

DOKTORI ÉRTEKEZÉS

Torjai László

Pécs, 2015

PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM
KÖZGAZDASÁGTUDOMÁNYI KAR
GAZDÁLKODÁSTANI DOKTORI ISKOLA

Torjai László

Optimális szállításütemezés a lágyszárú biomassza
ellátási láncban

DOKTORI ÉRTEKEZÉS

Témavezető: Kruzslicz Ferenc

Pécs, 2015

Tartalomjegyzék

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Bevezetés | 1 |
| 1.1 | A lágyszárú biomassa mint energiaforrás..... | 1 |
| 1.2 | A biomassa energetikai hasznosításának előnyei és kihívásai..... | 2 |
| 1.3 | A biomassa ellátási láncok általános felépítése és sokszínűsége | 5 |
| 1.4 | Biomassa ellátási lánc menedzsment, logisztika és szállításütemezés..... | 7 |
| 1.5 | Az elemzendő biomassa ellátási lánc behatárolása | 10 |
| 1.6 | A dolgozat célkitűzései | 13 |
| 2 | A lágyszárú biomassa ellátási lánc felépítése és folyamatai | 14 |
| 2.1 | A SCOR ellátási lánc folyamatmodell | 14 |
| 2.2 | A lágyszárú biomassa ellátási lánc felépítése a SCOR alapján | 15 |
| 2.3 | A termőföldeken végrehajtandó SCOR ellátási folyamatok..... | 18 |
| 2.4 | A depókban végrehajtandó SCOR ellátási folyamatok..... | 20 |
| 2.5 | Az erőműben végrehajtandó SCOR ellátási folyamatok | 22 |
| 2.6 | Tervezés és Támogatás SCOR folyamatok..... | 25 |
| 3 | Biomassa ellátási lánc döntési hierarchia és döntési modellek | 27 |
| 3.1 | A biomassa ellátási lánc döntési hierarchiája | 27 |
| 3.2 | Irodalomfeldolgozás az energetikai rendszerek modellezése kapcsán | 30 |
| 3.3 | Irodalomfeldolgozás a biomassa ellátási láncok modellezése kapcsán | 33 |
| 3.4 | Biomassa beszállítás szimuláció és ütemezés..... | 45 |
| 4 | A lágyszárú biomassa ellátási láncból elvárt stratégiai képességek | 50 |
| 4.1 | Termelési stratégia, versenyprioritások és teljesítményértékelés | 50 |
| 4.2 | Ellátási lánc versenyprioritások a teljesítményértékelési rendszerekben | 53 |
| 4.3 | Ellátási láncok stratégiai fókuszának kijelölése a végtermék jellege alapján..... | 59 |
| 4.4 | LBEL versenyprioritás-struktúra megjelenése a szállításütemezési döntésekben..... | 65 |
| 5 | A LBEL hierarchikus szállításütemezési folyamata | 75 |
| 5.1 | A beszállítási folyamat részletes bemutatása | 76 |
| 5.2 | A hierarchikus ütemezési folyamat végső outputja és három döntési fázisa | 79 |
| 5.3 | A LBEL versenyprioritás struktúra és a döntési fázisok kapcsolata | 81 |
| 6 | A hierarchikus ütemezési folyamat 1. döntési fázisa | 87 |
| 6.1 | Külsőraktár-kapacitás és Biztonsági készlet szint meghatározása | 91 |
| 6.2 | Maximális napi fuvarszám minimalizálása | 94 |
| 6.3 | Külsőraktár-kapacitás és csúcshozzájárulás trade-off | 95 |
| 6.4 | Raktárközi anyagmozgatás és napi fuvarszám simítás trade-off | 96 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.5 | Az 1. döntési fázis outputja: fuvarok napok közötti ütemezése | 98 |
| 7 | A hierarchikus ütemezési folyamat 2. döntési fázisa..... | 101 |
| 7.1 | A modellelemek leírása determinisztikus esetben..... | 104 |
| 7.2 | A 2. döntési fázis elemzése EgyKiesoNap ABF mellett | 108 |
| 7.3 | Az 2. döntési fázis outputja: fuvarok depók közötti allokációja | 114 |
| 7.4 | A depók feltöltésének szabálya..... | 116 |
| 8 | A hierarchikus ütemezési folyamat 3. döntési fázisa..... | 118 |
| 8.1 | A Biomass Truck Scheduling probléma formális leírása..... | 120 |
| 8.2 | Releváns tanulmányok a PMSSP és RCPSP irodalmából | 121 |
| 8.3 | MIP modellek a BTS megoldására | 122 |
| 8.4 | A BTS és kiterjesztéseinek alkalmazása a 3. döntési fázisban | 133 |
| 9 | Összegzés | 137 |
| 9.1 | A dolgozat tudományos eredményei, újdonságtartalma..... | 137 |
| 9.2 | További kutatás lehetőségek..... | 139 |
| | A szerző tudományos közleményei az értekezés témájában..... | 140 |
| | Irodalomjegyzék..... | 141 |

1 Bevezetés

1.1 A lágyszárú biomassa mint energiaforrás

A világ energiakeresletét folyamatos növekedés jellemzi, az energiaigény az elmúlt negyven év alatt csaknem megduplázódott. Míg 1973-ben 4674 Mtoe (millió tonna olajegyenérték), addig 2011-ben 8918 Mtoe volt a teljes energiafogyasztás becsült értéke (International Energy Agency 2013). Az OECD országok esetén is jelentős, kb. 27%-os növekedést tapasztalhatunk: 2815 Mtoe-ről 3582 Mtoe-re nőtt az energiafogyasztás. A megnövekedett energiaigényt többek közt a növekvő népesség és a technika folyamatos fejlődése magyarázza. Jelenleg az összes energiafelhasználás mintegy 80-85%-át fosszilis, nem megújuló energiaforrásokból elégítik ki, ami egyrészt jelentős környezeti terhelést jelent, másrészt fennáll ezen források kimerülésének veszélye. A fenntarthatósági probléma kezelésére egy lehetséges megoldási alternatívát jelent a megújuló energiaforrások erőteljesebb hasznosítása.

Megújuló energia alatt a nap-, szél- és geotermikus energiát, valamint a biomasszából nyert energiát értjük, amennyiben azok fenntartható módon kerülnek felhasználásra. Az Európai Tanács 2007-ben elfogadott határozatának célkitűzése szerint a megújuló energiaforrások részarányát az akkori 8,5%-ról 2020-ra 20%-ra kell növelni (EC 2008). Hazánkban a megújuló energiaforrások aránya a teljes energiafelhasználáson belül 2010-ben csupán 8,79% volt, 2020-ra pedig 14,65%-os célérték került meghatározásra (Vidékfejlesztési Minisztérium 2012). Magyarország esetében további, nem elhanyagolható indok a helyben előállítható megújuló energiaforrások alkalmazásának támogatására, hogy jelenleg több, mint 60%-ban támaszkodunk energia behozatalra, ami számottevő függőséget eredményez. Idehaza – 2010-es adatok alapján – a biomassa adja a megújuló energiaforrások túlnyomó részét (81%) (Magda 2011), melyet mind hő-, mind villamosenergia-termelésre alkalmaznak. A hazai, biomassa alapú energiatermelő üzemek száma 70 körülire tehető (Nagy és mtsai 2009).

Dolgozatom fókuszában a biomasszára épülő biofeldolgozók (bioüzemanyagot, hőt, villamos energiát vagy egyéb biológiai eredetű végterméket előállító üzemek), azon belül is elsősorban a biomassa-tüzelésű erőművek ellátási láncai állnak. A megújuló energia közlekedési célú felhasználásának előmozdításáról és a közlekedésben felhasznált energia üvegházhatású gázkibocsátásának csökkentéséről szóló 2010. évi CXVII. törvény 1. paragrafus 3. bekezdése a következőképpen definiálja a biomassa fogalmát:

„biomassza: a mezőgazdaságból – a növényi és állati eredetű anyagokat is beleértve, erdőgazdálkodásból és a kapcsolódó iparágakból, többek között a halászatból és az akvakultúrából – származó, biológiai eredetű termékek, hulladékok és maradványok biológiailag lebontható része, valamint az ipari és települési hulladék biológiailag lebontható része”.

Bai és mtsai (2002, 13) definíciója szerint a biomassa fogalma „magában foglalja egy adott élettérben jelenlévő összes élő és élettelen szerves anyag mennyiségét, azaz a növényzetet (fitomassza), az állatvilágot (zoomassza) és az elhalt szervezeteket, valamint a szerves hulladékokat is”.

Ahogy a definíciókból is kitűnik, a biomassa gyűjtőfogalom, számottevően eltérő fizikai, biológiai, technológiai jellemzőkkel bíró szerves anyagokat értünk alatta. Eredetük szerint

megkülönböztethetjük az elsődleges (mezőgazdasági és erdészeti növények), a másodlagos (állattenyésztés melléktermékei, hulladékai) és a harmadlagos (feldolgozóipar melléktermékei) biomaszát típusokat. Fizikai halmazállapotuk alapján szilárd, folyékony vagy gáznemű biomaszáról beszélhetünk. A növényi biomaszát további csoportosítási lehetősége a fás, illetve lágyszárú kategóriákba sorolás. Fás szárú biomaszát az erdészeti eredetű alapanyagokat, valamint az energetikai célra termelt fás szárú ültetvényeket (például fekete fűz – *Salix nigra*, hibrid nyár – *Populus hybrids*) értjük. A szántóföldi növénytermesztés területein – a természeti adottságok függvényében – jelentős szerepet kaphatnak a lágyszárú növények (agrárbiomaszát). A lágyszárú biomaszát csoportjába sorolhatók a nagy terméshozamú, akár évente többször is betakarítható, kifejezetten energetikai célra termesztett egynyári vagy évelő energiafűvek (például kínai nád – *Miscanthus giganteus*; vesszős köles – *Panicum virgatum*; zsinégfű – *Spartina pectinata*), a magas nedvességtartalom mellett aratott zöld energianövények (például cukorrépa – *Beta vulgaris*; cukornád fajták – *Saccharum*; cukorcirok – *Sorghum bicolor*) és a hagyományos, főként élelmiszeripari, takarmányozási célból termelt növények melléktermékei (például gabonaszalma, kukoricaszár és csutka) is.

2009-ben a világ több mint 50 országában alkalmazták szilárd biomaszát villamosenergia-termelésre, a legnagyobb kapacitással az Egyesült Államok és Brazília rendelkezett. Európában 800 körülre tehető a biomaszát tüzelő erőművek száma, Németország és a Skandináv államok számítanak a legjelentősebb termelőknél (REN21, 2010). Hazánkban – a szilárd tüzelőanyagok kategóriáján belül – túlnyomórészt erdészeti eredetű alapanyagot használnak energiatermelésre, de az elmúlt évek gyors növekedése a magyar erdők tartalékainak csökkenését eredményezte (Marosvölgyi és mtsai 2009). Ez a folyamat a többi biomaszát típus erőteljesebb hasznosítása felé fordította a figyelmet, melynek egy eklatáns példája a Pécsen 2013 végén átadott 35 MW villamosenergia-termelő kapacitású, mezőgazdasági melléktermékekre alapozott erőművi blokk. Érdemes megjegyezni, hogy a hazai biomaszát potenciál nagyságát illetően nincs egyetértés a szakemberek között, lényeges eltéréseket találunk az egyes becslések értékei között. (Pappné Vancsó 2010, 84)

Kutatásom elsődleges célja, hogy olyan döntéstámogató folyamatot és kapcsolódó matematikai modelleket dolgozzak ki, melyekkel optimalizálható a lágyszárú biomaszát tüzelő erőművek alapanyag-beszállítási folyamata (szállítási-üzemelési döntések). Ehhez a munkához a pécsi CHP blokkot kiszolgáló ellátási láncot használok esettanulmányként. A kutatás célkitűzéseinek részletesebb leírása az 1.6-os alfejezetben olvasható.

A biomaszát energetikai felhasználásáról Bai és mtsai (2002) könyve tekinthető magyar nyelvű alaplát, a szántóföldi növények energetikai hasznosíthatóságát pedig Fogarassy (2001) mutatta be először részletesen. Csete (2008a, 2008b, 2008c) a lágyszárú energianövények (energiaültetvények) szilárd tüzelésű energetikai rendszerekben való felhasználhatóságát vizsgálta cikksorozatában.

1.2 A biomaszát energetikai hasznosításának előnyei és kihívásai

A biomaszát energetikai hasznosítása kapcsán már szinte természetes, hogy az elemzések a teljes ellátási láncra vonatkoznak. „Az ellátási lánc értékteremtő folyamatok együttműködő vállalatokon átívelő sorozata, mely a vevői igények kielégítésére alkalmas termékeket, illetve szolgáltatásokat hoz létre.” (Chikán 1997, 346) Biomaszát ellátási lánc alatt általánosságban az alapanyag-

termelőkkel kezdődő, a biofeldolgozó egységeket magukban foglaló és a megtermelt hőenergia, villamos energia vagy üzemanyag fogyasztóinál véget érő értékteremtő láncot, tevékenységsort értjük.

Gold (2011) a releváns szakirodalom alapján nyújtott áttekintést a bioenergetikai ellátási láncok egyes érdekhordozó (stakeholder) csoportjainál – az energiakinyerésen túl – jelentkező járulékos hasznokról. Belső érdekhordozóknak tekinti az ellátási lánc tagjait, míg külső érdekhordozóknak a láncon kívül elhelyezkedő érintetteket (az energiafogyasztókat is ebbe a csoportba sorolva).

Belső érdekhordozók esetén realizálható hasznok (az energiatermelési alaptevékenységen túl):

- A biomassza feldolgozás során keletkező hulladékok termőföldre való visszajuttatása csökkenti az igényt a műtrágya alkalmazására.
- A biomassza feldolgozás során keletkező melléktermékek további bevételi forrásokat jelentenek.

A külső érdekhordozók (kormányzati szervezetek, civil szervezetek, lakosság, fogyasztók) számára megjelenő járulékos hasznokat mutatja be az 1.1 ábra.

Gazdasági hasznok

- A vidéki, regionális gazdaság fejlesztése
- A mezőgazdasági ágazat fejlesztése
- Jövedelemgenerálás
- Beruházások generálása
- KKV-k működésének támogatása

Ökológiai hasznok

- Üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkenése
- A nem-megújuló erőforrások védelme
- Szerves hulladékok kezelése, feldolgozása, így a környezetterhelés csökkentése
- Erdőirtások csökkenése (bizonyos biomassza típusok esetén)
- Tűzkárok esélyének csökkenése

Társadalmi hasznok

- Munkahelyteremtés
- Energiaellátás biztonságának növelése
- Energiaszegénység csökkentése
- Pozitív helyi közösségformálási hatások
- Pozitív egészségügyi hatások

1.1 ábra Külső érdekhordozó számára megjelenő pozitív externáliák

Meg kell említeni azonban, hogy a fenti pozitív tényezők mellett mind negatív extern hatások, mind egyéb kihívások akadályozzák a bioenergetikai rendszerek terjedését vagy sikeres üzemeltetését. Gold (2011) gyűjtése alapján három kategóriába sorolhatjuk a bioenergia ellátási láncok előtt álló kihívásokat (1.2 ábra):

Jogi és politikai keretrendszer – kormányzati és civil szervezetek

- Hátráltató jogszabályok megléte, támogató jogszabályok hiánya
- Termelés alól kivont, védett területek és erdők
- Kedvezőtlen tulajdonviszonyok
- Bioenergetikai standardok és tanúsítványok hiánya
- Nemzetközi együttműködés hiánya egy jól működő biomassza piac kialakítása kapcsán

Bioenergia termeléshez kapcsolódó kihívások – bioenergia ellátási lánc tagjai

- Társadalmi és környezeti kihívások
 - Szag-, zaj- és légszennyezés
 - Indirekt erdőirtás
 - Nem fenntartható víz- és földhasználat
 - Biodiverzitás csökkenése, a természetes ökoszisztéma átalakítása
 - A biofeldolgozó üzem környezetének fenyegetettsége
 - Hosszú távú szállítás biztonsága
- Földhasználati versengés: élelmiszer- és feldolgozóipari célú növénytermesztés vagy takarmány-előállítás területeinek és erőforrásainak hasznosítása

Lakossági ellenállás az észlelt (vélt vagy valós) kockázatok és hátrányok miatt – lakosság

- Forgalmi torlódások
- Szagszennyezés
- Félelem a biodiverzitás csökkenése és a tájkép megváltozása miatt
- A biofeldolgozó üzem látványa
- A rekreációs területek számának csökkenése (főként erdészeti kitermelés esetén)
- Génmódosított növényekkel kapcsolatos félelmek

