



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem



Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet

Ellátási láncok robusztusság-szemponjú elemzése, (újra)tervezése és működtetése

PhD Tézisfüzet

Mesterné Monostori Judit

Témavezető:

Dr. Kádár Botond, PhD

Kandó Kálmán Doktori Iskola
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Budapest, 2023

1. Bevezetés és célkitűzések

Napjainkban a gyártóvállalatok sikerességének – néha még túlélésének is – az egyik legfontosabb előfeltétele ellátási láncok hatékony működtetése.

Költséghatékonyságra törekedve a cégek racionalizálták folyamataikat a kiegészítő tevékenységek kiszervezésével, a just-in-time, just-in-sequence és a lean menedzsment koncepciók bevezetésével. A vállalatok általában alacsony szintű biztonsági készletekkel dolgoznak, ezért kiszolgáltatottabbak az ellátási láncokban fellépő turbulenciákkal szemben.

Ahhoz, hogy megtartani, vagy növelni tudják piaci részesedésüket, a cégek kénytelenek a korábbinál gyakrabban változtatni termékportfóliójukat, és akár egyedi vevői igényeket is kielégíteni. A termékváltozatok növekvő száma – az alacsony készletszintek mellett – még erősebbé teszi a beszállítóiktól való függőségüket. A helyzetet bonyolítja, hogy a legtöbb vállalat egyidejűleg több ellátási láncban is részt vesz, és ezáltal ellátási hálózatok alakulnak ki.

Az ellátási láncok egyre nagyobb számban több kontinensre is kiterjednek, ami által sebezhetőbbé válnak. Gondoljunk csak a 2010-es izlandi vulkánkitörés, a 2011. márciusi földrengés és az azt követő japán cunami, vagy más természeti katasztrófák, például árvizek következményeire, nem is beszélve a politikai bizonytalanságokról.

A fenti tendenciák rávilágítanak az ellátási láncok és hálózatok robusztus működésének fontosságára.

Egészen a közelmúltig figyelembe veendő, elérendő, sőt néha kizárólagos célként a termelés hatékonysági szempontjai kerültek megfogalmazásra. A termelési struktúrák sérülékenysége sokkal kevesebb figyelmet kapott, és ennek következtében az mára már általában meghaladja az elfogadható mértéket. A gyakran változó és bizonytalan környezet, amellyel a gyártócégek manapság szembesülnek, robusztusságot követel meg a termelési hierarchia minden szintjén, beleértve az ellátási láncok és hálózatok szintjét is. A COVID-19 világjárvány új lendületet adott az ellátási láncok robusztusságával kapcsolatos kutatásoknak. A jelenlegi ukrajnai háború tovább hangsúlyozta a téma fontosságát. A kiber-fizikai korszakban az ellátási láncok komplexitása várhatóan növekszik, párhuzamosan a robusztusabb rendszerek megvalósításának lehetőségével

(Monostori 2018). Felmerül azonban a kérdés, hogy milyen szintű komplexitás szükséges egy bizonyos fokú robusztusság eléréséhez, természetesen a hatékonyság szem előtt tartása mellett (Monostori 2016b). Másként kifejezve, hogyan lehet egyensúlyt teremteni a robusztusság, a komplexitás és a hatékonyság szempontjai között.

E kérdések tudományos kihívást jelentenek, és megválaszolásuk a termelőipar jelentős érdeklődésére számíthat. A téma fontosságán túl egy széleskörű szakirodalmi felmérés eredménye is további motivációt adott a kutatáshoz:

- A legtöbb kapcsolódó cikk az ellátási láncoknak vagy csak a robusztusságával, vagy csak a komplexitásával foglalkozik, és viszonylag kevés olyan publikáció található, amely ezeket együttesen tárgyalja. E tekintetben a szándékom az volt, hogy hozzájáruljak ehhez, az ellátási láncok átfogóbb kezelését célzó kutatási irányhoz, továbbá, hogy a robusztusság, a komplexitás és a hatékonyság aspektusait integrált módon vegyem figyelembe.
- A vizsgálatok ritkán vonatkoznak egyszerre a strukturális és a működési robusztusságra és / vagy komplexitásra. Ezen a téren terveim között szerepelt a két típus egyértelmű megkülönböztetése, valamint egymást kiegészítő jellegük kihasználása az ellátási láncok teljesítményének javításában.
- Az ellátási láncok robusztusságának és komplexitásának jellemzése sok esetben kvalitatív vagy viszonylag egyszerű kvantitatív mértékeken alapul. E pont kapcsán az ellátási láncok strukturális és működési tulajdonságainak leírására szolgáló kvantitatív mértékek bevezetését és használatát jelöltem ki feladatul, mind a robusztusság, mind a komplexitás tekintetében.

A kutatás fő célja az volt, hogy feltárja az ellátási láncok robusztusságának, komplexitásának és hatékonyságának bonyolult kapcsolatrendszerét, hangsúlyozza a köztük lévő megfelelő egyensúlyra való törekvés fontosságát, és megmutassa, hogy a kiegyensúlyozott megoldások keresése nem reménytelen vállalkozás.

Az elmúlt évtizedekben a világméretű gazdasági fejlődés és a növekvő népesség fokozódó igényei hatalmas mértékű fogyasztást eredményeztek. Globális termelési hálózatok alakultak ki, a nyersanyagok, az alkatrészek és a termékek jelentős áramlásával szerte a világon. E fejleményekkel párhuzamosan egyre nagyobb aggodalom figyelhető

meg a fenntarthatósággal kapcsolatban, mind gazdasági, mind környezeti, mind társadalmi szempontból.

