373–392, 2011.
- [17] H. Aytug, M. A. Lawley, K. McKay, S. Mohan, and R. Uzsoy, “Executing production schedules in the face of uncertainties: A review and some future directions”, *European Journal of Operational Research*, vol. 161, no. 1, pp. 86–110, 2005.
- [18] M. F. F. Rashid, W. Hutabarat, and A. Tiwari, “A review on assembly sequence planning and assembly line balancing optimisation using soft computing approaches”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 59, no. 1-4, pp. 335–349, 2012.

- [19] U. Özcan, “Balancing stochastic two-sided assembly lines: A chance-constrained, piecewise-linear, mixed integer program and a simulated annealing algorithm”, *European Journal of Operational Research*, vol. 205, no. 1, pp. 81–97, 2010.
- [20] P. Genin, A. Thomas, and S. Lamouri, “How to manage robust tactical planning with an APS (Advanced Planning Systems)”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 18, no. 2, pp. 209–221, 2007.

5.2. A tézisekhez kapcsolódó publikációk jegyzéke

Folyóíratcikkek (*Web of Science*)

- [J1] D. Gyulai and L. Monostori, “Capacity management of modular assembly systems”, *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 43, no. 1, pp. 88–99, 2017, **IF: 2.77**. DOI: 10.1016/j.jmsy.2017.02.008.
- [J2] D. Gyulai, B. Kádár, A. Kovács, and L. Monostori, “Capacity management for assembly systems with dedicated and reconfigurable resources”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, vol. 63, no. 1, pp. 457–460, 2014, **IF: 2.25**. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.03.110.
- [J3] M. Manzini, J. Unglert, D. Gyulai, M. Colledani, J. M. Jauregui Becker, L. Monostori, and M. Urgo, “An integrated framework for design, management and operation of reconfigurable assembly systems”, *Omega - The International Journal of Management Science*, 2017, Special issue: Customized Assembly Systems (In Print), **IF: 4.02**, ISSN: 0305-0483. DOI: 10.1016/j.omega.2017.08.008.
- [J4] M. Colledani, D. Gyulai, L. Monostori, M. Urgo, J. Unglert, and F. Van Houten, “Design and management of reconfigurable assembly lines in the automotive industry”, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 65, no. 1, pp. 441–446, 2016, **IF: 2.54**. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.04.123.
- [J5] D. Gyulai, A. Pfeiffer, and L. Monostori, “Robust production planning and control for multi-stage systems with flexible final assembly lines”, *International Journal of Production Research*, vol. 55, no. 13, pp. 3657–3673, 2017, **IF: 2.32**. DOI: 10.1080/00207543.2016.1198506.

Nemzetközi konferencia kiadványában megjelent cikkek

- [C1] D. Gyulai, Z. Vén, A. Pfeiffer, J. Váncza, and L. Monostori, “Matching Demand and System Structure in Reconfigurable Assembly Systems”, *Procedia CIRP*, vol. 3, pp. 579–584, 2012, *45th CIRP Conference on Manufacturing Systems–CIRP CMS 2012, Athens, Greece*. DOI: 10.1016/j.procir.2012.07.099.
- [C2] D. Gyulai, B. Kádár, and L. Monostori, “Capacity Planning and Resource Allocation in Assembly Systems Consisting of Dedicated and Reconfigurable Lines”, *Procedia CIRP*, vol. 25, pp. 185–191, 2014, *8th International Conference on Digital Enterprise Technology–CIRP DET 2014, Stuttgart, Germany*. DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.028.
- [C3] D. Gyulai, “Novel capacity planning methods for flexible and reconfigurable assembly systems”, in *4th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications – SIMULTECH*, SCITEPRESS, 2014. [Online]. Available: <http://eprints.sztaki.hu/8142>.
- [C4] D. Gyulai and Z. Vén, “Order-stream-oriented system design for reconfigurable assembly systems”, in *Proceedings of the Factory Automation 2012 Conference*, University of Pannonia, 2012, pp. 138–143. [Online]. Available: <http://eprints.sztaki.hu/id/eprint/7374>.
- [C5] D. Gyulai, B. Kádár, and L. Monostori, “Scheduling and operator control in reconfigurable assembly systems”, *Procedia CIRP*, vol. 63, pp. 459–464, 2017, *50th CIRP Conference on Manufacturing Systems – CIRP CMS 2017, Taichung City, Taiwan*. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.082.
- [C6] D. Gyulai, A. Pfeiffer, B. Kádár, and L. Monostori, “Simulation-based Production Planning and Execution Control for Reconfigurable Assembly Cells”, *Procedia CIRP*, vol. 57, pp. 445–450, 2016, *49th CIRP Conference on Manufacturing Systems–CIRP CMS 2016, Stuttgart, Germany*. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.077.
- [C7] J. M. J. Becker, B. Kádár, M. Colledani, N. Stricker, M. Urgo, J. Unglert, D. Gyulai, and E. Moser, “The RobustPlaNet Project: Towards Shock-Robust Design Of Plants And Their Supply Chain Networks”, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 12, pp. 29–34, 2016. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.545.

- [C8] D. Gyulai, B. Kádár, and L. Monostori, “Robust production planning and capacity control for flexible assembly lines”, in *Proceedings of the 15th IFAC/IEEE/IFIP/IFORS Symposium, Information Control Problems in Manufacturing, Ottawa, Canada*, IFAC, 2015, pp. 2380–2385. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.432.
- [C9] D. Gyulai and L. Monostori, “Capacity analysis and planning for flexible assembly lines”, in *Proceedings of International Automation Congress 2014*, MATE, 2014, pp. 38–47. [Online]. Available: <http://eprints.sztaki.hu/id/eprint/8086>.
- [C10] A. Pfeiffer, D. Gyulai, B. Kádár, and L. Monostori, “Manufacturing Lead Time Estimation with the Combination of Simulation and Statistical Learning Methods”, *Procedia CIRP*, vol. 41, pp. 75–80, 2016. DOI: 10.1016/j.procir.2015.12.018.
- [C11] A. Pfeiffer, D. Gyulai, and L. Monostori, “Improving the Accuracy of Cycle Time Estimation for Simulation in Volatile Manufacturing Execution Environments”, in *Proceedings of ASIM Simulation in Production and Logistics 2017 conference, ASIM Simulation in Production and Logistics 2017, Kassel, Germany*, ASIM, 2017, pp. 177–186.

Rövid közlemények és magyar nyelvű cikkek

- [O1] D. Gyulai, “Bilevel Capacity Management with Reconfigurable and Dedicated Resources”, in *XIX. International Scientific Conference of Young Engineers, In Hungarian*, EME, 2014. [Online]. Available: <http://eda.eme.ro/handle/10598/28228>.
- [O2] P. Egri, D. Gyulai, B. Kádár, and L. Monostori, “Production Planning on Supply Network and Plant Levels: The RobustPlaNet Approach”, *ERCIM (European Research Consortium for Informatics & Mathematics) News*, no. 105, pp. 14–15, 2016. [Online]. Available: <http://eprints.sztaki.hu/id/eprint/8901>.