1.2 ábra Bioenergia ellátási láncok előtt álló kihívások

McKormick és Kaberger (2007) is azon hátráltató tényezőket kutatták, melyek a biomasszára épülő energetikai rendszerek terjedését gátolják az Európai Unióban. Azt találták, hogy miközben a kontinens számottevő mennyiségű biomassza alapanyaggal rendelkezik, valamint rendelkezésre állnak a feldolgozásukhoz szükséges kiforrott energia-átalakító technológiák, lassan terjed a biomassza energetikai hasznosítása. Tanulmányukban három fő korlátot azonosítottak, melyek egyike sem technológiai jellegű:

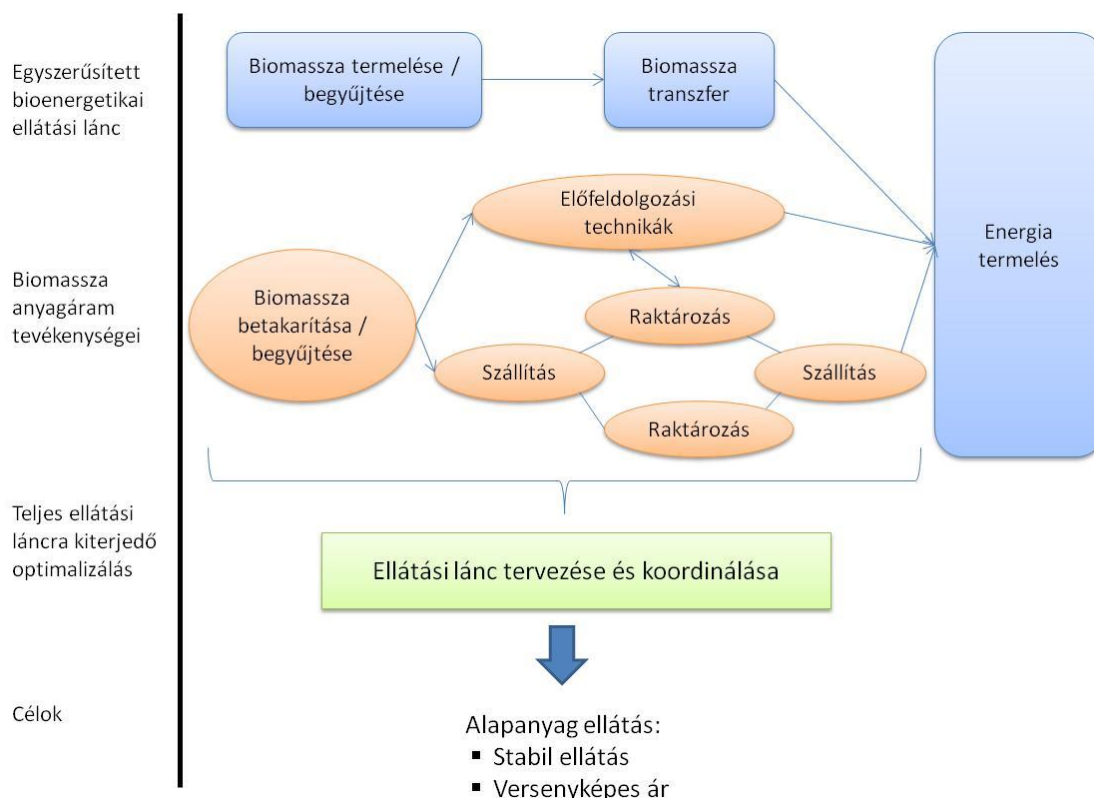
- Gazdasági feltételrendszer: a bioenergetikai beruházások – gyengébb jövedelmezőségük miatt – még igénylik a különböző pénzügyi vagy adminisztratív ösztönzők meglétét, melyek lehetnek beruházási támogatások, de a különböző externális hatásokat internalizáló eszközök is, mint például a szén-dioxid adó vagy a zöld bizonyítványok rendszere. A szerzők ezen megállapítása összecseng a korábban említett jogi-politikai keretrendszer által támasztott kihívások meglétével.
- Know-how és kiforrott intézményrendszer hiánya: mind a potenciális alapanyag-termelők, mind a közműcégek, mind a különböző érdekhordozók (közvélemény, politikai döntéshozók, finanszírozó bankok) számára ismeretlenek az alkalmazandó technológiák, valamint a lokálisan megtapasztalható mintaprojektek hiánya miatt nem tekintenek releváns alternatívaként a bioenergia hasznosítására.
- Ellátási lánc koordináció komplexitása: egy gazdaságosan működő biomassza ellátási lánc kiépítéséhez szükség van az előző pontban említett szereplők mindegyikének hosszú távú elkötelezettségére és együttműködésére – ahol egyikük érdekei sem sérülhetnek túlzott mértékben –, hiszen ezen helyi szereplők általában nem helyettesíthetők külső aktorokkal. Sőt, a megfelelő jövedelmezőség elérése érdekében a folyamat során keletkező melléktermékek hasznosítása is szükségessé válhat, ami az addig is sokszereplős lánc további bővítését követeli meg. Az alapanyag-termelők és az energiatermelő között hosszú távú egymásrautaltság alakul ki, miközben a lánc által megtermelt jövedelem szétszórása során ellentétes érdekeket képviselnek. Mindezek a karakterisztikák jelentősen megnehezítik a bioenergetikai ellátási láncok szervezését, koordinálását.

Az érdeklődő olvasó a bioenergetikai rendszerek előnyeiről és hátrányairól további információt szerezhet többek közt Sims (2003), Sastresa és mtsai (2010), Gnoni és mtsai (2011), Carneiro és Ferreira (2012), Awudu és Zhang (2012), valamint Cucek és mtsai (2012) munkáiból. Magyar nyelven Pappné Vancsó (2010) adott összefoglalót a különböző biomassza típusok energetikai hasznosításának előnyeiről és hátrányairól, Réczey (2007) a biomassza vidékfejlesztésben betöltött szerepére fókuszált, és áttekintette a biomassza hasznosításának akadályait, elterjesztésének nehézségeit, Jung (2008) hazai példán elemezte az energetikai célú erdészeti fakitermelés negatív hatását az úthálózat terhelése kapcsán, míg Kohlheb és mtsai (2010) a különböző megújuló energiaforrások foglalkoztatási hatásait mérték fel.

A bioenergetikai rendszerek működésével kapcsolatos kihívások (gazdasági-jogi, ökológiai, társadalmi, szervezési, stb.) közül dolgozatomban az ellátási lánc menedzsmenthez kötődő problémákkal foglalkozom részletesebben.

1.3 A biomassza ellátási láncok általános felépítése és sokszínűsége

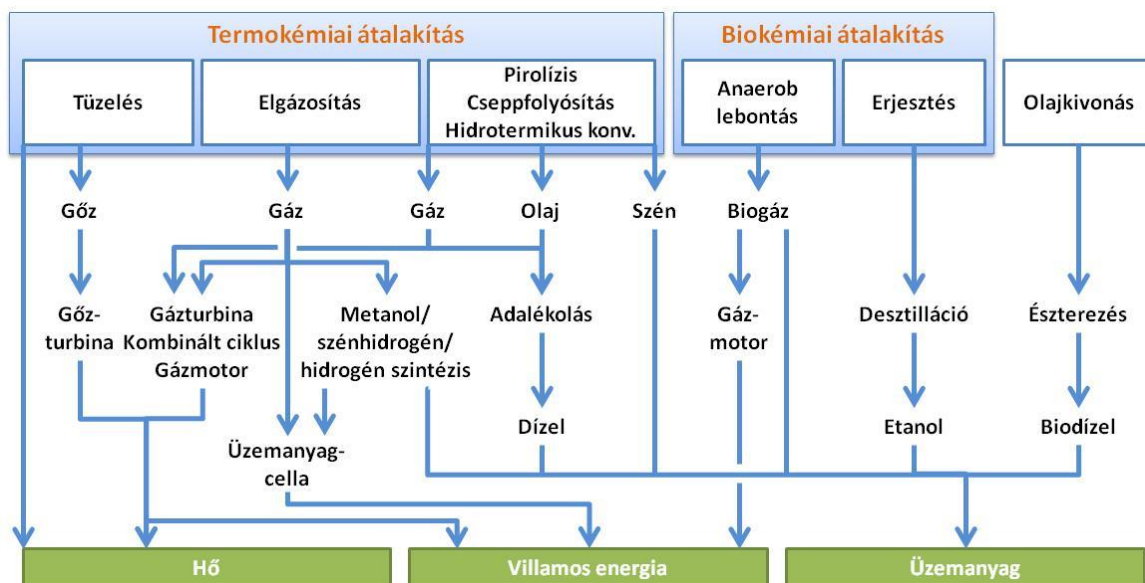
Korábban láttuk, hogy a 'biomassza' megnevezés egy tág gyűjtőfogalom. Ennek megfelelően a 'biomassza ellátási lánc' kifejezés sem egyetlen, jól definiálható tevékenységsorozatra utal, hanem kisebb-nagyobb mértékben eltérő ellátási lánc konfigurációk halmazára. Az irodalomban számos illusztrációs ábrával találkozhatunk, melyek az „általános” biomassza ellátási láncot szemléltetik. Az alábbiakban a Gold és Seuring (2011) által felvázolt modellt mutatom be (1.3 ábra): az ellátási lánc operatív tevékenységei az alapanyag betakarítás és begyűjtés, a raktározás, a szállítás és az előfeldolgozás. A szerzők kiemelik, hogy a megvalósuló logisztikai rendszerrel szemben támasztott két legfontosabb követelmény a stabil ellátás és a versenyképes ár.



1.3 ábra A biomassza ellátási lánc általános struktúrája

A biomassza ellátási láncok sokszínűsége – amint az az ábrából is következik – a különféle alapanyagok és energiakonverziós technológiák, valamint az alternatív logisztikai struktúrák nagyszámú lehetséges kombinációjából fakad.

Dyken és mtsai (2010) becslése szerint, az erdészeti biomassza 5-8 fajtájából 30-50 különböző méretű és formájú, valamint további előfeldolgozást követően 100-200 féle – eltérő jellemzőkkel bíró – energetikai alapanyag származhat. Az alkalmazható energiatermelési módok is változatos képet mutatnak. Bizonyos alapanyagok közvetlen tüzelésével hő és villamos energia, más típusok feldolgozásával biogáz vagy éppen folyékony üzemanyag nyerhető. A különböző feldolgozási technológiák és energetikai végtermékek közötti kapcsolatrendszer szemlélteti az 1.4 ábra. Fontos megemlíteni, hogy egy adott alapanyagból többféle módon is nyerhető energia, így azok nem rendelhetők hozzá kizárólagosan egyetlen feldolgozási útvonalhoz.



1.4 ábra Energiakinyerés biomasszából – feldolgozási útvonalak (Kirkels 2012)

Az egyes technológiai útvonalak gyakorlati megvalósításai is eltérhetnek egymástól. A növényi biomasszát közvetlen tüzeléssel hasznosító fűtőművek, kazánok esetén például igaz, hogy azokat – a maximális hatékonyság érdekében – speciálisan a felhasználni kívánt alapanyag tulajdonságainak (méret, sűrűség, fűtőérték, nedvességtartalom, hamutartalom, hamuolvadási hőmérséklet stb.) megfelelően alakítják ki, és a beérkező tüzelőanyag jellemzői kapcsán csak minimális kilengéseket tolerálnak (Míguez és mtsai 2012).

Az alapanyagok és az energiakinyerési technológiák sokszínűsége mellett a logisztikai rendszerről is elmondható, hogy számtalan megjelenési formája létezhet. Ezek eltérhetnek egymástól

- az anyagáramlási hálózat felépítésében és
- az anyagáramlási hálózat egyes állomásain alkalmazott eljárások, eszközök, berendezések változataiban.

Az anyagáramlási hálózat tervezése során például az alkalmazandó előfeldolgozási módszerek kiválasztására, a szárítási eljárások folyamatba építésére vagy éppen a raktár-infrastruktúra topológiájára vonatkozó döntések meghozatalára van szükség. Miao és mtsai (2012)

kihangsúlyozták, hogy – megbízható, költséghatékony és fenntartható biomassza ellátási lánc létrehozása érdekében – az összes logisztikai művelet (betakarítás, raktározás, előfeldolgozás és szállítás) tekintetében elengedhetetlen az alkalmazott eljárások és eszközök optimális kialakítása, valamint azok összehangolása.

A fentiek alapján kijelenthetjük, hogy részletes gazdasági elemzéseket, döntéstámogatást vagy folyamatoptimalizálást csak kellően definiált lánc esetén lehetséges végezni. Ennek megfelelően, jelen fejezet végén leszűkíttem a vizsgálandó ellátási lánc konfigurációk körét. Előtte azonban áttekintem a biomassza ellátási lánc menedzsment és logisztika azon általános jellemzőit, melyek annak részletes elemzését indokolják.

1.4 Biomassza ellátási lánc menedzsment, logisztika és szállításütemezés

A biomassza ellátási lánc menedzsment fontosságát közvetett módon támasztja alá Kirkels (2012) tanulmánya, amely az 1980 és 2010 között született releváns publikációk és az Európai Biomassza Konferenciák előadásainak felhasználásával ad áttekintést a nyugat-európai fejlődési tendenciákról és a tudományos diskurzus fókuszának változásáról. Kirkels azt találta, hogy az 1980-as években leginkább a folyékony tüzelőanyagok előállítására koncentrált a tudományos közélet, majd a 90-es években a biomasszából történő hő- és villamosenergia-termelés kerültek előtérbe, legyen szó akár kis-, akár nagyméretű technológiákról. Az elmúlt öt év során viszont – részben a nemzetközi biomassza kereskedelem erősödésének köszönhetően – az 'ellátási lánc', 'logisztika' és 'szállítás' kifejezések bekerültek az átlagnál többet használt fogalmak sorába. A szerző szerint a 2004-2011 közötti periódus legfontosabb témakörei az alábbiak: nemzetközi kooperáció, bioüzemanyag kereskedelem, logisztika, fenntarthatósági vita, szintetikus földgáz.

A biomassza ellátási láncsal kapcsolatos kihívások és tanulmányok két, jól elkülöníthető csoportba sorolhatók. Ahogy részben már láthattuk, az 'ellátási lánc menedzsmentjével' foglalkozó – egyébként kisszámú – irodalomban a lánc tagjai között felépítendő hosszú távú együttműködés és bizalom, a közös célrendszer, az információmegosztás, a konfliktuskezelés, a szervezeti struktúra kérdései kerülnek tárgyalásra. A második csoportba – amelyre mind a 'biomassza ellátási lánc', mind a 'biomassza logisztika' kifejezéssel hivatkoznak – olyan döntési szituációk tartoznak, mint például az anyagáramlási hálózat és infrastruktúra optimális tervezése (például a technológia- és alapanyagválasztási, méretezési, telepítési döntések), az anyagellátás megbízható és költséghatékony ütemezése, az alkalmazott eszközök, berendezések fejlesztése.

Az utóbbi csoportba sorolt döntések komplexitása alapvetően a biomassza alapanyagok karakterisztikájából fakad (Miao és mtsai 2012, Gold és Seuring 2011):

- Termőhely földrajzi töredezettsége, ami mind az erdészeti, mind a szántóföldi biomassza esetén jelentős logisztikai költségnövelő tényező.
- Rövid betakarítási időszak, ami ezen időintervallumon kívül a gépek és a munkaerő alacsony hasznosítási fokát eredményezheti. Ezzel szemben, a hagyományos szántóföldi növényekkel megegyező időszakban történő begyűjtés esetén – megnehezített munkaszervezés mellett – erőforrás-hiány léphet fel.
- Szezonális kínálat – folyamatos kereslet, ami lágyszárú biomassza esetén nagy volumenű raktározási igényt támaszt, valamint szükségessé teszi a szántóföldi tárolás bevezetését, depóhálózat kiépítését.

- Minőségromlás a tárolás során, ami megköveteli a kockázatok (például gombásodás, öngyulladás) bekövetkezési valószínűségét minimalizáló raktározási rendszerek alkalmazását.
- Alacsony tömeg- és energiasűrűség, ami megköveteli valamilyen előfeldolgozási, tömörítési művelet végrehajtását.
- Limitált helykitöltő képesség, szabálytalan, nehezen kezelhető forma, ami újból az előfeldolgozási tevékenységek fontosságára hívja fel a figyelmet, valamint szükségessé teheti új berendezések, eszközök fejlesztését.
- Bizonyos esetekben magas nedvességtartalom, ami elengedhetetlenné teszi speciális szárítási megoldások kidolgozását és alkalmazását.