A környezeti fenntarthatóság jelenleg az emberiség egyik legfontosabb kihívása. A vállalatok elkötelezettsége, hogy működésük környezeti következményeit komolyan figyelembe vegyék, alapvető fontosságúvá vált, és ez a megállapítás érvényes a teljes ellátási láncokra is.

A kutatás további fontos célja volt annak vizsgálata, hogy miként köthetők kompromisszumok az ellátási láncok fenntarthatóságának gazdasági (pl. profit) és környezeti (pl. CO₂ kibocsátás) aspektusai között.

2. Előzmények

2.1. Ellátási láncok robusztussága és komplexitása

A szakirodalomban, különösen az elmúlt években, egyre növekvő számú, az ellátási láncok robusztusságával és / vagy komplexitásával foglalkozó publikáció jelent meg.

Wagner and Neshat (2010) ellátási láncok robusztusságát taglalja, és bevezeti azok gráfelméleti megfontolásokon alapuló sebezhetőségi indexét (supply chain vulnerability index, SCVI). Zhao, Kumar, and Yen (2011) a véletlenszerű helyi újrakábelezés (randomized local rewiring, RLR) módszert javasolja eredeti és megváltoztatott (újrakábelezett) elosztási hálózatok robusztusságának kiértékelésére. A szerzők rámutatnak arra, hogy a vizsgált elosztási hálózatok robusztusságát topológiájuk megfelelő módosításai jelentősen befolyásolhatják. A gráfelméleti megközelítések jellemzőek számos más publikációra is (Gutiérrez-Pérez et al. 2013; Bates, Angeon, and Ainouche 2014; Nakatani et al. 2018; Tan, Zhang, and Cai 2019).

Az ellátási láncok komplexitására összpontosító cikkek tekintélyes része információelméleti megfontolásokat javasol, azaz az ellátási láncok komplexitását az állapotuk leírásához szükséges információ várható mennyiségével hozza összefüggésbe. A komplexitás entrópián alapuló értékelése gyakori módszer e téren (Sivadasan et al. 2006; Huaccho Huatuco et al. 2009; Isik 2010; ElMaraghy et al. 2012; Cheng, Chen, and Chen 2014).

Ígéretes megközelítésként az ellátási láncok komplex adaptív rendszereknek (complex adaptive systems, CASs) tekinthetők. A nagy rendszerek szerkezetének és dinamikájának elemzésére szolgáló paradigma, a CAS-ok alapfeltevése az, hogy a rendszerek adaptivitása komplexitást hoz létre, ugyanakkor fel is oldja azt. A CAS valójában egy olyan, több ágensből álló rendszer, amelyben „bármely adott adaptív ágens környezetének jelentős részét más adaptív ágensek alkotják, így bármely ágens alkalmazkodási erőfeszítéseinek egy része más adaptív ágensekhez történő alkalmazkodásra fordítódik” (Holland 1995). Az ellátási hálózatokat több szerző is CAS-oknak fogja fel, mivel ezek kibontakozó, dinamikus, önszerveződő és fejlődő tulajdonságokkal rendelkeznek (Choi, Dooley, and Rungtusanatham 2001; Surana et al. 2005; Pathak et al. 2007). Az ilyen típusú rendszerek működtetése során megfelelő egyensúlyra kell törekedni, egyrészt az irányítás és a kibontakozás (Choi, Dooley, and Rungtusanatham 2001), másrészt a szimuláció és az elmélet (Surana et al. 2005) között.

A hálózattudomány nagy jelentőséggel bír az ellátási láncok és hálózatok komplexitása terén is (Cui, Kumara, and Albert 2010; Kito and Ueda 2014). Az összeszerelést végző ellátási láncok topológiai osztályait Modrak and Marton (2012) mutatja be.

Mint azt Olivares Aguila and ElMaraghy (2018) is jelzi, viszonylag kevés olyan publikáció található, amely az ellátási láncok robusztusságát és komplexitását együttesen kezeli.

Craighead et al. (2007) ellátási láncok három tervezési jellemzőjét, nevezetesen a sűrűséget, a komplexitást és a csomópont-kritikusságot határozza meg. A sűrűség a csomópontok ellátási láncon belüli földrajzi elhelyezkedésére vonatkozik, amely például a csomópontok közötti átlagos távolsággal mérhető. A komplexitás az ellátási láncon lévő csomópontok és összeköttetések számának összegeként fogható fel. A csomópont-kritikusság pedig egy csomópont fontossága, amely kontextusfüggő és az ellátási láncon belüli többi csomópont jelentőségéhez viszonyított. A hivatkozott cikkben kvalitatív javaslatok kerülnek megfogalmazásra a fenti tervezési jellemzőknek az ellátási lánc zavarainak súlyosságára gyakorolt hatása tekintetében.