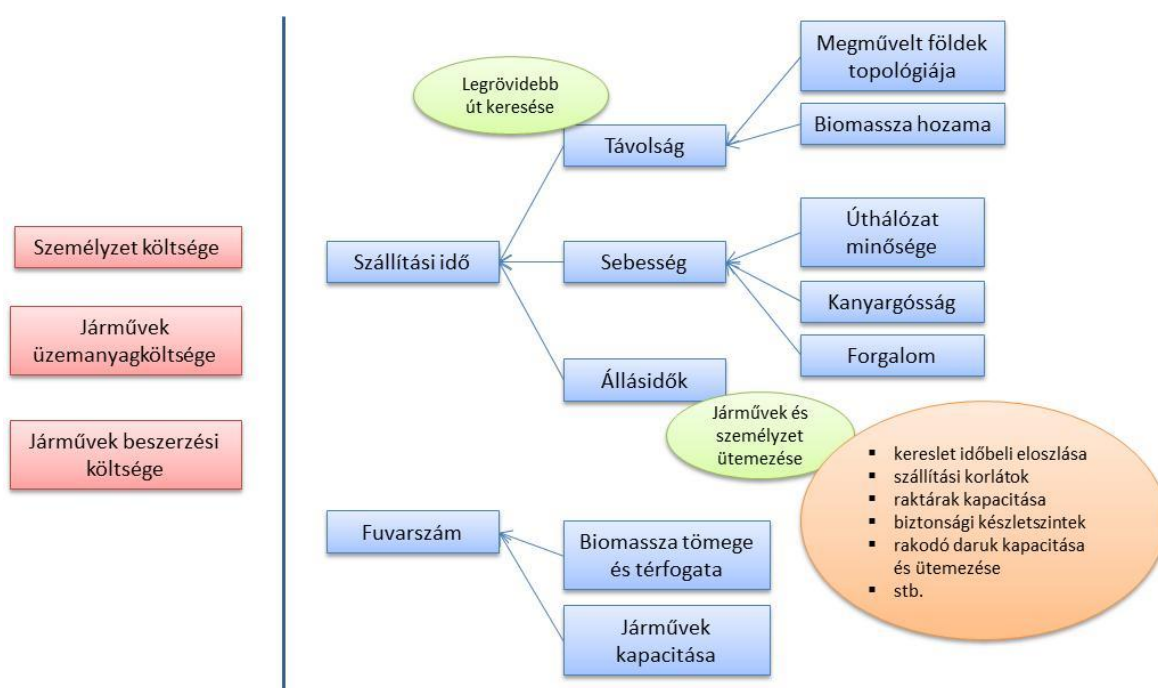
Mindezen jellemzők nagy volumenű és komplex logisztikai tevékenységet igényelnek, ami így a biomassza ellátási lánc egyik meghatározó költségelemévé válik. Mivel a biomassza ellátási láncok számos logisztikai konfigurációval rendelkezhetnek, így nem lehet egy szűk intervallummal jellemezni a logisztikai kiadások arányát a teljes költségtömegben belül. Abban azonban minden szerző egyetért, hogy a logisztikai költségek csökkentésére, és az aktuális beruházások kapcsán a minimális költségű logisztikai struktúra megtalálására van szükség ahhoz, hogy a létrehozandó bioenergetikai rendszer pénzügyi szempontból is versenyképessé váljon (Searcy és mtsai 2007). Az alábbiakban – a teljesség igénye nélkül – bemutatok néhány számszerű eredményt a logisztikai, szállítási költségek arányára vonatkozóan.

Ebadian és mtsai (2011) tanulmánya szerint a mezőgazdasági melléktermékből történő bioetanol előállítás teljes költségének 40-60%-ára rúgnak az alapanyag-ellátáshoz kapcsolódó kiadások, melyet az összes költség 25%-a alá kéne szorítani a versenyképesség érdekében. A Caputo és mtsai (2005) által végzett elemzések azt mutatták, hogy közvetlen tüzeléses vagy elgázosítást végző 40MW teljesítményű erőművek esetén – ahol az alapanyagot mezőgazdasági melléktermékek és fahulladék alkották – a beszerzési és szállítási költségek 32-57%-át adták az energia-előállítás teljes költségének, melyen belül a szállítási költségek 8-18%-ot tettek ki. Ezen kívül azt is kimutatták, hogy a fajlagos szállítási költség 1%-os csökkentése a beruházás nettó jelenértékének közel hasonló mértékű növekedéséhez vezet. Miao és mtsai (2012) kutatásai szerint a lignocellulóz biomasszából történő energiatermelés szállítási költsége – a szállítási módtól és a tömörítés mértékétől függően – a teljes költség 13-28%-át teszi ki. Perrin és mtsai (2012) egy Nebraska területén végzett kutatás során azt találták, hogy a kukoricaszár és az óriás köles ellátási folyamatai során a költségek 13-19%-át teszik ki a szállításhoz és rakodáshoz kapcsolódó költségek. Thompson és Tyner (2014) 33%-ra becsülték ezen komponens arányát kukoricaszár esetén. Ruiz és mtsai (2013) szerint a lágyszárú biomassza depók és biofeldolgozó közötti anyagmozgatása során a felmerülő költségek 75%-át a szállító járműveket érintő kiadások adják. Jung (2008) az Egererdő Erdészeti Zrt. példáján mutatta be, hogy az energetikai célú fakitermelés eredményességét leginkább a beszállítás költségének változása befolyásolja. Ennek nagysága az elérhető bevétel 19-32%-a között mozog az alapanyag nedvességtartalma és a logisztikai rendszer konfigurációja (például szárítási állomások beépítése) függvényében.

A szállítási költségek meghatározó jellegét mutatja, hogy az irodalomban gyakran számolt paraméter a biofeldolgozó és a termőhely közötti gazdaságos szállítási távolság, ami felett már nem éri meg az alapanyag beszerzése. A maximális szállítási távolság leginkább az erőmű méretétől és a biomassza típusától függ. Németh (2011) egy 1,2 MW teljesítményű fűtőmű esetén vizsgálta az

energiafűz ültetvények gazdaságosságát a szállítási távolság függvényében, és arra jutott, hogy 54 km-es szállítási távolság felett az ültetvény elveszti jövedelmezőségét. A nemzetközi irodalomban számos szerző 20-30 kilométerben maximalizálja a szállítási távolságot lágyszárú biomasszát tüzelő, kb. 2MW-os erőműméret esetén. Nagyobb kapacitású biofeldolgozók ellátásához azonban 100-150 kilométerről is történhet beszállítás (Ruiz és mtsai 2013). Érdekes kérdésként merül fel a logisztikai folyamatok során elhasznált energia nagyságának becslése. Dolgozatomban ezzel a témakörrel nem foglalkozom, csak megemlítem, hogy Forsberg (2000) – más szerzőkhöz hasonlóan (Sokhansanj és mtsai 2006, Kumar és Sokhansanj 2007, Nilsson 1998) – arra jutott, hogy annak mértéke kb. 7-9%-a a rendszer által megtermelt teljes energiamentiségnek.

A Gold és Seuring (2011) összegyűjtötték a közúti szállítási tevékenységet jellemző és a kapcsolódó költségeket determináló paraméterek listáját. Ezt a listát kiegészítve és a lágyszárú biomasszát lokálisan hasznosító erőművek esetére adaptálva készítettem az 1.5 ábrát.



1.5 ábra Lágyszárú biomassza szállítási költségét meghatározó főbb tényezők

A három legfontosabb költségelem a személyzet költsége, a járművek üzemanyagköltsége, valamint a járművek beszerzési költsége (további költségelemek például a biztosítási díjak, a karbantartási költségek). A szállításban résztvevők munkabére az összes szállítási időtől, a járművek üzemanyagköltsége pedig a szállítási távolságok összegétől függ leginkább. A szállítási távolságok és az elérhető átlagsebesség által meghatározott teljes hasznos szállítási időt egészíti ki az állásidők összege, melyet elsősorban a járművek torlódása eredményezhet. A járművek sorbanállásának több oka is lehet, ilyen például a különböző folyamatok szűkös kapacitása (szűk keresztmetszet), a szállítási folyamatok sztochasztikus jellege vagy éppen a járművek és egyéb erőforrások nem optimális ütemezése. A járművek beszerzési költsége, azaz a szükséges járműpark nagysága egyrészt az összes szállítási időtől függ, másrészt attól, hogy ezt – az erőforrások ütemezése által – miként sikerül allokálni a járművek között. Az allokáció függ többek közt a kereslet időbeli eloszlásától, a szállítási tevékenységre vonatkozó korlátoktól (jogsabályok és szervezeti politika), valamint az anyagkezelés jellemzőitől is. A logisztikai rendszer további meghatározó

költségelemei a járművek fel- és lerakodásához, valamint az alapanyag tárolásához kapcsolódó kiadások.

Az ábrán feltüntettem a Gold és Seuring által is kiemelt két operatív döntési szituációt (legrövidebb út keresése a hálózat pontja között, valamint a járművek és személyzet ütemezése), valamint olyan tényezőket, melyek befolyásolhatják az ütemezési döntéseket. Jelen dolgozatban az útvonalkeresés problematikájával nem foglalkozom, adottnak veszem a hálózati elemek közötti szállítási útvonalakat. Vizsgálataim fókuszában a szállítási tevékenység és a járművek ütemezése áll, valamint néhány kapcsolódó vagy ezen operatív terv által meghatározott döntési szituáció, mint például a rakodási tevékenység ütemezése vagy a raktárkapacitás nagyságának meghatározása (a szállításütemezési döntések számottevő mértékben befolyásolják a rakodással és a raktározással kapcsolatos kiadásokat is).

A következőkben leszűkítem a vizsgált biomassza ellátási lánc konfigurációk körét: a fő karakterisztikák megadásával behatárolom az ellátási láncok azon halmazát, ahol érvényesek lesznek dolgozatom megállapításai.

1.5 Az elemzendő biomassza ellátási lánc behatárolása

Dolgozatomban a szántóföldi eredetű lágyszárú biomasszára épülő energetikai rendszerek bizonyos logisztikai kérdéseivel foglalkozom. Ezen energetikai rendszerek fő jellemzői megismeréséhez hasznos áttekinteni azt az elméleti keretrendszert, melyet Voytenko és Peck (2012) alakítottak ki az agrárbiomasszára alapozott ellátási láncok csoportosításához. A négy fő kategóriából (Szereplők és hálózatok, Természeti erőforrások, Technikai komponensek, „Soft” komponensek) álló keretrendszer kifejtése 4 szint mélységig történik meg. Az 1.1 táblázatban a dolgozat szempontjából releváns elemeket mutatom be:

| | | | |
|---------------------------|---|--|---|
| 1. Szereplők és hálózatok | A biomassza láncba közvetlenül bevont szereplők | Alapanyag termelők | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Farmerek ▪ Vállalkozók |
| | | Alapanyag közvetítők | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Alvállalkozók ▪ Kereskedők |
| | | Biomassza elsődleges felhasználói | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Különböző méretű kazánházak ▪ Távhőt szolgáltató fűtőművek ▪ Villamos energiát termelő erőművek ▪ CHP erőművek |
| | | Biomasszából származó energia felhasználói | ... |
| | | Biomassza alternatív felhasználói | ... |
| | A biomassza láncba közvetetten bevont szereplők | ... | |
| 2. Természeti erőforrások | Biomassza alapanyag | Alapanyag típusa | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mezőgazdasági melléktermékek ▪ Élő növények |
| | | Alapanyag eredete | ... |
| | | Alapanyag piaca | ... |
| | | Alapanyag elsődleges felhasználási formája | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Szalmacsomó ▪ Bála ▪ Brikett ▪ Pellet |

| | | | | |
|--------------------------|---------------------------------------|--|--|-----|
| | | Alapanyag másodlagos felhasználási formája | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Üzemanyag-keverék ▪ Folyékony bioüzemanyag ▪ Biogáz | |
| | | Egyéb | Földterület | ... |
| | | | Talaj | ... |
| | | | Víz | ... |
| | | | Levegő | ... |
| Biodiverzitás | ... | | | |
| 3. Technikai komponensek | Infrastruktúra | Gépek és berendezések | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Veteményezés ▪ Trágyázás ▪ Betakarítás ▪ Bálázás ▪ Szállítás ▪ Öntözés | |
| | | Átalakítási berendezések | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kisméretű kazánok (< 1 MW) ▪ Közepes méretű fűtőművek (1-6 MW) ▪ Nagyméretű erőművek (> 6 MW) ▪ Közeleli/közepes távolságú beszállítás (< 50 km az alapanyagforrástól) ▪ Távoli beszállítás (> 50 km az alapanyagforrástól) ▪ ... | |
| | Technológia | Átalakítási módszer | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Elsődleges alapanyag tüzelése ▪ Vegyes tüzelés más típusú alapanyaggal | |
| | | Energia felhasználási területe | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fűtés ▪ Villamos energia ▪ Szállítás | |
| | 4. „Soft” (nem technikai) komponensek | Intézmények | Jogszabályi környezet | ... |
| | | | Gazdaság | ... |
| Társadalmi rendszer | | | ... | |
| Járulékos előnyök | | Energiabiztonság | ... | |
| | | Vidékfejlesztés | ... | |
| | | Ökológiai előnyök és költségek | ... | |
| Tudás | | Szereplők kompetenciái | ... | |
| | Előírások | ... | | |

1.1 táblázat Keretrendszer az agrárbiomasszára épülő energetikai rendszerek csoportosításához

A továbbiakban – elsősorban, de nem kizárólagosan – olyan agrárbiomasszára épülő energetikai rendszerek ellátási láncát vizsgálom, ahol – alkalmazva a keretrendszer fogalmait –

- nagyméretű erőművek (jellemzően CHP) alapanyag-ellátását kell megoldani,
- az alapanyag lehet bármilyen lágyszárú biomassza,
- elsődleges felhasználási formájú alapanyag(ok) közvetlen tüzelésére kerül sor,
- a tüzelőanyag bála formájában kerül beszállításra az erőműbe,
- a beszállítás jellemzően közeli vagy közepes távolságra fekvő termelőktől történik,
- a tüzelés eredményeként villamos energia és kapcsolt hő keletkezik.

Napjainkban a száraz biomassza energetikai felhasználása leggyakrabban ezen bála-alapú logisztikai rendszer keretében történik meg (Sokhansanj és Hess 2009).

A fenti elméleti keretrendszer kialakítása mellett a szerzők 13 (8 svéd és 5 dán) szalmatüzelést megvalósító beruházás elemzését is elvégezték, ami alapján egy empirikus csoportosítást is adtak. Négy kategóriát alakítottak ki:

1. Kisméretű, helyi hőtermelés: a mezőgazdasági termelő a saját földjein keletkezett szalmát tüzei el hőtermelés céljából a saját maga által finanszírozott és üzemeltetett kazánban (< 0,6 MW). A beruházást a költségcsökkentés (vásárolt fűtőolaj kiváltása) motiválja, és a hőt általában terményszárításra használja fel.
 2. Közepes méretű, helyi hőellátás a felesleg értékesítése mellett: az előző csoporthoz képest az alapvető különbség az, hogy nagyobb mennyiségű szalma termelődik a farmernél. Ebből következően nagyobb teljesítményű (1-1,5 MW), folyamatos üzemű, szalmatüzelésre kialakított kazánok alkalmazására kerül sor, standard bálaméretet használva. A többlet hőt a szomszédos farmerek vagy a távfűtő rendszer hasznosítják. A beruházásokat a drágább tüzelőanyag kiváltása és az értékesítésből származó extra bevétel is motiválja.
 3. Közepes méretű átalakítás távfűtő szolgáltatással: a települések távfűtéséhez és használati melegvíz ellátásához hozzájáruló fűtőművek 1-6 MW teljesítményűek, melyek nyáron csak 20% körüli kihasználtsággal működnek. A kazánok technológiája megegyezik az előző pontban leírtakkal, de a beszállítás akár 40 km-es távolságból is történhet. A bálák tárolása egyrészt a földeken, másrészt a fűtőmű tárolóiban valósul meg. Ezen rendszerek esetén már szétválnak az ellátási lánc legfontosabb szerepkörei, mint például az alapanyag-termelő, a mezőgazdasági alvállalkozó, a biomassza kereskedő, a fűtőmű és az energiafogyasztó. A szalma beszerzése írásos szerződések vagy – kölcsönös bizalmon alapuló – szóbeli megállapodások alapján történik (egyes esetekben a termelők ingyenesen szolgáltatják az alapanyagot). A beruházás finanszírozási és tulajdonlasi formája eltérő megoldásokat mutat (termelői, közösségi tulajdonlás, független beruházók), de általános jellemző a helyi önkormányzat szerepvállalása. A beruházások legfontosabb mozgatórugóját azok a politikai célkitűzések jelentik, amik a gáz és olaj kiváltásából eredő gazdasági és ökológiai előnyök kihasználására irányulnak.
 4. Nagyméretű villamos energia vagy kombinált villamosenergia- és hőtermelés (CHP): a villamos energiát előállító erőművek (> 6 MW) a keletkező hőt távfűtő hálózatokba juttatják el. A kazánok szofisztikált technológiával rendelkeznek, az alapanyag-beszállítás akár 150 km-es távolságból is történhet. A nagyméretű bálákat pótkocsis kamionok szállítják, a bálák tárolása pedig nagyrészt a földeken (depókban), kisebb részt az erőmű tárolóiban valósul meg. A szalma beszerzése írásos szerződések alapján történik, a beszerzési ár kalkulációjának alapja a szalmapiacon kialakult ár (Dániában a nagyméretű szalmatüzelésű erőművek megléte maga után vonta egy érett szalmapiac kialakulását). Az erőművek energetikai cégek tulajdonában állnak. A beruházások megvalósításának motivációi gazdasági, politikai és jogi természetűek. Az energiaellátás kockázatának minimalizálása érdekében az erőművek üzemeltetői igyekeznek diverzifikálni az alapanyagok körét évelő növények és egyéb biomassza típusok bevonásával, valamint gyakran fatüzelésű kazánokat is telepítenek a szalmatüzelésű mellé.
- Városi energetikai megoldások (3. és 4. kategória) tervezése kapcsán érdemes megemlíteni, hogy míg a centralizált, nagyobb méretű erőművek magasabb hatásfokkal, alacsonyabb fajlagos környezetterheléssel, valamint alacsonyabb fajlagos beruházási és üzemeltetési költséggel rendelkeznek, addig a több kisebb erőműből álló hálózatot az egyszerűbb logisztikai rendszer

jellemzi, ahol könnyebben biztosítható a helyszín mind az erőművek telepítéséhez, mind a nagy volumenű tüzelőanyag tárolásához (Keirstead és mtsai 2012).

Dolgozatomban – az elméleti keretrendszer kapcsán leírtakkal összhangban – a negyedik típusú biomassza-tüzelésű erőművek ellátását biztosító logisztikai rendszer szállításütemezési döntéseivel foglalkozom. A továbbiakban, ha 'lágyszárú biomassza ellátási lánc'-ra (LBEL) vagy csupán '(biomassza) ellátási lánc'-ra hivatkozom, akkor ezen speciális jellemzőkkel leírt konfigurációra gondolok.

Ezen komplex ellátási láncok esetén a tüzelőanyag-beszállítási tevékenység már olyan volument ér el, ami

- egyrészt hatékonyá, sőt szükségessé teszi matematikai modellek alkalmazását a logisztikai folyamatok optimalizálása érdekében,
- másrészt megköveteli az alapanyag-ellátás zavartalanságát biztosító eszközök alkalmazását.

Magyarországon – egyedüli példaként – 2013 végén történt meg egy 35 MW teljesítményű, lágyszárú biomasszát hasznosító CHP blokk beüzemelése Pécssett. A kazánban 240 ezer tonna biomassza kerül eltüzelésre évente, melynek 90%-át mezőgazdasági melléktermék, maradék 10%-át pedig energianád (*Miscanthus*) adja. A tüzelőanyag beszállítása az erőmű 80 km sugarú környezetéből történik, a biztonságos alapanyag-ellátást pedig egy 3,5 napnyi kapacitással rendelkező tároló támogatja az erőmű telephelyén (Pannon-Hő Kft 2013).

1.6 A dolgozat célkitűzései

Munkám fő célkitűzése, hogy egy döntéstámogató folyamatot és kapcsolódó matematikai modelleket dolgozzak ki, melyek alkalmazhatók a fenti jellemzőkkel definiált logisztikai konfigurációk esetén a szállításütemezési döntések optimalizálására. A modellek jellegzetessége, hogy azokban nem számszerűsítem közvetlenül az elemzett logisztikai tevékenység költségeit. A célfüggvényekben olyan naturáliákat (például járműflotta nagysága, készletnagyság) és egyéb mutatószámokat (például tétlen idő) szerepeltetek, melyek a különböző ellátási lánc teljesítménykritériumok (például költség szint, megbízhatóság) releváns befolyásoló tényezői. Ennek megfelelően, a dolgozat – több más tanulmánytól eltérően – nem törekszik arra, hogy költségbecslést adjon egy speciális logisztikai konfigurációra vonatkozóan.

A modellek kidolgozása előtt három megalapozó feladatot végzek el:

- A Supply Chain Council által kidolgozott SCOR folyamatmodell (SCC 2010) segítségével részletesen bemutatom a termelőktől az erőműig tartó ellátási lánc szakasz felépítését és folyamatlemeit, valamint specifikálom az elemzett döntési szituációk körét.
- Kialakítom azt a döntési hierarchiát, mely a biomassza ellátási láncok tervezéséhez és üzemeltetéséhez kapcsolódó döntési szituációkat foglalja magában. Ez a hierarchia szolgál logikai vázként a releváns irodalom feldolgozásához, rendszerezéséhez.
- Feltárom a lágyszárú biomassza ellátási láncokat jellemző versenyprioritás struktúrát (elvárt stratégiai képességek rendszere), melyek meghatározzák a szállításütemezési modellek alkalmazásának módját, az azokba építendő korlátozó feltételek és célfüggvények pontos körét és jellemzőit.

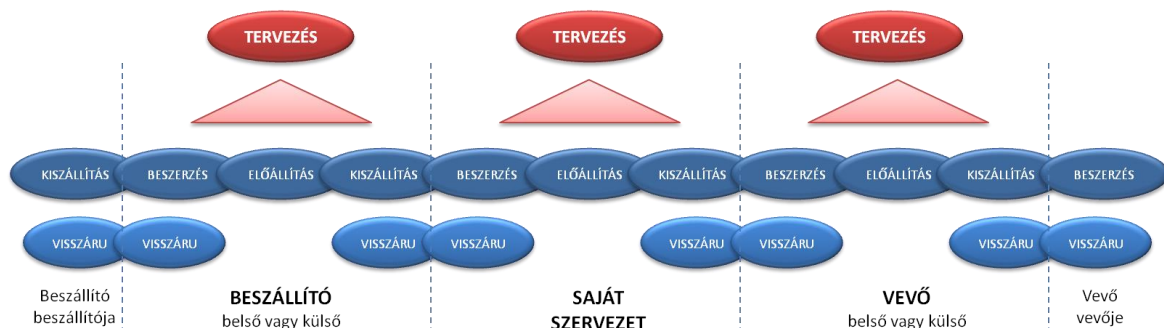
2 A lágyszárú biomassza ellátási lánc felépítése és folyamatai

2.1 A SCOR ellátási lánc folyamatmodell

Több nemzetközi szervezet is alakult azzal a céllal, hogy összefogja az ellátási lánc menedzsment területén dolgozó kutatókat és gyakorlati szakembereket, támogassa az ellátási lánc menedzsment elmélet és gyakorlat fejlesztését, valamint benchmarkot dolgozzon ki tagvállalatai számára. Ezen szervezetek közül többek saját ellátási lánc folyamatmodell is kialakítottak. Dolgozatomban a Supply Chain Council által kidolgozott folyamatmodell (SCC 2010) használok fel a vizsgált ellátási lánc részletes bemutatásához.

A Supply Chain Council egy globális nonprofit szervezet, melynek célja, hogy az általa szolgáltatott keretrendszer, fejlesztési módszerek és benchmarking eszközök által a tagszervezetek drasztikus módon legyenek képesek fejleszteni ellátási láncuk teljesítményét: a Supply Chain Operations Reference (SCOR) modell lehetővé teszi, hogy a felhasználók definiálhassák ellátási lánc folyamataikat és összemérhessék azokat a szervezetükön belüli és kívüli megoldásokkal (Zhou és mtsai 2011). Az SCC egyetlen keretrendszerbe foglalta az ellátási lánc teljesítményének értékeléséhez használandó metrikákat (Performance), az ellátási láncok általános értékteremtő, tervezési és támogató folyamatait (Processes), a metrikák szignifikáns javítását elősegítő legjobb gyakorlatokat (Practices), valamint a végrehajtó személyektől elvárt – a folyamatok megfelelő működtetéséhez szükséges – szaktudás elemeket (People).

Az ellátási lánc folyamatok (Processes) öt folyamat típus alá kerültek besorolásra: Plan (Tervezés), Source (Beszerzés), Make (Előállítás), Deliver (Kiszállítás) és Return (Visszárú) (2.1 ábra). Mind az öt folyamat típushoz tartoznak Enable (Támogatás) folyamat elemek is.



2.1 ábra A SCOR öt folyamat típusának kapcsolatrendszere (SCC 2010)

A modell további két szintet definiál a folyamatok részletezése során (folyamatkategoróriák és folyamat elemek). Amíg a Tervezés és Visszárú típusok alatti folyamatkategoróriák mindegyike releváns az összes üzleti szervezet számára, addig a Beszerzés-Előállítás-Kiszállítás hármasság esetén a szervezet termékeinek jellege és az abból fakadó ellátási lánc üzleti modell alapján kell illeszkedő folyamatkategoriót választani. A SCOR három különböző ellátási lánc üzleti modellt különböztet el, melyek a készletre termelés (make to stock – MTS), a megrendelésre termelés (make to order – MTO) és a megrendelésre tervezés (engineer to order – ETO).

Példaként lássuk először a Tervezés típus folyamatkategorióit:

- sP1 – Ellátási lánc tervezése (Plan Supply Chain)

- sP2 – Beszerzés tervezése (Plan Source)
- sP3 – Előállítás tervezése (Plan Make)
- sP4 – Kiszállítás tervezése (Plan Deliver)
- sP5 – Visszárú tervezése (Plan Return)

Az sP1 – Ellátási lánc tervezése kategória folyamatelemei az alábbiak:

- sP1.1 – Az ellátási lánc követelményeinek azonosítása, prioritásainak meghatározása és összegzése (Identify, Prioritize and Aggregate Supply Chain Requirements)
- sP1.2 – Az ellátási lánc erőforrásainak azonosítása, prioritásainak meghatározása és összegzése (Identify, Prioritize and Aggregate Supply Chain Resources)
- sP1.3 – Az ellátási lánc erőforrásainak és követelményeinek illesztése (Balance Supply Chain Resources with SC Requirements)
- sP1.4 – Ellátási lánc tervek kidolgozása és kommunikálása (Establish and Communicate Supply Chain Plans)

Az Előállítás típus folyamatkategóriái:

- sM1 – Készletre termelés (Make-to-Stock)
- sM2 – Megrendelésre termelés (Make-to-Order)
- sM3 – Megrendelésre tervezés (Engineer-to-Order)

Az sM1 – Készletre termelés kategória folyamatelemei az alábbiak:

- sM1.1 – Termelés ütemezése (Schedule Production Activities)
- sM1.2 – Anyagok kiadása (Issue Sourced/ In-Process Product)
- sM1.3 – Termelés és tesztelés (Produce and Test)
- sM1.4 – Csomagolás (Package)
- sM1.5 – Végtermék elhelyezése (Stage Finished Product)
- sM1.6 – Végtermék kiadása kiszállításhoz (Release Finished Product to Deliver)
- sM1.7 – Hulladékhasznosítás (Waste Disposal)

A harmadik szinten elhelyezkedő folyamatelemek további részletezése nem történik meg a keretrendszerben, azok gyakorlatban végrehajtandó tevékenységeit az alkalmazó szervezetnek kell kidolgoznia saját jellemzőinek megfelelően.

Az ellátási folyamatstruktúra egyszerű és standardizált eszközként használható az ellátási láncok szerkezetének ábrázolására, modellezésére. A keretrendszer további előnye, hogy a folyamatokhoz kapcsolva épít fel egy teljesítményértékelési metrikastruktúrát, valamint egy, a folyamatelemek végrehajtásához szükséges részletes szaktudás listát.

Dolgozatomban a SCOR ellátási folyamatainak rendszerét hívom segítségül a LBEL felépítésének bemutatására, míg a SCOR metrikarendszert a LBEL-cal szemben támasztott kritériumok meghatározása során használom fel egy későbbi fejezetben.

2.2 A lágyszárú biomassa ellátási lánc felépítése a SCOR alapján

Biomassa ellátási lánc alatt a biomassa előállítóktól az energiafogyasztókig tartó értékteremtő folyamatot értjük. A lágyszárú biomasszát hasznosító, erőművi tüzelést magában foglaló ellátási

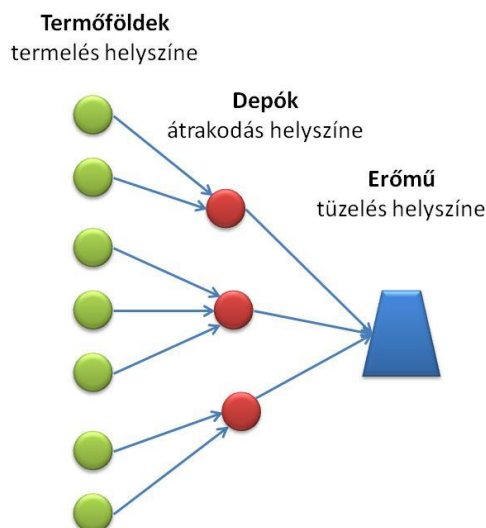
lánc során általában öt szereplőtípussal számolunk: az alapanyag-termelő, az átrakó pont/depó, a szállító, az erőmű és az energiahasznosító (hálózatok, kereskedők, fogyasztók). Jelen dolgozatban ezen teljes ellátási lánc egy szakaszát vizsgálom csak. Az elemzett részfolyamat induló állapotában a betakarított biomassa már rendelkezésre áll a termőföldeken, míg végállapotába akkor ér, amikor az erőműbe szállított biomassa felhasználásra került. Ez a leszűkítés megengedhető, ugyanis a vizsgált szakasz – tervezési szempontból – szeparálható a megelőző és a követő folyamatoktól. Egyrészt az alapanyag betakarítása az év viszonylag rövid, jól behatárolható időszakában történik meg, ami után a termőföldeken stabil biomassa kínálat alakul ki. Másrészt az erőmű és a végső energiafogyasztók közötti disztribúciós infrastruktúra, valamint az erőmű kínálata is változatlanul tekinthető rövid, illetve középtávon, így az ellátási lánc logisztikai műveleteinek – általában éves időhorizonton belüli – tervezése során adottságként kezelhetők.

A következőkben ezen rész-ellátási lánc felépítését, elemeit mutatom be a SCOR struktúrája alapján. A gyakorlatban megjelenő ellátási láncok egyes funkcióinak (például raktározási infrastruktúra) geográfiai elhelyezkedése eltérő megoldásokat hozhat, azonban megkülönböztethetünk három olyan fő helyszíntípust, melyek – technológiai és gazdasági szükségszerűség okán – meghatározzák az anyagáramlás topológiáját:

- Termőföldek: tüzelőanyag termelés helyszíne (néhány száz termelő).
- Átrakó pontok, depók: a tüzelőanyag nagyméretű szállító járművekre rakodásának helyszíne. Az angol nyelvű irodalomban a depók hálózatára 'Satellite Storage Locations'-ként (SSL) is hivatkoznak (több tíz depó).
- Erőmű: tüzelés helyszíne. A dolgozatban bemutatandó matematikai modellek egyetlen erőművet tartalmazó ellátási lánc modellezésére készültek, de ezek kis erőfeszítéssel általánosíthatók több biofeldolgozó esetére is.