Ivanov and Sokolov (2013) lényeges jövőbeli irányként jelöli meg a komplexitás vizsgálatát a robusztusság, az alkalmazkodóképesség (rugalmasság) és a gazdasági teljesítmény fényében. Cardoso et al. (2015) egy több termékre és több időszakra

vonatkozó, vegyes egészértékű lineáris programozási (mixed integer linear programming, MILP) modellt használ különböző zavarok tizenegy mutatóra kifejtett hatásának elemzésére öt eltérő komplexitású ellátási láncban. Egy empirikus tanulmány (Bode and Wagner 2015) kapcsolatot mutat ki az ellátási láncok strukturális komplexitása és a kínálati oldali zavarok gyakorisága között.

2.2. Ellátási láncok környezeti fenntarthatósága

A fenntartható ellátási láncok működtetésével kapcsolatos modellezési megközelítéseket Seuring (2013) tekinti át. A következő fő modellezési kategóriákat azonosítja és elemzi: 1) az életciklus-értékelésen alapuló modellek, 2) az egyensúlyi modellek, 3) a többkritériumos döntéshozatal, és 4) az analitikus hierarchia eljárás. Hangsúlyozásra kerül, hogy a környezeti szempontok dominálnak a társadalmi szempontok felett, és hogy a gazdasági dimenzióban a költségminimalizálás a leggyakrabban figyelembe vett tényező.

Li et al. (2008) elosztási központok zöld ellátási láncokon belüli elhelyezésére ír le egy vegyes egészértékű programozási matematikai modellt. A nyersolaj árának a választott szállítási módokra és az elosztási központok elhelyezkedésére gyakorolt hatását is vizsgálja.

Xu, Pan, and Ballot (2012) a kooperatív játékelméletet használja a szállítási költségek és a CO₂ kibocsátás szétosztására összevont ellátási láncokban. Az elgondolást egy franciaországi kiskereskedelmi logisztikai hálózat több, független ellátási lánc között létrehozott horizontális együttműködésen mutatja be. A szén-dioxid-adót is beleértve, a szállítási költségeket 25,98%-kal sikerült csökkenteni.

Zhang et al. (2018) egy genetikus algoritmus és egy konvex optimalizálási módszer kombinációját javasolja a logisztikai infrastrukturális beruházások és támogatások együttes optimalizálására egy kínai regionális logisztikai hálózatban, a CO₂ kibocsátás csökkentésére vonatkozó célok figyelembevételével.

3. A kutatómunka összefoglalása és a tézisek ismertetése

Kutatásaimat négy egymásra épülő fázis keretében végeztem. Mindegyik fázis kezdetén a szakirodalom átfogó elemzése alapján nyitott kérdéseket azonosítottam, és kitűztem vonatkozó tevékenységem céljait.

Modelleket és megoldásokat dolgoztam ki, melyek alkalmazhatóságát valós (ipari), mesterségesen generált, valamint irodalomból vett adatok segítségével mutattam be. A felhasznált módszerek arzenáljából a gráfelméleti analízis, az optimalizálási technikák és az ellátási láncok szimulációja emelendők ki.

Hangsúlyt fektettem arra, hogy az egyes fázisok eredményei lektorált, nemzetközi folyóiratokban is rögzítésre kerüljenek.

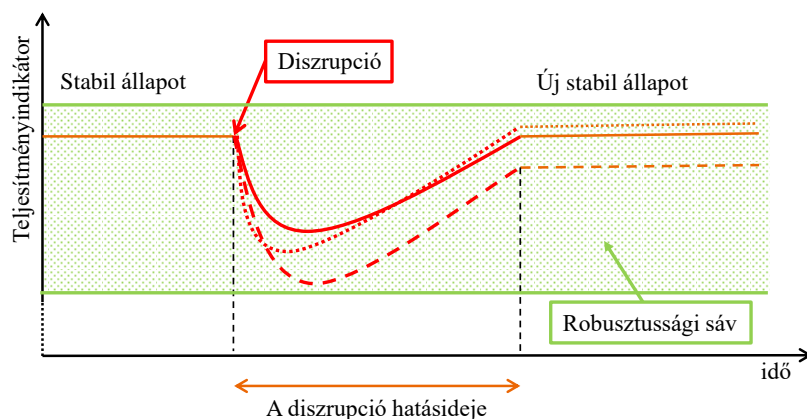
Ebben a fejezetben az elvégzett kutatómunkát a fázisok szerint foglalom össze, és négy kapcsolódó tézist ismertetek.

3.1. Ellátási láncok strukturális robusztussága és komplexitása

Az irodalomban számos definíció található az ellátási láncok robusztusságára (robustness), nem is beszélve olyan rokon koncepciókról, mint a reziliencia (resilience), a rugalmasság (flexibility), a válaszadó képesség (responsiveness) és a változtathatóság (changeability). Különbségek és ellentmondások léteznek még az ugyanarra a fogalomra vonatkozó definíciókban is (a robusztusság sem kivétel), valamint átfedések lelhetők fel a különböző koncepciók tekintetében.

A fenti okok miatt, az ellátási láncok robusztusságára a következő átfogó definíciót fogalmaztam meg: „Egy ellátási lánc általános értelemben robusztus, amennyiben az elfogadható szinten (egy előre definiált robusztussági sávban maradva) tudja teljesíteni az ellátási láncsal szemben támasztott legfontosabb teljesítményindikátorokat (key performance indicators, KPIs), mégpedig olyan nem várt események / diszrupciók alatt és után, melyek egy vagy több logisztikai, vagy termelési folyamatban zavart okoztak.” (Monostori 2016b).

Az 1. ábra illusztrálja a fenti koncepciót, arra a lehetséges esetre is utalva, amikor az új stabil állapot a korábbinál magasabb teljesítményindikátort eredményez.



1. ábra: Ellátási láncok általános értelemben vett robusztussága (Monostori 2016b).

Természetesen, egy adott diszrupció nem csak egy teljesítményindikátorra lehet hatással, valamint az egy elfogadható új stabil állapot eléréséhez szükséges felépülési idő (a diszrupció hatásideje) függhet attól, hogy melyik indikátort tekintjük.

A gráfelmélet alkalmazása észszerű választás ellátási láncok és hálózatok strukturális tulajdonságainak jellemzésére. Egy lánc / hálózat elemei (pl. fogyasztók, elosztási központok, gyárak, beszállítók) egy gráf csúcaival (csomópontjaival), míg az elemek közötti összeköttetések (pl. szállító-vevő kapcsolatok) annak éleivel modellezhetők. E speciális területen az irányított gráfok részesülnek előnyben az irányítatlan gráfokkal szemben.

Ellátási láncok és hálózatok strukturális komplexitásának, illetve robusztusságának jellemzésére gráfelméleti mértékeket tártam fel és vezettem be, így például a csomópontok számát, az élek számát, a csomópontok átlagos fokszámát és a gráf entrópiáját, mint komplexitásmértékeket, valamint a normalizált köztesség centralitás maximumát és az R tényezőt, mint robusztusságmértékeket.

A mértékek alkalmasságát a fenti célra kétféle típusba tartozó struktúrákon mutattam be, amelyeket mind a komplexitás, mind a robusztusság szempontjából elemeztem:

- Egy végösszeszerelést végző vállalatokból és adott kategóriájú részegységeket előállító, első szintű beszállítóikból álló ellátási hálózat (egy valós japán ipari eset alapján),
- Többszintű ellátási láncok (a szakirodalomból vett struktúrák alapján).

E kvantitatív megközelítés célszerűen felhasználható ellátási láncok elemzésére tervezési és működési fázisaikban egyaránt. A robusztusság- és komplexitásmértékek értékei meghatározhatók, grafikusán ábrázolhatók és összehasonlíthatók a vizsgált ellátási lánc különböző forgatókönyveire. A megközelítés az ellátási láncok (újra)tervezése során a vezetői döntéstámogató rendszerek fontos része lehet.

1. Tézis: Definiáltam az ellátási láncok általános értelemben vett robusztusságát. Gráfelméleti mértékeket tártam fel és vezettem be ellátási láncok és hálózatok strukturális komplexitásának, illetve robusztusságának jellemzésére, valamint együttesen elemeztem ellátási láncok és hálózatok strukturális komplexitását és robusztusságát. Megállapítottam, hogy a strukturális komplexitás növelése – tendenciájában – várhatóan növeli a strukturális robusztusságot, azonban a robusztusság fokozása, mint cél megvalósítása kapcsán megfelelő elővigyázatossággal kell a komplexitást erősítő lépéseket megtenni, mert különben előfordulhat, hogy csak a szükségtelen komplexitás növekszik. Reális célkitűzés lehet a kívánt robusztussági szint még elfogadható mértékű komplexitás melletti elérése.

Az 1. Tézisben összefoglalt eredmények elsősorban a disszertáció 2. és 3. fejezetein alapulnak. A legfontosabb kapcsolódó publikációk a következők: Monostori (2016b); Monostori (2018).

3.2. Ellátási láncok strukturális és működési robusztussága és komplexitása, valamint hatékonysága

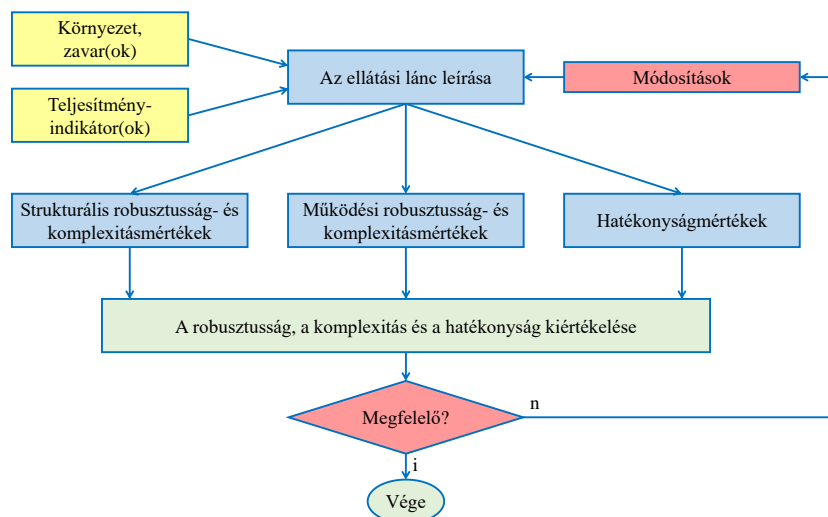
Kutatásaimat kiterjesztettem ellátási láncok működési robusztusságára és komplexitására, amelyeket szintén kvantitatív mértékekkel jellemeztem. Míg a strukturális tulajdonságok leírására a gráfelmélet alkalmazása bizonyul a legmegfelelőbb modellezési megközelítésnek, addig itt a statisztikai módszerek és a szimuláció használható előnyösen.