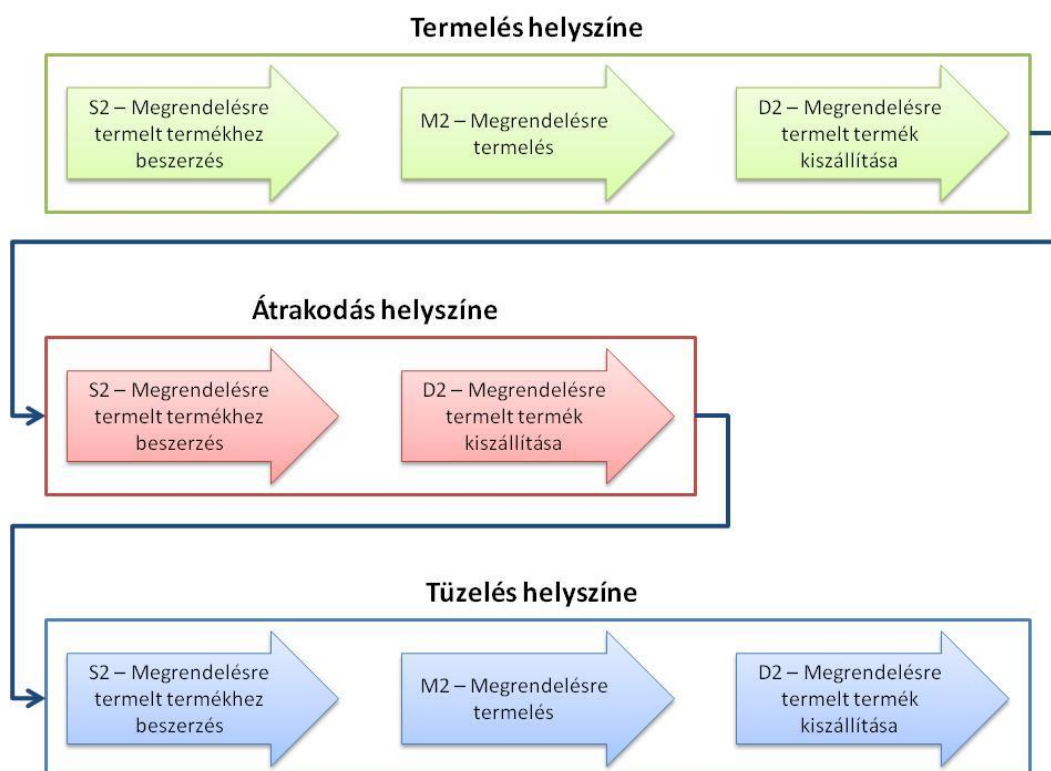
A termőföldek és depók elkülönítésének oka az, hogy a nagyméretű szállító járművek fogadásához megfelelő minőségű aszfaltos útra van szükség, amely feltétel nem minden termőföld esetén teljesül. Amennyiben egy termőföld megközelíthető ezen járművek által, úgy az átrakási pont funkcióit is elláthatja (a modellezés céljainak megfelelően ebben az esetben is szétválaszthatjuk a termelési és depó funkciót, zérus szállítási távolsággal összekötve őket). Az egyes helyszínek raktározási tevékenységet is végeznek. Ahogy a 2.2 ábrán illusztráltam, az anyagáramlási hálózat egy kétszintű csillag topológiával írható le, ahol minden termőföldet egyértelmű módon rendelünk hozzá egy depóhoz. A depók helyét úgy szükséges kijelölni, hogy egyetlen termőföldről se kelljen néhány kilométeres távolságnál hosszabban szállítani a tüzelőanyagot.

Fontos hangsúlyozni, hogy a fenti funkcionális felosztás nem jelenti az intézményi határok automatikus kijelölését. A depók üzemeltetése például elképzelhető termelői csoportosulások vagy önálló integrátorok által, de az erőmű szervezeti keretein belül is.



2.2 ábra Lágyszárú biomassza ellátási lánc anyagáramlásának helyszínei

A három helyszíntípus és a hozzájuk kapcsolódó ellátási folyamatok ábrázolása a SCOR második szintű folyamatkategoróriái segítségével a következőképpen tehető meg (2.3 ábra).



2.3 ábra Lágyszárú biomassza ellátási lánc SCOR folyamatkategoróriái

A négy ellátási folyamat típus (Beszerzés, Előállítás, Kiszállítás, Visszárú) közül a Visszárú vizsgálatával a dolgozatban nem foglalkozom: bár az erőműnél keletkező hamu elszállítása (például a termőföldekre) is megoldandó feladatként jelentkezik, de annak bonyolultsága nagyságrendekkel elmarad a tüzelőanyag logisztikájának komplexitásától.

Bár a technológiai jellemzők nem teszik szükségszerűvé, hogy mind a termőföldeken, mind a depók esetén a megrendelésre termelés modelljét alkalmazzák az ellátási lánc szereplői, de ahogy azt a későbbi fejezetekben is látni fogjuk, a gazdasági, hatékonysági szempontok kikényszerítik ezt. Meg kell jegyezni, hogy az alapanyag-termelők tevékenysége mutat olyan jeleket, melyek a készletre termelés modelljére hasonlítanak: az év adott időszakában nagy mennyiségű tüzelőanyagot állítanak elő (az ökológiai törvényszerűségeknek megfelelően), melyből folyamatosan történik meg a kereslet kielégítése. Azonban látni kell, hogy – azon kivételes országoktól eltekintve, ahol fejlett szalmapiac alakult ki – az alapanyag termelése az erőmű hosszú távú megrendeléseinek megfelelően történik. Hasonló módon, az erőmű által előállított villamos energia vagy hő mennyisége is hosszú távú szerződések által meghatározott.

A dolgozatban vizsgált rész-ellátási lánc pontosabb behatárolásához és részletesebb megismeréséhez a SCOR keretmodell harmadik szintjén található folyamatelemeket használhatjuk (2.1-2.8 táblázat).

2.3 A termőföldeken végrehajtandó SCOR ellátási folyamatok

Az alábbiakban a termőföldeken (termelés helyszínén) releváns folyamatkategoriókat fejtem ki a SCOR folyamatlemei segítségével.

| Termőföldek (termelés helyszíne) | |
|--|--|
| sS2 – Megrendelésre termelt termékhez beszerzés (Source Make-to-Order Product) | |
| A biomassa termeléshez felhasznált alapanyagok, eszközök, erőforrások beszerzésének vizsgálata nem képezi részét jelen dolgozatnak, ezért folyamatlemeit sem mutatom be. | |

2.1 táblázat SCOR folyamatok: Termőföldek – Beszerzés

| Termőföldek (termelés helyszíne) | |
|---|---|
| sM2 – Megrendelésre termelés (Make-to-Order) | A biomassa termelése jellemzően hosszú távú szerződések alapján, azaz megrendelésre történik. A megrendelés és annak teljesítése között azonban számottevő idő telik el. |
| sM2.1 – Termelés ütemezése (Schedule Production Activities) | A termelés ütemezése ökológiai és természetstechnológiai tényezők által meghatározott. |
| sM2.2 – Anyagok kiadása (Issue Sourced/ In-Process Product) | Ez a folyamatlem a termeléshez szükséges alapanyagok, eszközök és erőforrások raktárból való kiadását, előkészítését és a felhasználás helyére történő mozgását jelenti. |
| sM2.3 – Termelés és tesztelés (Produce and Test) | Ezen folyamatlem során a biomassa termelése és betakarítása történik meg. A betakarítási tevékenység kritikus költség tényező a biomassa ellátási láncban. A mezőgazdasági melléktermékek (például gabonaszalma) egy- és többmenetű betakarításának jellemzőiről bővebben Miao és mtsai (2012) tanulmányában olvashat az érdeklődő. Melléktermékek betakarítása kapcsán nem tisztázott még, hogy annak mekkora részét érdemes a termőföldön hagyni a megfelelő tápanyag-utánpótlás biztosítása érdekében. A vonatkozó szakirodalmi esettanulmányokban a rendelkezésre álló biomassa 25-50%-át hasznosítják energetikai célból (Perrin és mtsai 2012). A melléktermékek hozamát illetően kevés empirikus adattal rendelkezünk, ugyanis azt korábban nem mérték közvetlenül. A mennyiség becslése tipikusan a főtermék hozama alapján történik (Sokhansanj és Hess 2009). |
| sM2.4 – Csomagolás (Package) | A betakarított biomasszát bálázzák. A kockabálák előnye, hogy hatékonyabb helykihasználást tesznek lehetővé, viszont tárolásuk költségesebb: mivel a csapadékot magukba engedik, ezért fennáll a gombásodás és öngyulladás veszélye, melynek megelőzése |

| | |
|---|---|
| | érdekében fedett tároló vagy műanyag csomagolás alkalmazása szükséges. A körbálák kapcsán ezen kockázatok nem jelennek meg, itt szabad ég alatti tárolásra is lehetőség van. |
| sM2.5 – Termék elhelyezése (Stage Finished Product) | A bálák általában a termőföld szélén kerülnek elhelyezésre (on-site storage). A biomassza tárolása (szántóföldön, depóban) során számottevő szárazanyag-veszteséggel számolhatunk, aminek mértéke függ a tárolás módjától (például fedett vagy szabadtéri), az eredeti nedvességtartalomtól, a bálák fizikai elrendezésétől, a tárolás időtartamától, stb.: ideális esetben 1-2%, míg extrém körülmények mellett akár 40% veszteség is bekövetkezhet (Sokhansanj és Hess 2009). |
| sM2.6 – Termék kiadása kiszállításhoz (Release Finished Product to Deliver) | A bálák kiszállítása előtt szükség lehet azok nedvességtartalmának ellenőrzésére. A száraz biomassza (pl. gabonaszalma, kukoricaszár) nedvességtartalma 15-20%, ami további szárítás nélkül is alkalmas az erőművi tüzelésre (Sokhansanj és Hess 2009). |
| sM2.7 – Hulladékhasznosítás (Waste Disposal) | A termelés során nem jelentkezik számottevő hulladék, a termőföldön hagyott mezőgazdasági melléktermék beszántásra kerül. |

2.2 táblázat SCOR folyamatlemlék: Termőföldek – Előállítás

A dolgozatban modellezett döntési szituációk során feltesszük, hogy a biomassza betakarítása már megtörtént, a tervezési időszak alatt felhasználni kívánt tüzelési alapanyag rendelkezésre áll a termőföldeken, tehát az sM2.5 – Termék elhelyezése folyamatlemléktől vizsgáljuk az ellátási láncot.

| Termőföldek (termelés helyszíne) | |
|--|--|
| sD2 – Megrendelésre termelt termék kiszállítása (Deliver Make-to-Order Product) | Alapesetben a termelők (vagy helyi szolgáltatók) által történik meg a tüzelőanyag bálák depókba szállítása kiskapacitású járművek segítségével (a termőföldek és depók közötti távolság nem haladhatja meg a néhány kilométert). Amennyiben a termőföldön elhelyezett bálák megközelíthetők nagyméretű járművekkel, és gazdaságosan kiépíthető az azokat kiszolgáló infrastruktúra is, akkor a depóba szállítás csak adminisztratív tevékenységként jelentkezik. |
| sD2.1 – Információ- és ajánlatkérések kezelése (Process Inquiry and Quote) | Az ajánlatkérések kezelése a biofeldolgozóval megkötött hosszú távú szerződés aláírása előtt jelentkező folyamatlemlék, a tüzelőanyag árazására vonatkozó szabályokat is ezen szerződésben rögzítik. |
| sD2.2 – Megrendelések kezelése (Receive, Configure, Enter and Validate Order) | Az előző ponttal összhangban – a teljesítés időbeli szétterülése miatt – nem megrendelések, hanem szállításra vonatkozó igények kezelése történik meg ezen folyamatlemlék során az üzemeltetés fázisában. |
| sD2.3 – Készlet lekötése és a szállítás időpontjának meghatározása (Reserve Inventory and Determine Delivery Date) | A későbbiekben bemutatandó okok miatt jellemzően húzó rendszerű anyagáramlás alkalmazására kerül sor, ahol a felhasználók határozzák meg a szállítás időpontját, vagy legalábbis azt az időablakot, amikor a bálának a depóba szállítása megtörténhet. A szállításütemezést végző egységnek naprakész információkkal kell rendelkeznie a termőföldeken rendelkezésre álló alapanyag mennyiségéről. |
| sD2.4 – Megrendelés konszolidáció (Consolidate Orders) | Mivel a termőföldeken előállított végtermék (biomassza bálák) kiszállításának komplexitása elmarad egy átlagos ipari termelőnél tapasztalható összetettségtől, így több SCOR folyamatlemlékre is igaz lesz, hogy vizsgálatunk szempontjából irrelevánsak. Mivel az általunk vizsgált egytermékes biomassza ellátási láncban minden termelőre igaz, hogy csak egyetlen depónak szállít tüzelőanyagot, ezért ez a folyamatlemlék itt nem releváns. |
| sD2.5 – Rakományok összeállítása (Build Loads) | A dolgozatban vizsgált ellátási láncban csak közúton folyik tüzelőanyag-szállítás, így a különböző méretű közúti járművek számára történik meg a rakományok összeállítása. |
| sD2.6 – Útvonaltervezés (Route Shipments) | Mivel a termőföldeken rendelkezésre álló biomassza mennyisége jelentősen meghaladja a szállító járművek kapacitását, ezért nincs szükség arra, hogy egy fuvar keretében a járművek több termőföldet |

| | |
|---|--|
| | is meglátogassanak: egy fuvar során mindig az adott termőföld és a hozzá legközelebbi depó között történik anyagmozgatás, ami a rövid távolság miatt általában csak egyetlen útvonalon lehetséges. Ha több megközelítési útvonal is létezik, akkor a legrövidebb/leggyorsabb szabad útvonalat kell választani. |
| sD2.7 – Fuvarozók kiválasztása és költségkalkuláció (Select Carriers and Rate Shipments) | A depóba szállítást vagy a termelő végzi saját eszközeivel, vagy helyi szolgáltató bevonására kerül sor, az aktuálisan rendelkezésre álló kapacitások függvényében. A földrajzilag szétszórta, rövid távú szállítási igények központi szolgáltató általi kielégítése nem tűnik hatékony megoldásnak. |
| sD2.8 – Termékek átvétele a termelési, beszerzési funkciótól (Receive Product from Source or Make) | Jelen folyamatelem megegyezik az Előállítás (Make) folyamatkategóriánál megjelenített „sM2.6 – Termék kiadása kiszállításhoz” folyamatelemmel, csupán a szállítás szemszögéből tekintve arra (nem válik szét a késztermékraktár, a csomagolási tér és a rakodási terület). |
| sD2.9 – Kommissiózás (Pick Product) | Mivel egytermékes ellátási láncot vizsgálunk, így a kommissiózás nem releváns tevékenység. |
| sD2.10 – Termékek csomagolása (Pack Product) | A betakarítás során elkészített bálák nem kapnak újabb csomagolást a szállításhoz, így ezen folyamatelem sem jelenik meg az ellátási lánc tevékenységei között. |
| sD2.11 – Rakodás és szállítási dokumentáció elkészítése (Load Product & Generate Shipping Docs) | A depókba történő kiszállításhoz megtörténik a járművekre rakodás és a szállítási dokumentációk elkészítése. |
| sD2.12 – Termék kiszállítása (Ship Product) | Megtörténik a bálák kiszállítása az ellátási lánc következő helyszínére, a depókba. |
| sD2.13 – Termék fogadása és ellenőrzése a vevőnél (Receive and Verify Product by Customer) | A depóknál megtörténik a bálák átvétele és mennyiségi ellenőrzése. |
| sD2.14 – Termék installálása (Install Product) | Jelen folyamatelem nem releváns. |
| sD2.15 – Számlázás (Invoice) | A számlázás a gyakorlatban csak a tüzelőanyag erőművi átvétele után történik meg. |

2.3 táblázat SCOR folyamatelemek: Termőföldek – Kiszállítás

A fentieket összefoglalva azt mondhatjuk, hogy a releváns folyamatelemek közé a szállítási igények átvétele és az arra történő reagálás, azaz a szállítási időpont és útvonal meghatározása, valamint maga a kiszállítás tartoznak.

2.4 A depókban végrehajtandó SCOR ellátási folyamatelemek

Az alábbiakban a depók (átrakodás helyszíne) folyamatkategóriáinak kifejtése történik meg a SCOR folyamatelemei segítségével.

| Depók (átrakodás helyszíne) | |
|---|--|
| sS2 – Megrendelésre termelt termékhez beszerzés (Source Make-to-Order Product) | Jelen táblázatban azon beszerzési folyamatelemek kerülnek bemutatásra, melyeket a depóknak kell végrehajtaniuk, hogy az erőműtől érkező szállítási igényeket ki tudják elégíteni. |
| sS2.1 – Beszerzések ütemezése (Schedule Product Deliveries) | Mivel a depók kapacitása nem elegendő a kapcsolódó termőföldeken megtermelt biomassza teljes mennyiségének tárolására, ezért az erőműtől érkező szállítási igények időben és minimális költséggel történő teljesítéséhez ütemezni szükséges a termőföldekről történő beszállítások is. Ezen döntési szituációval részletesen nem foglalkozom a dolgozatban, egy egyszerű – a depókból történő kiszállításra épülő – feltöltési szabályt fogalmazok csak meg. |

| | |
|--|---|
| sS2.2 – Termékek átvétele (Receive Product) | Ez a folyamatem megegyezik a termőföldek esetén bemutatott „sD2.13 – Termék fogadása és ellenőrzése a vevőnél” folyamatellel. |
| sS2.3 – Termékek ellenőrzése (Verify Product) | A depóknál megtörténik a bálák mennyiségi és minőségi ellenőrzése. |
| sS2.4 – Termékek átrakása (Transfer Product) | A beérkezett bálákat a depó megfelelő helyére rakják, egyéb műveletek végrehajtására nincs szükség. |
| sS2.5 – Fizetési jóváhagyás (Authorize Supplier Payment) | A tényleges fizetési jóváhagyás az erőművi beszállítás után történik meg. |

2.4 táblázat SCOR folyamatok: Depók – Beszerzés

A depókban nem történik termelési, átalakítási folyamat, így az Előállítás folyamatkategória elemei sem jelennek meg.

| Depók (átrakódás helyszíne) | |
|--|--|
| sD2 – Megrendelésre termelt termék kiszállítása (Deliver Make-to-Order Product) | A dolgozat fókuszát jelentő folyamatkategória kifejtését tartalmazza jelen táblázat. Érdemes megjegyezni, hogy ezen szállításiütemezési döntéseket nem a depóknál, hanem az erőműnél hozzák meg. A termőföldről a depókba történő szállításhoz hasonlóan, számos SCOR folyamatem irreleváns lesz az ellátási lánc ezen szakaszában. |
| sD2.1 – Információ- és ajánlatkérések kezelése (Process Inquiry and Quote) | Ez a folyamatem nem releváns. |
| sD2.2 – Megrendelések kezelése (Receive, Configure, Enter and Validate Order) | Nem megrendelések, hanem szállításra vonatkozó igények kezelése történik meg ezen folyamatem során. |
| sD2.3 – Készlet lekötése és a szállítás időpontjának meghatározása (Reserve Inventory and Determine Delivery Date) | A későbbiekben bemutatandó okok miatt jellemzően húzó rendszerű anyagáramlás alkalmazására kerül sor, ahol az erőmű határozza meg a szállítás időpontját. Az alapanyag-termelőknek ezen szállítási időpontra kell ellátniuk a depót a szükséges mennyiségű biomasszával. |
| sD2.4 – Megrendelés konszolidáció (Consolidate Orders) | Ez a folyamatem nem releváns. |
| sD2.5 – Rakományok összeállítása (Build Loads) | A vizsgált ellátási láncban csak közúton történik tüzelőanyag-kiszállítás, valamint törekedni kell egy homogén, ezen feladatra specializált és dedikált járműflotta kialakítására (Ravula és mtsai 2008a). Ezen szállító járművekhez szükséges a rakományok összeállítása. |
| sD2.6 – Útvonaltervezés (Route Shipments) | Mivel a depókban rendelkezésre álló biomassza mennyisége jelentősen meghaladja a szállító járművek kapacitását, ezért nincs szükség arra, hogy egy fuvar keretében a járművek több depót is meglátogassanak: egy fuvar során az adott depó és az erőmű között történik anyagmozgatás. Ha több megközelítési útvonal is létezik, akkor elsődleges szabályként a legrövidebb/leggyorsabb szabad útvonalat kell választani. |
| sD2.7 – Fuvarozók kiválasztása és költségkalkuláció (Select Carriers and Rate Shipments) | A hosszú távú termeltetési szerződések mellett hosszú távú szállítási szerződések szükségesek az ellátási lánc hatékony működtetéséhez. Ennek megfelelően jelen folyamatem a fuvarozási szerződés megkötése előtt releváns. |
| sD2.8 – Termékek átvétele a termelési, beszerzési funkciótól (Receive Product from Source or Make) | Ez a folyamatem nem releváns. |
| sD2.9 – Kommissiózás (Pick Product) | Ez a folyamatem nem releváns. |
| sD2.10 – Termékek csomagolása | Ez a folyamatem nem releváns. |

| | |
|---|--|
| (Pack Product) | |
| sD2.11 – Rakodás és szállítási dokumentáció elkészítése (Load Product & Generate Shipping Docs) | Az erőműbe irányuló kiszállításhoz megtörténik a járművek megrakása és a szállítási dokumentációk elkészítése. Mivel a termőföldek és így a depók is szétszórtnak helyezkednek el földrajzilag, ezért a rakodó eszközök depók közötti mozgatása releváns ütemezési feladatként jelentkezik (a rakodók mozgatása számottevően alacsonyabb költséggel jár, mint addicionális beszerzésük). |
| sD2.12 – Termék kiszállítása (Ship Product) | Megtörténik a bálák kiszállítása az ellátási lánc következő helyszínére, az erőműbe. |
| sD2.13 – Termék fogadása és ellenőrzése a vevőnél (Receive and Verify Product by Customer) | Az erőműnél megtörténik a bálák átvétele és ellenőrzése. |
| sD2.14 – Termék installálása (Install Product) | Ez a folyamat nem releváns. |
| sD2.15 – Számlázás (Invoice) | A teljesítés vevő általi igazolása után megtörténhet a számlázás (esetleg időszakos számlázás). |

2.5 táblázat SCOR folyamatok: Depók – Kiszállítás

A fentieket összefoglalva – hasonlóan a termőföldről a depókba történő szállításhoz – azt mondhatjuk, hogy a releváns folyamatok közé az – akár ütemezéssel és útvonaltervvel ellátott – szállítási igények átvétele és az arra történő reagálás, azaz maga a szállítás tartoznak.

2.5 Az erőműben végrehajtandó SCOR ellátási folyamatok

Az alábbiakban az erőmű (tüzelés helyszíne) folyamatkategorióit fejtem ki a SCOR folyamatok segítségével.

| Erőmű (tüzelés helyszíne) | |
|---|--|
| sS2 – Megrendelésre termelt termékhez beszerzés (Source Make-to-Order Product) | Jelen folyamatos az erőmű tüzelőanyag beszerzési folyamatait mutatja be. Az erőmű fő tevékenysége (villamosenergia-termelés) folyamatos termelési rendszerben működik, ami folyamatos tüzelőanyag ellátást tesz szükségessé. |
| sS2.1 – Beszerzések ütemezése (Schedule Product Deliveries) | Mivel az erőmű számára jelentős veszteséget okoz, ha a folyamatos áramtermelés megszakad, ezért egyik legfontosabb feladata a tüzelőanyag-hiány elkerülése. Másrészt, az alapanyag-ellátást költséghatékony módon szükséges végezni. Többek között ezen célkitűzésekre is figyelemmel kell lenni a beszállítási ütemtervek elkészítésekor. |
| sS2.2 – Termékek átvétele (Receive Product) | Ez a folyamat megegyezik a depók esetén bemutatott „sD2.13 – Termék fogadása és ellenőrzése a vevőnél” folyamattal. |
| sS2.3 – Termékek ellenőrzése (Verify Product) | Az erőműnél megtörténik a bálák mennyiségi és minőségi ellenőrzése, a rakomány tömegének és nedvességtartalmának mérése. |
| sS2.4 – Termékek átrakása (Transfer Product) | A beérkezett bálákat az erőmű által üzemeltetett raktár(ak)ban (at-plant storage) vagy közvetlenül a kazánt tápláló futószalagon helyezik el. Mivel a lágyszárú biomassza energiasűrűsége (egységnyi térfogatra eső energiatartalom) rendkívül alacsony, ezért jelentős alapterületű tárolókapacitás fenntartására van szükség. Ez megkövetelheti több – a kazántól különböző távolságra lévő – raktár kialakítását is. A bálák járműről való lerakódása targoncák vagy hídarak segítségével történik. |
| sS2.5 – Fizetési jóváhagyás (Authorize Supplier Payment) | A tényleges fizetési jóváhagyás az igazolt erőművi beszállítás után történik meg. |

2.6 táblázat SCOR folyamatok: Erőmű – Beszerzés

A tüzelőanyag átvételével a külső logisztikai tevékenységek véget érnek. A következő táblázatban az erőmű releváns belső logisztikai és termelési folyamatai kerülnek bemutatásra.

| Erőmű (tüzelés helyszíne) | |
|---|---|
| sM2 – Megrendelésre termelés (Make-to-Order) | A villamos energia termelése hosszú távú átvételi szerződések alapján történik, amihez – megfelelő kereslet esetén – kapcsolt hőtermelés is társul. |
| sM2.1 – Termelés ütemezése (Schedule Production Activities) | Az áramtermelés alapvetően folyamatos termelési rendszerben működik, a tüzelőanyagok felhasználásának ütemezése szolgáltatja a húzó rendszerű anyagáramlás számára a keresleti értékeket. |
| sM2.2 – Anyagok kiadása (Issue Sourced/ In-Process Product) | A raktárban általában híddaru segítségével helyezik a bálákat az adagoló futószalagra. Több raktár esetén raktárközi anyagmozgatás is történhet. |
| sM2.3 – Termelés és tesztelés (Produce and Test) | A bálák adagolása futószalagos rendszerben folyik, ahol megtörténik a bálák automatikus bontása, kazánba táplálása, majd a villamos energia és kapcsolt hő termelése. |
| sM2.4 – Csomagolás (Package) | Ez a folyamat elem nem releváns. |
| sM2.5 – Termék elhelyezése (Stage Finished Product) | A megtermelt áram és hő átalakítás nélkül nem tárolható, azokat azonnal a megfelelő hálózatokba táplálják. |
| sM2.6 – Termék kiadása szállításhoz (Release Finished Product to Deliver) | Ez a folyamat elem nem releváns. |
| sM2.7 – Hulladékhasznosítás (Waste Disposal) | A biomassza alapú energiatermelés legjelentősebb mellékterméke a hamu, mely szerepet kap a termőföldek tápanyag-utánpótlásában. Azonban meg kell említeni, hogy a nagy mennyiségben keletkező hamu hasznosítása, kezelése, ártalmatlanítása nem minden esetben megoldott még. |

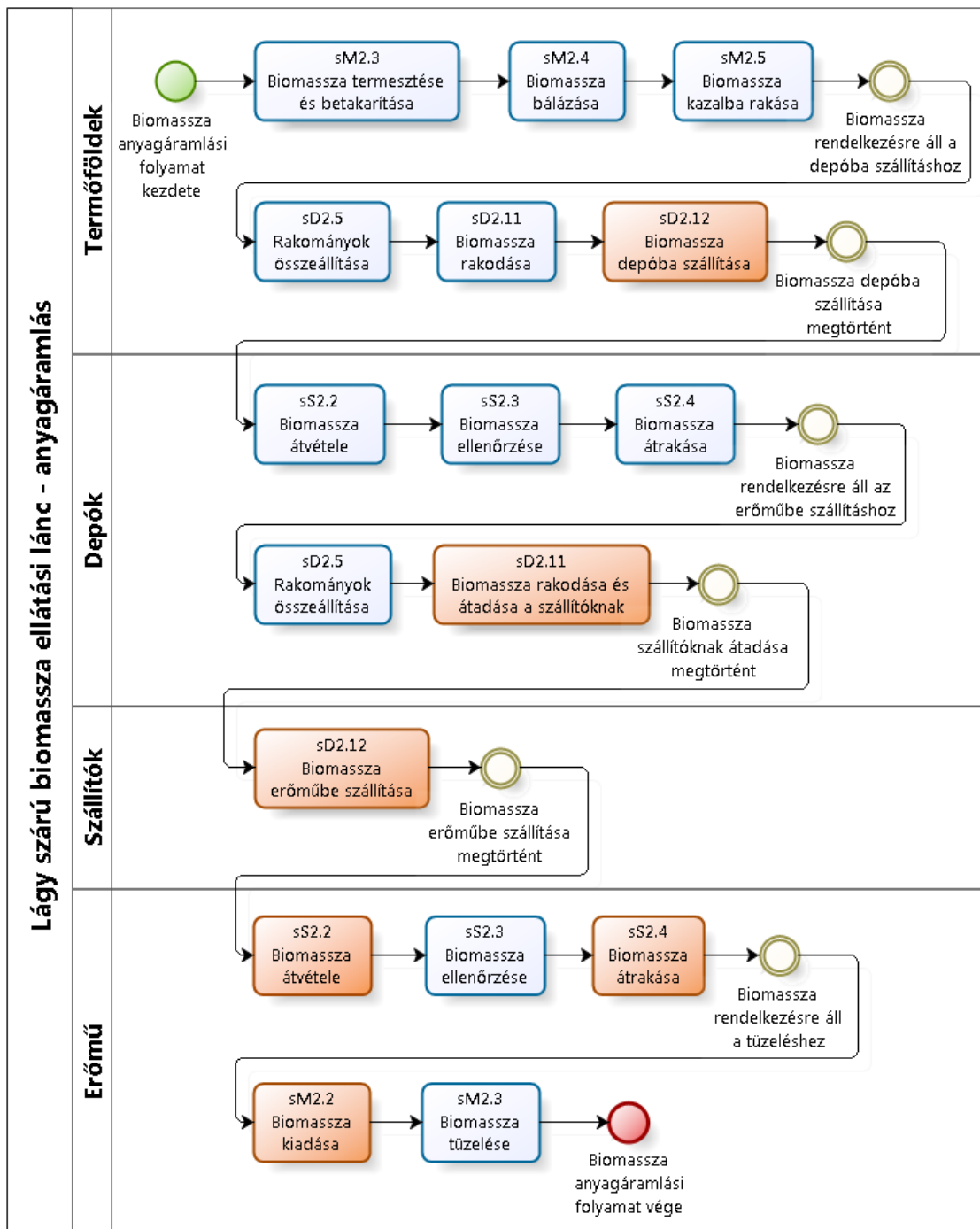
2.7 táblázat SCOR folyamatok: Erőmű – Előállítás

A dolgozatban elemzett rész-ellátási lánc az energiatermelési folyamat elemmel (sM2.3 – Termelés és tesztelés) fejeződik be.

| Erőmű (tüzelés helyszíne) |
|--|
| sD2 – Megrendelésre termelt termék szállítása (Deliver Make-to-Order Product) |
| A termelt villamos energia és kapcsolt hőenergia szállítása és további felhasználása már nem képezi részét az elemzett ellátási lánc szakasznak. |

2.8 táblázat SCOR folyamatok: Erőmű – Kiszállítás

A LBEL fő szereplőit és az anyagáramlást leíró folyamat elemeket foglalja össze – és teszi áttekinthetőbbé – az alábbi BPMN folyamatleíró ábra (2.4 ábra), mely a SCOR folyamat kategóriáival készített ellátási lánc illusztráció (ld. 2.3 ábra) kifejtésének tekinthető. A depók és az erőmű közötti anyagmozgatást végző szállítókat – kiemelt szerepük miatt – külön sávban jelenítettem meg.



2.4 ábra A lágy szárú biomassza ellátási lánc anyagáramlása

A fenti táblázatok azon folyamatokat tartalmazzák, melyek az ellátási lánc operatív működését modellezik. Közöttük megtalálhatók azok a – rövid távra szóló – döntések is, melyeket az operatív működés kivitelezése érdekében kell meghozni (például tevékenységek ütemezése, útvonaltervezés, fuvarozók kiválasztása az aktuális szállítási feladatokhoz). Közülük az alábbiakkal foglalkozom dolgozatomban (a fenti ábrán külön színnel jelöltem a releváns döntések által érintett anyagáramlási folyamatokat):

- A depók feltöltési szabálya az erőműbe történő kiszállítások ütemtervét alapul véve

- A depókból az erőmű raktáraiba történő alapanyag-szállítás és a szállító járművek ütemezése
- Az erőmű raktárközi anyagmozgatásának ütemezése

A fenti – „elsődleges” – döntések meghozatala egyszersmind determinálja vagy magában foglalja az alábbi tervek megszületését is:

- Az alkalmazott szállító járművek száma naponta
- Az alkalmazott rakodó eszközök száma naponta a depókban
- Az alkalmazott rakodó eszközök száma naponta az erőmű raktáraiban
- A rakodó eszközök napon belüli ütemezése az egyes depókban
- A rakodó eszközök napon belüli ütemezése az erőmű raktáraiban
- A napvégi készletek nagysága az erőmű egyes raktáraiban

2.6 Tervezés és Támogatás SCOR folyamatlemek

A Tervezés (Plan) folyamatlemek alapvető célja, hogy megteremtsék a teljes ellátási lánc – adott szervezetre eső része – esetén, valamint a szervezetek három ellátási folyamat típusán (Beszerzés, Előállítás, Kiszállítás) belül a kereslet és kínálat egyensúlyát. Ezen feladatok végrehajtása alapvetően aggregált tervezési eszközöket igényel és eredménye hosszabb időtávra szól. Az erőmű tevékenysége kapcsán például meg kell teremteni a villamosenergia-kereslet és a termőföldek/depók tüzelőanyag kínálata – mint alapvető erőforrás – közötti egyensúlyt.