Rámutattam arra a sürgető igényre, hogy az ellátási láncok robusztusságának, komplexitásának és hatékonyságának kapcsolatrendszerére megvizsgálásra kerüljön, annak érdekében, hogy a tervezésükkel és működtetésükkel kapcsolatos döntések ily módon is támogathatók lehessenek.

Az alábbi lépésekből álló módszertant fogalmaztam meg ellátási láncok átfogó (a robusztussági, komplexitási és hatékonysági szempontokat is magában foglaló) kiértékelésére:

1. Az ellátási lánc környezetének, valamint a figyelembe veendő zavar(ok)nak és teljesítményindikátor(ok)nak definiálása.
2. A vizsgálandó ellátási lánc leírása (például a gyártandó / leszállítandó termék(ek), az ellátási lánc struktúrája, a lánc elemeinek kapacitása, az alkalmazott készletezési politikák, termelésstervezési és -ütemezési módszerek, szállítási módok, stb.).
3. Az ellátási lánc strukturális tulajdonságainak kvantitatív jellemzése, mind robusztussági, mind komplexitási szempontból, gráfelméleti módszerek alkalmazásával.
4. Az ellátási lánc működési tulajdonságainak kvantitatív jellemzése, szintén kitérve mind a robusztussági, mind a komplexitási aspektusokra, akár a valós rendszerből gyűjtött adatok elemzése, akár az ellátási lánc szimulációja útján.
5. Hatékonysági jellemzők meghatározása analitikus számításokkal vagy szimulációs technikával.
6. Az ellátási lánc megfelelőségének vizsgálata. Negatív esetben visszatérés a 2. lépéshez. A teljes folyamat irányítására keresési és optimalizálási módszerek használhatók.

Ellátási láncok robusztusságának, komplexitásának és hatékonyságának kiértékelésére keretrendszert valósítottam meg (2. ábra).



2. ábra: Keretrendszer ellátási láncok robusztusságának, komplexitásának és hatékonyságának kiértékelésére (Monostori 2018).

A javasolt megközelítés, amely összhangban van az ellátási láncok és termelési hálózatok kutatásának fő tendenciáival, tudományos újdonsága mellett egyértelmű gyakorlati jelentőséggel is bír. Ez utóbbi a természeti katasztrófák és a világitárványok korában még tovább nőhet.

A módszertan és a keretrendszer alkalmazásával különböző, a robusztussági, komplexitási és hatékonysági szempontokból összehasonlítható, a vezetés számára felajánlható ellátási lánc alternatívák alakíthatók ki. Így megalapozottabb döntések hozhatók, figyelembe véve mindhárom aspektust, a vállalat prioritásainak megfelelően.

2. Tézis: A strukturális jellemzésen túlmenően, kutatásaimat kiterjesztettem ellátási láncok működési robusztusságára és komplexitására, megadtam azok főbb kvantitatív mértékeit, továbbá gráfelméleti módszereket, digitális szimulációt és optimalizálást integráló módszertant és keretrendszert definiáltam és valósítottam meg ellátási láncok strukturális és működési robusztusságának és komplexitásának, valamint hatékonyságának átfogó, kvantitatív elemzésére, illetve (újra)tervezésük és működtetésük támogatására.

A 2. Tézisben összefoglalt eredmények elsősorban a disszertáció 2. és 3. fejezetein alapulnak. A legfontosabb kapcsolódó publikációk a következők: Monostori (2018); Monostori (2021).

3.3. Ellátási láncokon belül keletkező zavarok „downstream” irányba terjedő negatív hatásai

Az ostorcsapáshatás (bullwhip effect), azaz a kereslet ingadozásának felerősödése az ellátási lánc „upstream” irányában, jól ismert a terület kutatói és gyakorlati szakemberei előtt. Az ostorcsapáshatással ellentétben a hullámhatás (ripple effect), amely az ellátási lánc elemeinél fellépő zavarokból ered, viszonylag újszerű kihívásokat jelent az ellátási lánc menedzserek számára. A zavarok negatív hatásai főként a „downstream” irányban gyűrűzhetnek tovább az ellátási láncon, ráadásul áttérjedhetnek más ellátási láncokra is.

Kiemeltem a hullámhatások olyan módon történő csillapításának fontosságát, amely – egyúttal – az ellátási láncok robusztussági, komplexitási és hatékonysági szempontjai közötti egyensúlyt is a középpontba helyezi.

Általánosságuknak köszönhetően a javasolt módszertan és a kidolgozott keretrendszer megfelelően használható e célra, amit feltételeztem, magyarországi elosztási hálózatokon mutattam be.

Az esettanulmányban az ország régiókra volt felosztva, a régiónkénti igény megadása mellett. Figyelembe veendő zavarként a Budapesten található fő elosztási központ ideiglenes leállása szerepelt. A kérdés az volt, hogyan lehet egyensúlyt teremteni a robusztusság, a komplexitás és a hatékonyság szempontjai között, miközben enyhítésre kerülnek e zavarnak a vizsgált elosztási hálózatok más részeire tovagyűrűző negatív hatásai. Ennek érdekében több stratégiát is megvalósítottam, és elemeztem eredményességüket. A stratégiák a következők voltak: 1) a kiindulási elosztási hálózat bővítése további elosztási központtal / központokkal, 2) a több forrásból történő beszerzés (multiple sourcing) különböző mértékű alkalmazása, mint strukturális módosítások; 3) a további elosztási központ / központok által használt (min-max) készletezési politika paramétereinek fokozatos növelése, mint működési módosítások.