Dolgozatomban minimális mértékben foglalkozom csak a Tervezés folyamatlemek kapcsán megjelenő feladatokkal. Nagyrészt felteszem, hogy az ellátási lánc hálózata megfelelő módon kiépített, az egyes csomópontok rendelkeznek a szükséges kapacitásokkal, erőforrásokkal. Ez alól csak azon elemek képeznek kivételt, melyek a fentiekben bemutatott – és a dolgozat magját alkotó – operatív ütemezési döntések eredményein alapulnak. Ahogy Aytug és mtsai (2005) megállapították: a részletes ütemezések készítésének célja gyakran a kapacitástervezés támogatása, a kapacitástervek verifikálása. Az alábbi változók értékének meghatározása dolgozatomban részét képezi:

- A depók és az erőmű közötti alapanyag-mozgatást lebonyolító
 - dedikált szállító jármű-flotta mérete
 - dedikált fel- és lerakodó eszközpark mérete
- Az erőmű raktárainak kapacitása

A SCOR folyamatmodelljében az öt folyamat típus (Tervezés, Beszerzés, Előállítás, Kiszállítás, Visszárú) mindegyikéhez kapcsolódnak Támogatás (Enable) folyamatlemek. A folyamatmodell 9.0-s verziójában (SCC 2008) olvasható definíció szerint szerepük, hogy előállítsák és menedzseljék a tervezési és elosztási folyamatlemek által felhasznált információkat, valamint kapcsolatrendszeret. Az egyes folyamat típusokhoz hasonló támogató folyamatlemek tartoznak, melyek közül négy kapcsolódik jelen dolgozat tárgyához:

- Teljesítménymenedzsment: a teljes ellátási lánc és komponensei teljesítményének menedzsmentje (sEP.2 – Manage Performance of Supply Chain).
- Információmenedzsment: a teljes ellátási láncra és annak komponenseire vonatkozó információk gyűjtése, feldolgozása, szolgáltatása (sEP.3 – Manage PLAN Data Collection).

- Készletgazdálkodás: a teljes ellátási láncra és annak komponenseire vonatkozó stratégiai készletgazdálkodási döntések meghozatala (sEP.4 – Manage Integrated Supply Chain Inventory).
- Kockázatmenedzsment: a teljes ellátási lánchoz és annak komponenseihez kapcsolódó kockázatok felmérése, értékelése és mérséklési stratégiák kidolgozása (sEP.9 – Manage Supply Chain Plan Risk).

A teljesítmény és kockázatmenedzsment kérdéskörével bővebben foglalkozom a lágyszárú biomassza ellátási láncról elvárt stratégiai képességek feltérképezése, valamint a szállításiütemezési modellek kidolgozása során. Az erőmű készletezési kérdései az optimalizáló modellek során jelennek meg (például biztonsági készlet szint meghatározása). A szállításiütemezéshez kötődő információmenedzsment kapcsán integrált információs rendszerre vonatkozó ajánlást fogalmazok meg röviden. Az ajánlott informatikai rendszer felépítéséről bővebb leírás Szendrői és Torjai (2008) tanulmányában található.

A fentiekben kijelöltem azon döntések körét, melyekkel részletesen foglalkozom dolgozatomban. Annak érdekében, hogy precízen elhelyezhessem ezeket a lágyszárú biomassza ellátási láncok döntési hierarchiájában, valamint hogy összegyűjtssem a területen született tudományos eredményeket, átfogó irodalomkutatást végeztem. Ennek során a biomassza ellátási láncok tervezéséhez és üzemeltetéséhez kapcsolódó döntési, döntéstámogató modellekre koncentráltam. Általános tapasztalatom, hogy hiányzik egy explicit módon felrajzolt és széles körben elfogadott döntési szituáció hierarchia, ami megnehezíti a tanulmányok rendszerezését, és a – publikációkon keresztül megvalósuló – „valódi tudományos párbeszéd” kialakulását. Ezen hiányosság pótlása is célom volt az ellátási lánc menedzsmentre vonatkozó döntési szituációk rendszerbe foglalásával, melyet a következő fejezetben mutatok be.

3 Biomassza ellátási lánc döntési hierarchia és döntési modellek

Jelen fejezet két logikai blokkra bontható. Az első alfejezetben bemutatom azt a döntési hierarchiát, mely a biomassza ellátási láncok menedzsmentjéhez kapcsolódó döntéseket foglalja magában. Ennek segítségével a jelen dolgozatban vizsgált döntési szituációk elhelyezhetők a teljes döntéshozatali folyamatban, valamint a döntési hierarchia egy logikai vázat is nyújt a releváns irodalom feldolgozásához, rendszerezéséhez. A fejezet nagyobb részében ezen irodalomfeldolgozás eredményeit mutatom be, a több energiaforrást integráltan hasznosító energetikai rendszerek döntéstámogató modelljeitől a biomasszát szállító járművek ütemezéséig.

3.1 A biomassza ellátási lánc döntési hierarchiája

A piaci verseny érzékelhető fokozódása, valamint az információs technológiák és kvantitatív döntéstámogató módszerek fejlődése két, látszólag ellentétes irányú kutatási vonal erősödését is motiválta:

1. Döntési modellek hatáskörének kiterjesztése, több döntési szituáció integrált, egyetlen döntési modellben történő megoldása (Munoz és mtsai 2012).
2. Egyes döntési szituációk szofisztikáltabb modellezése, ami együtt jár azok szétbontásával, több döntési modellbe rendezésével.

Végeredményben mindkét irányvonal hozzájárul ahhoz, hogy az ellátási láncok eredményes irányításához kialakulhasson egy részletes, és egyes elemeit erősen integráló döntési hierarchia. A fenti irányvonalakhoz kapcsolódóan több – részben átfedő – modellezési részterület is született.

Az Integrált Ellátási Lánc Menedzsment (Integrated Supply Chain Management – ISCM) három dimenzió mentén törekszik a döntéshozatal összekapcsolására:

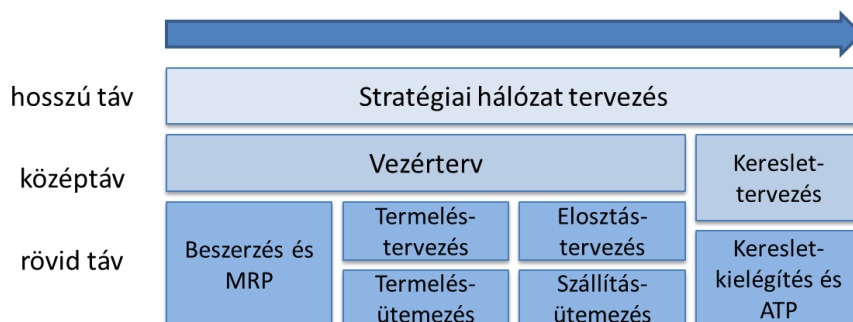
- földrajzilag elkülönülő telephelyek, szervezetek,
- döntéshozatal hierarchikus szintjei (stratégiai, taktikai és operatív),
- funkcionális területek (például termelés, marketing, pénzügy).

Laínez és Puigjaner (2012) adtak irodalmi áttekintést az elmélet vegyipari alkalmazásairól, néhány bekezdést a biomassza ellátási láncoknak is szentelve.

Hasonló célokat fogalmaz meg a Vállalati szintű Optimalizálás (Enterprise-Wide Optimization – EWO) területe is, a termékfejlesztési, beszerzési, átalakítási és kiszállítási döntések integrált optimalizálása által (egyres szerzők ekvivalensnek tekintik az ISCM és az EWO területét). Grossmass (2012) matematikai programozási technikák mentén foglalta össze az EWO irodalmát, ahol az integrált modellek kezelése gyakran dekompozíciós technikák segítségével történik meg. A négy leggyakoribb megközelítésmód: Lagrange, Benders és bi-level dekompozíció, valamint a gördülő tervezési horizont (rolling horizon) technika, ahol a közeli tervezési periódusokra egy részletes, míg a távolabbiakra egy elnagyolt, aggregált döntési modellt alkalmaznak.

Érdeemes megemlíteni, hogy ezen kutatási irányok leginkább a folyamaterlvű iparágakra (process industries – például vegyipar, élelmiszeripar, energetika, gyógyszeripar) jellemzők. A folyamaterlvű iparágakra vonatkozó ellátási lánc optimalizálás fejlődési trendjeiről Papageorgiou (2009) és Barbosa-Póvoa (2012) adtak összegzést, utóbbi tanulmányban külön kitérve a biomasszára épülő és egyéb energetikai ellátási láncokra. A szerző kiemeli, hogy míg a stratégiai és taktikai szintű döntések viszonylag jól integráltak, addig ezek összekapcsolása az operatív döntésekkel további kutatásokat igényel.

A komplex döntési modellek kisebb, kevésbé összetett modulokra bontásával a Hax és Meal (1975) által bevezetett Hierarchikus Termelés-tervezés (Hierarchical Production Planning – HPP) foglalkozik. Itt a szétbontott, hierarchikusan sorba rendezett, általában különböző tervezési időszakra vonatkozó modulok szekvenciális optimalizálásával oldjuk meg az eredeti feladatot. A felsőbb szintű döntési modellek rögzített korlátokat szolgáltatnak az alacsonyabb szintűeknek, amik viszont visszacsatolást adnak a korábbi döntések felülvizsgálatához. A hierarchikus tervezés elméletén alapuló informatikai alkalmazásokat hívják Fejlett Tervezési Rendszereknek (Advanced Planning Systems vagy Advanced Planning and Scheduling Systems – APS). Ezek egy lehetséges felépítését, az egyes tervezési modulok kapcsolatát mutatja be a 3.1 ábra, melyről Stadtler (2005) ad bővebb leírást. Hvolby és Steger-Jensen (2010) áttekintették az APS rendszerek fejlődését, az anyagigény-tervezéstől (MRP) a vállalatirányítási rendszerekbe (ERP) integrált APS-ig.



3.1 ábra Az ellátási lánc tervezési mátrix Meyr és mtsai (2002) alapján

Az eddig bemutatott áttekintő tanulmányok mindegyike megalkot egy döntési hierarchiát (például ld. 3.1 ábra), melyek eltérhetnek részletességük és fókuszuk szerint. Biomassza ellátási láncok (pontosabban hulladék biomassza ellátási láncok – Waste Biomass SC) kapcsán Iakovou és mtsai (2010) mutattak be először egy döntési szituáció taxonómiát, stratégia és taktikai-operatív kategóriákba sorolva azokat. További, biomassza ellátási láncokra fókuszáló döntési hierarchia leírások találhatók Sharma és mtsai (2013), Meyer és mtsai (2014), valamint Awudu és Zhang (2012) tanulmányaiban. Általános kritikaként fogalmazható meg azonban, hogy egyrészt, ezen hierarchiák nem tekinthetők teljesnek, azaz nem tartalmazznak minden lényeges döntési szituációt, másrészt, nem egyértelmű a döntési problémák, célok és kritériumok szétválasztása. A 3.2 ábrán az általam megalkotott döntési hierarchia látható, ahol minden egyes döntési szituációhoz megadtam annak elvárt eredményét is.

| Döntési szituáció | Elvárt eredmény | Megjegyzés | |
|---|--|---|-----------------------------------|
| 0. Termékszerkezet | Az ellátási lánc termékeinek specifikációja | | Absztrakt/logikai hálózattervezés |
| 1. Energiaforrás előválogatás | Alkalmazható energiaforrások halmaza | | |
| 2. Technológia előválogatás | Alkalmazható folyamategységek/folyamatelemek halmaza | | |
| 3. Folyamatszintézis és tervezés | Folyamatstruktúra (folyamategységek hálózata), mely különböző kémiai, biológiai és fizikai átalakítások segítségével állítja elő az input anyagokból az elvárt termékeket; Kiválasztott energiaforrások és technológiák | A teljes ellátási láncra, valamint annak belső egységeire | |
| 4. Telepítés és kapacitás tervezés (bővítés és leszerelés) | Az ellátási lánc egységeinek földrajzi elhelyezése, anyagáramlási élek kijelölése; Az ellátási lánc egységeinek méretezése, a szállítási és a mobil erőforrások kapacitása a teljes tervezési horizontra | Tervezési periódus: 1-2 év | Fizikai hálózattervezés |
| 5. Szállítási mód választás | Anyagmozgatási módok az ellátási lánc egységek között | | |
| 6. Berendezés és eljárás választás | Kiválasztott és fejlesztett berendezések, eljárások az ellátási lánc egységeinél és a szállításnál | A folyamatos fejlesztés elvét alkalmazva | Létesítmény fejlesztés |
| 7. Elrendezés | Az ellátási lánc egységei belső elrendezése és a belső anyagáramlás | | |
| 8. Aggregált termelés, szállítás- és kereslettervezés | Összehangolt beszerzési, termelési, szállítási, készletezési és kiszállítási kapacitások, valamint aggregált termelési és szállítási mennyiségek termékcsaládonként (beleértve a berendezések és a személyzet kapacitás tervezését is) | Tervezési horizont általában 1-2 év (legalább egy szezonális ciklust átfogva); Tervezési periódus: 1-3 hónap | Aggregált tervezés |
| 9. Biztonsági készlet tervezés | Biztonsági készletszint az ellátási lánc egységeinél | Egy vagy több döntési lépésen keresztül, a legrövidebb tervezési periódust alkalmazva | Részletes tervezés |
| 10. Termelés tervezés és ütemezés | Részletes termelési mennyiségek és erőforrás-hozzárendelés az ellátási lánc minden egyes egységénél | | |
| 11. Beszerzés tervezés és ütemezés | Részletes szállítási mennyiségek a külső forrásból származó anyagokra az ellátási lánc minden egyes egységénél | | |
| 12. Szállítást tervezés és ütemezés, valamint útvonaltervezés | Részletes szállítási mennyiségek és jármű-hozzárendelés az ellátási lánc egységei között | | |
| 13. Mobil erőforrások ütemezése és útvonaltervezése | Mobil erőforrások mozgásának részletes ütemterve az ellátási lánc egységei között | | |
| 14. Személyzet ütemezés | Részletes személyzet ütemezés és feladat hozzárendelés | | |
| 15. Karbantartás-tervezés és ütemezés | A karbantartási tevékenységek részletes ütemterve, erőforrás és személyzet hozzárendeléssel | | |
| Egyéb kapcsolódó döntési szituációk | Outsourcing és beszállító kiválasztás (szerződéskötés), árazás, pénzügyi tervezés, IT kiválasztás, stb. | | |

3.2 ábra Biomassza ellátási lánc döntési hierarchia

A fenti táblázathoz érdemes néhány megjegyzést fűzni:

- A valós üzleti probléma bonyolultságától függően az egyes döntési szituációk továbbonthatók vagy éppen összevonhatók.
- Bár a bemutatott hierarchia egy természetes döntési sorrendet jelenít meg, a gyakorlatban a részletes tervezés gyakran nyújt nélkülözhetetlen információt a hosszabb távra szóló

döntési modellekhez az ellátási lánc operatív teljesítményéről. Ennek következtében a döntéshozatal tényleges folyamata eltérhet a fenti sorrendtől.

- Számos olyan döntés, mint például a toló vagy húzó stratégia közötti választás vagy a készletfeltöltési politika meghatározása nem jelennek meg önállóan, csupán a fenti döntési szituációk részeként: döntési szabályként, korlátozó feltételként szűkíthetik a döntési szituációk lehetséges megoldásainak halmazát, így elsődleges funkciójuk, hogy megkönnyítsék a döntéshozatalt.

Már most érdemes felhívni arra a figyelmet, hogy a fenti döntések meghozatala során konzisztens célrendszer alkalmazására van szükség, azaz az összes döntési modellnek az üzleti és funkcionális (termelési-logisztikai) stratégiában megfogalmazott célok elérését kell támogatnia. A lágyszárú biomassza ellátási láncok kapcsán releváns stratégiai célok, megszerzendő szervezeti képességek körét a 4. fejezetben vizsgálom meg részletesen.