A kiindulási elosztási hálózat strukturális robusztusságmértékei jelezték, hogy a hálózatstruktúra rendkívül sérülékeny volt a fő elosztási központban bekövetkező esetleges zavarokkal szemben. A helyzetet jelentősen javítani lehetett a strukturális változtatásokkal, melyek együtt jártak a strukturális komplexitásmértékek növekedésével. A strukturális és a működési módosítások megfelelő kombinációi olyan elosztási hálózat alternatívákhoz vezettek, amelyek kiegyensúlyozott megoldásokat

jelentettek a robusztusság, a komplexitás és a hatékonyság szempontjaiból, és a figyelembe vett teljesítményindikátorok alapján számíthattak a vezetői elégedettségre.

3. Tézis: Eljárást adtam az ellátási láncokon belül keletkező zavarok „downstream” irányba terjedő negatív hatásainak („ripple effects”) csillapítására, a robusztussági, komplexitási és hatékonysági szempontok egyidejű figyelembevételével. Az eljárás felhasználhatóságát – a kifejlesztett módszertan és keretrendszer segítségével – elosztási hálózatokon demonstráltam, ahol azok különböző strukturális és működési paramétereinek módosításával olyan megoldásokat generáltam, melyek – amellet, hogy enyhítik a tovagyűrűző negatív hatásokat – a robusztusság, a komplexitás és a hatékonyság szempontjaiból kiegyensúlyozottaknak tekinthetők. Kimutattam, hogy ellátási láncok strukturális és működési komplexitásának célzott megváltoztatásával, e rendszerek robusztussága jelentősen fokozható, hatékonyságuk korlátozott mértékű csökkentése, néha megtartása, ritkább esetben akár növelése mellett is.

A 3. Tézisben összefoglalt eredmények elsősorban a disszertáció 2., 3. és 4. fejezetein alapulnak. A legfontosabb kapcsolódó publikáció a következő: Monostori (2021).

3.4. Ellátási láncok környezeti hatásai

Megoldást dolgoztam ki ellátási láncok fenntarthatóságának gazdasági és környezeti aspektusai közti kompromisszumok megteremtésére. Az alkalmazott fegyvertár a súlypont módszerből, (vegyes) egészértékű lineáris programozásból, korlátozott optimalizálásból és gráfelméleten alapuló módszerekből tevődik össze.

A megoldás lépései a következők:

1. Az ellátási lánc által kínált termék(ek) iránti igény és annak földrajzi eloszlásának becslése.
2. A potenciális elosztási központok elhelyezkedésének (amennyiben azok nem rögzítettek) meghatározása (greenfield analysis, GFA) a súlypont (center of gravity, CoG) módszerrel.
3. A teljes ellátási lánc struktúra profitorientált optimalizálása, általános esetben vegyes egészértékű lineáris programozással (mixed integer linear programming,

MILP), diszkrét gyártás esetén egészértékű lineáris programozással (integer linear programming, ILP).

4. A gazdasági (pl. profit) és a környezeti (pl. CO₂ kibocsátás) aspektusok közti különböző szintű kompromisszumokat megvalósító alternatív ellátási lánc struktúrák generálása korlátozott optimalizálással.
5. A létrehozott alternatívák strukturális robusztusságának és komplexitásának jellemzése gráfelméleten alapuló módszerekkel.

A megoldás különböző ellátási lánc változatokat mutat be a menedzsment számára, olyan fontos paramétereket jelezve, mint a különböző költségtényezők, a bevétel, a profit, a szállítással kapcsolatos CO₂ kibocsátási értékek és a vevői igénykielégítés foka. Az ellátási lánc változatok átfogó elemzése céljából mindegyikre meghatározásra kerülnek a strukturális robusztussággal és komplexitással kapcsolatos egyes mértékek értékei is. Ily módon hatékony döntéstámogatás áll az ellátási lánc menedzserek rendelkezésére, amelyet előnyösen használhatnak tervezési és újratervezési tevékenységeik során.

A módszer alkalmazhatóságát egy esettanulmányon keresztül mutattam be egy hipotetikus, ötszintű ellátási láncon, amely magában foglalta a második és az első szintű beszállítókat, a gyárakat, az elosztási központokat és a kiszolgáló ügyfelek régióit. A feladat az Európában létrehozandó ellátási lánc megtervezése (vagy a már létező újratervezése) volt, figyelembe véve nemcsak gazdasági, hanem környezeti aspektusokat is. Más teljesítményindikátorok meghatározása is célként került megfogalmazásra.

Gazdasági paraméterként az ellátási láncban elért profit, míg igen fontos környezeti paraméterként a szállítással kapcsolatos CO₂ kibocsátás szerepelt a vizsgálatokban.

Az eredmények azt mutatták, hogy a fenntarthatóság figyelembe vett gazdasági és környezeti aspektusai között megfelelő egyensúly érhető el. Érdeemes megjegyezni, hogy az e szempontok közti kompromisszumok nemcsak a termékek és alkatrészeik átlagos szállítási távolságának lerövidülésével jártak együtt (következésképpen, indokolt lehet földrajzi tekintetben egyes beszállítókat a gyárakhoz, vagy akár egyes gyárakat a vevőkhöz közelíteni), hanem a létrejött ellátási lánc alternatívák strukturális robusztusságának és komplexitásának növekedésével is.

A módszert egy globális gyártócéggel közös projekt keretében sikerrel alkalmaztam a vállalat európai elosztási hálózatának elemzésére, és kidolgoztam annak gazdasági és környezeti aspektusokból egyaránt előnyös alternatíváit.

4. Tézis: Módszert fejlesztettem ki ellátási láncok fenntarthatóságának gazdasági és környezeti aspektusai közti kompromisszumok megteremtésére. Egy többszintű ellátási láncon bemutattam, hogy az elvárt profit viszonylag kismérvű csökkentése mellett olyan ellátási lánc struktúrák alakíthatók ki, melyek nemcsak a szállítással kapcsolatos CO₂ kibocsátás csökkentését biztosítják, hanem megnövelt strukturális robusztussággal és komplexitással is rendelkeznek. Rávilágítottam, hogy a negatív környezeti hatások mérséklési szándéka előrevetíti az ipar relokalizációját, továbbá, hogy a robusztussági és a környezettudatosági szempontok távolról sem egymással ellentétes követelményeket támasztanak. Következésképpen, amennyiben a vállalatok – nem utolsósorban a COVID-19 világjárvány hatására – robusztussági szempontokat követve átstrukturálják ellátási láncukat, egyben hozzájárulhatnak a külső logisztikai folyamataikból származó környezeti terhelés csökkentéséhez is.

A 4. Tézisben összefoglalt eredmények elsősorban a disszertáció 5., 6. és 7. fejezetein alapulnak. A legfontosabb kapcsolódó publikáció a következő: Monostori (2020).

4. Az elért eredmények alkalmazása

A kutatás eredményei hozzájárultak néhány jelentős, lezárult vagy folyamatban lévő, pályázati szervek által támogatott projekt sikeréhez, mint például:

- GINOP-2.3.2-15-2016-00002: *Ipar 4.0 kutatási és innovációs kiválósági központ*, 2016. november – 2021. január;
- EU H2020, 739592: *Termelésinformatikai és -irányítási kiválósági központ (Centre of Excellence in Production Informatics and Control (EPIC))*, 2017. április – 2024. szeptember;
- NKFIH, ED_18-22018-0006: *Kutatások az ipari digitalizáció által nyújtott potenciál minőségi kiaknázására (INEXT)*, 2018. október – 2024. június;
- NKFIH, TKP2021-NKTA-01: *Kooperatív gyártó- és logisztikai rendszerek kutatása a versenyképes és fenntartható gazdaság támogatására*, 2022. január – 2025. december.

Az eredmények egy része sikeresen alkalmazásra került egy globális gyártócég megbízásából végzett projektben. E siker alapozta meg további, kihívást jelentő, kétoldalú projektek létrejöttét.

5. Irodalomjegyzék

- Bates, S., Angeon, V., and Ainouche, A. 2014. "The pentagon of vulnerability and resilience: A methodological proposal in development economics by using graph theory." *Economic Modelling* Vol. 42, pp. 445-453.
- Bode, C., and Wagner, S.M. 2015. "Structural drivers of upstream supply chain complexity and the frequency of supply chain disruptions." *Journal of Operations Management* Vol. 36, pp. 215-228.
- Cardoso, S.R., Barbosa-Póvoa, A.P., Relvas, S., and Novais, A.Q. 2015. "Resilience metrics in the assessment of complex supply-chains performance operating under demand uncertainty." *Omega* Vol. 56, pp. 53-73.
- Cheng, C.-Y., Chen, T.-L., and Chen, Y.-Y. 2014. "An analysis of the structural complexity of supply chain networks." *Applied Mathematical Modelling* Vol. 38, No. 9-10, pp. 2328-2344.
- Choi, T.Y., Dooley, K.J., and Rungtusanatham, M.J. 2001. "Supply networks and complex adaptive systems: Control versus emergence." *Journal of Operations Management* Vol. 19, pp. 351-366.
- Craighead, C.W., Blackhurst, J., Rungtusanatham, M.J., and Handfield, R.B. 2007. "The severity of supply chain disruptions: Design characteristics and mitigation capabilities." *Decision Sciences* Vol. 38, No. 1, pp. 131-156.
- Cui, L.Y., Kumara, S.R.T., and Albert, R. 2010. "Complex networks: An engineering view." *IEEE Circuits and Systems Magazine* Vol. 10, No. 3, pp. 10-25.
- ElMaraghy, W., ElMaraghy, H., Tomiyama, T., and Monostori, L. 2012. "Complexity in engineering design and manufacturing." *CIRP Annals – Manufacturing Technology* Vol. 61, No. 2, pp. 793-814.
- Gutiérrez-Pérez, J.A., Herrera, M., Pérez-García, R., and Ramos-Martínez, E. 2013. "Application of graph-spectral methods in the vulnerability assessment of water supply networks." *Mathematical and Computer Modelling* Vol. 57, No. 7-8, pp. 1853-1859.
- Holland, J.H. 1995. *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. Reading, Massachusetts, USA: Helix Books, Addison-Wesley.

- Huaccho Huatuco, L., Efstathiou, J., Calinescu, A., Sivadasan, S., and Kariuki, S. 2009. "Comparing the impact of different rescheduling strategies on the entropic-related complexity of manufacturing systems." *International Journal of Production Research* Vol. 47, No. 15, pp. 4305-4325.
- Isik, F. 2010. "An entropy-based approach for measuring complexity in supply chains." *International Journal of Production Research* Vol. 48, No. 12, pp. 3681-3696.
- Ivanov, D., and Sokolov, B. 2013. "Control and system-theoretic identification of the supply chain dynamics domain for planning, analysis and adaptation of performance under uncertainty." *European Journal of Operational Research* Vol. 224, No. 2, pp. 313-323.
- Kito, T., and Ueda, K. 2014. "The implications of automobile parts supply network structures: A complex network approach." *CIRP Annals – Manufacturing Technology* Vol. 63, No. 1, pp. 393-396.
- Li, F., Liu, T., Zhang, H., Cao, R., Ding, W., and Fasano, J.P. 2008. "Distribution center location for green supply chain." *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics* pp. 2951-2956.
- Modrak, V., and Marton, D. 2012. "Modelling and complexity assessment of assembly supply chain systems." *Procedia Engineering* Vol. 48, pp. 428-435.
- Nakatani, J., Tahara, K., Nakajima, K., Daigo, I., Kurishima, H., Kudoh, Y., Matsubae, K., Fukushima, Y., Ihara, T., Kikuchi, Y., Nishijima, A., and Moriguchi, Y. 2018. "A graph theory-based methodology for vulnerability assessment of supply chains using the life cycle inventory database." *Omega* Vol. 75, pp. 165-181.
- Olivares Aguila, J., and ElMaraghy, W. 2018. "Structural complexity and robustness of supply chain networks based on product architecture." *International Journal of Production Research* Vol. 56, No. 20, pp. 6701-6718.
- Pathak, S.D., Day, J.M., Nair, A., Sawaya, W.J., and Kristal, M.M. 2007. "Complexity and adaptivity in supply networks: Building supply network theory using a complex adaptive systems perspective." *Decision Sciences* Vol. 38, No. 4, pp. 547-580.

- Seuring, S. 2013. "A review of modeling approaches for sustainable supply chain management." *Decision Support Systems* Vol. 54, No. 4, pp. 1513-1520.
- Sivadasan, S., Efstathiou, J., Calinescu, A., and Huaccho Huatuco, L. 2006. "Advances on measuring the operational complexity of supplier-customer systems." *European Journal of Operational Research* Vol. 171, No. 1, pp. 208-226.
- Surana, A., Kumara, S.R.T., Greaves, M., and Raghavan, U.N. 2005. "Supply-chain networks: A complex adaptive systems perspective." *International Journal of Production Research* Vol. 43, No. 20, pp. 4235-4265.
- Tan, W.J., Zhang, A.N., and Cai, W. 2019. "A graph-based model to measure structural redundancy for supply chain resilience." *International Journal of Production Research* Vol. 57, No. 20, pp. 6385-6404.
- Wagner, S.M., and Neshat, N. 2010. "Assessing the vulnerability of supply chains using graph theory." *International Journal of Production Economics* Vol. 126, No. 1, pp. 121-129.
- Xu, X., Pan, S., and Ballot, E. 2012. "Allocation of transportation cost & CO₂ emission in pooled supply chains using cooperative game theory." *IFAC Proceedings Volumes* Vol. 45, No. 6, pp. 547-553.
- Zhang, D., Zhan, Q., Chen, Y., and Li, S. 2018. "Joint optimization of logistics infrastructure investments and subsidies in a regional logistics network with CO₂ emission reduction targets." *Transportation Research Part D* Vol. 60, pp. 174-190.
- Zhao, K., Kumar, A., and Yen, J. 2011. "Achieving high robustness in supply distribution networks by rewiring." *IEEE Transactions on Engineering Management* Vol. 58, No. 2, pp. 347-362.

6. A disszertáció témájához kapcsolódó saját publikációk listája

- Monostori, J. 2015. "Ellátási láncok és hálózatok strukturális jellemzése gráfelméleti módszerekkel." *Gépgyártás* Vol. 55, No. 2, pp. 57-62.
- Bohács, G., Haidegger, G., and Monostori, J. 2016. "Az Ipar 4.0 logisztikai kihívásai és lehetőségei." *Logisztikai Híradó* Vol. 26, No. 1, pp. 41-44.
- Monostori, J. 2016a. "Ellátási láncok strukturális tulajdonságainak kvantitatív elemzése." *Logisztikai Híradó* Vol. 26, No. 2, pp. 27-30.
- Monostori, J. 2016b. "Robustness- and complexity-oriented characterization of supply networks' structures." *Procedia CIRP* Vol. 57, pp. 67-72.
- Monostori, J. 2018. "Supply chains' robustness: Challenges and opportunities." *Procedia CIRP* Vol. 67, pp. 110-115.
- Egri, P., Váncza, J., Szaller, Á., and Monostori, J. 2019. "Simulation framework for evaluating production networks." *Proceedings of the 22nd International Multiconference Information Society – IS 2019, Volume I: Middle-European Conference on Applied Theoretical Computer Science (MATCOS-19)* pp. 22-25.
- Monostori, J. 2020. "Beyond the profit motive: Environmentally conscious (re)design of supply chain structures." *Procedia CIRP* Vol. 93, pp. 808-813.
- Monostori, J. 2021. "Mitigation of the ripple effect in supply chains: Balancing the aspects of robustness, complexity and efficiency." *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* Vol. 32, pp. 370-381.