3.2 Irodalomfeldolgozás az energetikai rendszerek modellezése kapcsán

3.2.1 Energetikai rendszerek modellezése – áttekintő tanulmányok

Számos áttekintő tanulmány született az elmúlt években az energetikai rendszerek tervezését támogató, működését leíró és elemző modellekről. Zhou és mtsai (2006) több, mint 250 olyan publikációt találtak és elemeztek, melyekben különböző döntéstudományi módszereket (egycélú és többszemponú döntéshozatal, döntéstámogató rendszerek) alkalmaztak energetikai és környezeti modellekben. Jebaraj és Iniyar (2006) szintetizáló tanulmányukban az energiatervezési, energia kínálat-keresleti, előrejelző, megújuló energetikai, emisszió csökkentési, valamint optimalizáló modelleket tekintették át. Az energetikai ágazat egy gyorsan fejlődő részterülete a decentralizált energetikai rendszerek. Ezzel kapcsolatos modellekre és alkalmazásokra fókuszálva írtak áttekintő tanulmányt Hiremath és mtsai (2007), ahol a decentralizált energetikai rendszerek regionális (országon belüli) szinten értelmezendők. Az optimalizáló, illetve egyéb kvantitatív módszertant alkalmazó modellekből számos esetben szoftver is születik. Connolly és mtsai (2010) több tucat olyan számítógépes eszközt mutattak be, melyek segítségével elemezhetővé válik a megújuló energetikai modulok meglévő energetikai rendszerekbe való illesztésének hatása. A szerzők hét kategóriába sorolták ezen eszközöket: szimulációs eszközök, scenárió elemzés, egyensúlyi modellek, top-down módszerek, bottom-up eszközök, működést optimalizáló és beruházási döntéseket támogató modellek. Banos és mtsai (2011) a megújuló és fenntartható energetikai megoldások kapcsán alkalmazott optimalizáló módszerekről adtak áttekintést, az integrált energetikai rendszerek logikai hálózatának tervezésétől a biofeldolgozók optimális méretezéséig. Mirakyan és De Guio (2013) a városok és régiók integrált energetikai rendszereinek tervezéséhez használható módszereket és eszközöket tekintették át, a tervezési folyamat lépéseivel kapcsolva azokat. Végül, Pfenninger és mtsai (2014) a nemzeti és nemzetközi szintű energiapolitikai modelleket sorolták négy csoportba (optimalizáló, szimulációs, energiapiaci és kvalitatív), majd megadták az ezeket érintő aktuális kihívásokat és lehetséges kutatási irányokat.

3.2.2 Energiaforrások és energiatermelési technológiák többszemponú értékelése

Ezen szakaszban példát hozok egy jól elkülöníthető modellcsaládra, amelyben többszemponú döntéshozatali technikákat alkalmaznak energiaforrások, energiatermelési technológiák értékelésére. Ezen modellek nem lépnek túl a fenti döntési hierarchiában definiált absztrakt

hálózat tervezés keretein, segítségükkel azonban megtörténhet az energiaforrások és technológiák előválogatása.

Afgan és mtsai (2000) egy fenntarthatósági indikátor listát definiáltak energetikai rendszerek értékelésére. Négy fő kritériumot (erőforrás, környezet, társadalom és gazdaság), majd ezeken belül 16 indikátort nevesítettek. Az értékelendő energetikai rendszerek célja egy elképzelt sziget villamosenergia-igényének kielégítése. A négy alternatíva a naperőmű, a szél erőmű, a biomassza- valamint az olaj-tüzelésű erőmű volt. A szerzők által alkalmazott módszer lehetőséget adott arra, hogy az egyes indikátorok fontosságát jelentő súlyokat valószínűségi változóként adják meg. Az alternatívák sorrendjét a standardizált indikátor értékek súlyozott összege alapján állapították meg.

Chatzimouratidis és Pilavachi (2012) tanulmányának célja, hogy döntéstámogató eszközt nyújtson az összes fő – fosszilis, nukleáris és megújuló – erőműtípus többszemponú értékeléséhez. Ehhez PROMETHE II módszertant alkalmaztak 12 fenntarthatósági kritérium és számos, előre definiált súlyrendszer mellett.

Dombi és mtsai (2012) 23 valós projekt elemzésén keresztül értékelték a megújuló energiaforrásokra alapozott technológiák hozzájárulását a környezeti állapot megóvásához, a gazdaság és a társadalom fejlődéséhez. Többszemponú döntési modelljükhez hét kritériumot nevesítettek, majd a hazai szakértői kör véleményét kérték ki a szempontok súlyozásához. Ezen szakértők szerint a technológiák területigénye elsődleges jelentőségű, valamint előnyben részesítendő a helyi jövedelmet termelő beruházások. Modelljük eredményeként azt kapták, hogy a technológiák közül kiemelten támogatandók a nagyobb szél erőmű parkok, a geotermikus távfűtés, valamint a kisléptékű biomassza-tüzelés.

3.2.3 Integrált energetikai rendszerek tervezése

Az integrált energetikai rendszerek együttes optimalizálásának célja, hogy összehangolja a különböző energiaforrások ellátási láncait, ezzel növelve a teljes rendszer hatékonyságát. Az ehhez kidolgozott modellek (például MARKAL/TIMES, MESSAGE (Connolly és mtsai, 2010)) egy része nem adott beruházáshoz kötődik, hanem nemzeti vagy nemzetközi energetikai mérlegek optimalizálását célozza, figyelembe véve a kapcsolódó gazdasági és környezeti hatásokat (folyamatszintézis és aggregált kapacitás tervezés). A részletesebb, lokális modellek ezzel szemben magukban foglalják az energetikai rendszer infrastruktúrájának dinamikus optimalizálását (több időperiódusra szóló expanziós tervek) és figyelembe veszik ezek topológiáját is (folyamatszintézis, telepítés és kapacitás tervezés). Néhány esetben mindez aggregált tervezéssel is kiegészül. Az alábbiakban az 'eTransport' modellt és egy eco-város (eco-town) esettanulmány kapcsán alkalmazott megoldást mutatok be.

A Bakken és mtsai (2007) által kidolgozott 'eTransport' modell célja, hogy egyszerre optimalizálja a többféle energiahordozót alkalmazó lokális (például városi) energetikai rendszerek napon belüli operatív folyamatait és hosszú távú (20-30 év) expanziós terveit. A modell az energetikai rendszer összköltségét (beruházási, üzemeltetési és emissziós költségek) minimalizálja a villamos energia, gáz, fűtés és használati melegvíz keresleti profiljának kielégítése mellett. Az adott földrajzi területre és időszakra megfogalmazott modell kínálati infrastruktúrája a villamos, gáz és távfűtő hálózatot, a cseppfolyós gázt, a biomassza ellátási láncot és a hulladékhasznosítást foglalja magában.

Az operatív modell tervezési időhorizontja 1-3 nap, amihez egy vegyes egészértékű programozási feladatot fogalmaztak meg. A 20-30 éves tervezési horizonttal bíró expanziós modellt dinamikus programozással oldják meg. A modellek egymásba ágyazása a következőképpen történik: a felhasználók által megadott infrastruktúra alternatívákhoz kapcsolódó, éves szintre aggregált működési és emissziós költségek (operatív modell outputja), valamint az alternatívák beruházási költségei jelentik a hosszú távú expanziós modell inputját.

A modellben szereplő döntési változók:

- az energetikai hálózat komponenseinél megjelenő termelési mennyiségek (operatív modell)
- az energetikai hálózat komponensei közötti anyag- és energiaáramlás mennyisége (operatív modell)
- az energetikai hálózat alternatív komponenseinek térbeli telepítése és leszerelése (expanziós modell)

Dyken és mtsai (2010) a biomassza speciális jellemzőit figyelembe véve fejlesztették tovább az 'eTransport' keretrendszert, melynek keretében új komponensek jelentek meg a modellben (pl. szárítás, raktározás). Az új modul fókuszja a különböző biomassza típusok „energiaáramának” egzaktabb követése, ami alapvetően azok volumenétől és nedvességtartalmától függ. Ennek keretében számos, biomassza-specifikus folyamategységet építettek az eredeti modellbe (előfeldolgozás, szárítás, raktározás és szállítás), ugyanis ezek mind befolyásolják az ellátási láncban áramló biomassza volumenét és nedvességtartalmát. További módosításokat igényelt az is, hogy – a villamosenergia-hálózattól eltérően – a biomassza ellátási láncban megjelenő tevékenységek hosszabb távon fejtik ki hatásukat (például passzív szárítás), melyek kezelésére heti részletességű vegyes egészértékű programozási modellt használtak.

A Keirstead és mtsai (2012) által kidolgozott optimalizáló modell célja, hogy – adott földrajzi terület esetén – azonosítsa a minimális költségű integrált energetikai rendszert. A modell illusztrálásához egy brit településre (6 500 lakos, 87 ha) kidolgozott eco-város tanulmányt használtak fel, melynek segítségével alternatív városi (bio-) energetikai rendszereket értékelték. A modellben az importált gáz és villamos energia mellett faaprítékot és erdészeti mellékterméket használtak fel hő- és áramtermelésre. A probléma reprezentációját az ún. erőforrás-technológia hálózat (resource-technology network) adja, ahol az erőforrások bármilyen anyagot vagy energiaáramot jelenthetnek (például gáz, villamos energia, hő, ivóvíz, települési hulladék), míg a technológiák olyan folyamatok, melyek az erőforrások egy input halmazából az erőforrások egy output halmazát állítják elő (például aprító berendezés, kombinált hő- és villamosenergia-termelő egység, távfűtéshez kapcsolódó hőcserélő). A raktározás és szállítás tevékenységek is egy-egy lehetséges technológiatípusként jelennek meg. Az optimalizáló modell fő feltételei az anyagáramlást leíró mérlegegyenletek. A kereslet nagyságát átlagos nyári és téli fogyasztási értékek szolgáltatják, így az 'eTransport' rendszerrel összehasonlítva ez a modell statikusnak tekinthető. A szerzők a vizsgált földrajzi területet zónákra osztották, a technológiai egységek földrajzi telepítése így a zónák közötti választást jelenti. A vegyes egészértékű programozási modellben az alábbi döntési változók jelennek meg:

- az erőforrás import és export helyszíne

- a különböző méretű technológiai alternatívák száma az egyes zónákban (telepítés és méretezés)
- a technológiák üzemeltetési foka (termelési mennyiségek)
- a raktározott és áramló erőforrások mennyisége

Az integrált energetikai rendszerekre vonatkozó megoldások után azon modell típusokra hozok példákat, melyek specifikusan a biomassza ellátási láncok vizsgálatára születtek.

3.3 Irodalomfeldolgozás a biomassza ellátási láncok modellezése kapcsán

3.3.1 Biomassza ellátási láncok modellezése – áttekintő tanulmányok

A bioenergetikai megoldások tervezésével, irányításával foglalkozó cikkek száma folyamatosan növekszik. Több áttekintő tanulmányt is találunk az elmúlt évekből, melyek a biomassza ellátási láncok modellezésére, döntési problémáira fókuszálnak.

An és mtsai (2011) a bioüzemanyag ellátási láncok (folyékony és szilárd alapanyagok) irodalmát összegezték, a döntési szint (stratégiai, taktikai, operatív és integrált) valamint az ellátási lánc elemzett szakasza (upstream, midstream és downstream) alapján kategorizálva a publikációkat. Emellett áttekintették

- az agrártermékek ellátási láncának irodalmát, ami hasonlóságokat mutat a betakarítási folyamat és a romlandóság tekintetében,
- a kőolaj-alapú tüzelőanyagok ellátási láncával kapcsolatos tanulmányokat, ami hasonló disztribúciós rendszerrel üzemel, valamint
- az általános ellátási lánc modellezési irodalmat.

Felhívták a figyelmet a stratégiai, taktikai és operatív döntési szintek integrációjának fontosságára, ami a biomassza alacsony energiataralma és az abból fakadó alacsony jövedelmezőség miatt fokozottan hangsúlyos a biomassza ellátási láncban. Ehhez megfelelő operációkutató modellek kidolgozását szorgalmazták.

Scott és mtsai (2012) többszemponú (többscélú) döntéshozatali módszereket (MCDM) bioenergetikai területen alkalmazó, 2000-2010 között megjelenő munkákat gyűjtötték és foglaltak össze. A releváns cikkeket az alkalmazott módszerek alapján öt kategóriába sorolták: optimalizálás kevés számú alternatíva esetén, optimalizálás nagyszámú alternatíva esetén (matematikai programozási modellek), prediktív modellek, főként kvalitatív modellek, egyéb. A szerzők azt találták, hogy az MCDM módszerek két legfontosabb alkalmazási területe a technológiák közötti választás valamint az energiapolitikai szabályozások hatásának értékelése. Fő javaslatként a többkritériumos modellek és a MCDM módszerek kiterjesztését fogalmazzák meg más döntési szituációk esetére, ami lehetővé tenné a különböző célok közötti trade-off kapcsolatok jobb megértését.

Sharma és mtsai (2013) kiterjedt irodalomfeldolgozást publikáltak azon 2012 előtt írt cikkekről, melyek matematikai programozási modelleket alkalmaztak a biomassza ellátási lánc tervezéséhez. A tanulmányokat nyolc szempont szerint csoportosították: döntési szint (stratégiai, taktikai és operatív); ellátási lánc struktúra; modellezési megközelítés (determinisztikus, sztochasztikus, stb.); kvantitatív teljesítménymutató; ellátási láncban kapcsolatban megosztott információ; újdonságtartalom; alkalmazási példa; feltevések, korlátozások és jövőbeli kutatási tervek. Azt

találták, hogy a stratégiai modellek a telepítési és kapacitásstervezési, valamint hálózattervezési döntési szituációkra, míg a taktikai és operatív modellek az anyagáramlásra, készletezésre és flottamenedzsmentre koncentrálnak. A leggyakrabban alkalmazott technika a vegyes egészértékű lineáris programozás, ahol többségében költségminimalizáló, kisebb mértékben bevételmaximalizáló célt definiáltak a szerzők. Kihívásként és jövőbeli kutatási irányként nagyméretű problémák kezelésére alkalmas modellek kidolgozását, a bizonytalanság erőteljesebb figyelembe vételét, valamint a fenntarthatósági célok modellekbe építését fogalmazták meg.

Mafakheri és Nasiri (2014) a biomassza ellátási lánc egyes szakaszaihoz (betakarítás, raktározás, szállítás és energiatermelés) kapcsolódó matematikai modelleket tekintették át. Az eddig elért eredményeket összevetették a bioenergetikai rendszerek kapcsán megjelenő stratégiai kihívásokkal, ami alapján számos további kutatási irányt nevesítettek. A technológiai fejlesztések, valamint a kínálati és keresleti volatilitás hatását kifinomultabb módon szükséges vizsgálni, melynek segítségével képesek lehetünk a biomassza ellátási láncban meglévő bizonytalanság és dinamizmus pontosabb modellezésére. Ennek egy elemeként olyan készletezési és flottamenedzsment megoldásokra van szükség, melyek képesek a bizonytalanság kezelésére. Emellett, növelni kell azon tanulmányok számát is, melyek a biomassza ellátási láncok gazdasági, társadalmi és környezeti hatásait együttesen értékelik.

Meyer és mtsai (2014) a biomassza ellátási láncok upstream szakaszának tervezésével és irányításával foglalkozó optimalizáló modelleket tekintették át. A publikációkat az optimalizálási módszer (LP, IP, MIP, LNP, heurisztikák, MCDM), a döntéshozatali szint (stratégiai, taktikai és operatív) valamint a célfüggvények, döntési kritériumok (gazdasági, energetikai, környezeti és társadalmi) alapján csoportosították. Azt találták, hogy csak négy tanulmány alkalmaz többcélú optimalizálást a gazdasági, környezeti és társadalmi célok együttes figyelembe vételével. Ezen hiányosság kezelése további kutatási lehetőséget jelent. Ezen kívül az ellátási lánc holisztikus modellezése, a tevékenységek integrált optimalizálása igényel még jelentősebb kutatási erőfeszítéseket.

Az áttekintő tanulmányok eredményeinek összegzéseként kijelenthetjük, hogy a biomassza ellátási lánc modellezésével foglalkozó tanulmányok alapvetően költségfókuszúak, viszonylag kevés tanulmány fogalmaz meg többkritériumos, többcélú modelleket a gazdasági, környezeti és társadalmi faktorok együttes optimalizálásával. Hiányosságként jelenik meg, hogy a modellek túlnyomó része determinisztikus jellegű, figyelmen kívül hagyva a biomassza ellátási láncot jellemző keresleti és kínálati bizonytalanságot. Végül, több összefoglaló cikkben is felmerül az igény azon modellek iránt, melyek integrálni tudják az ellátási lánc tevékenységeit.

A szállításiütemezési modellek kidolgozása során célt volt, hogy minél inkább megfeleljek az említett kihívásoknak. A következő fejezetben megvizsgálom, hogy a szállításiütemezés során milyen – üzleti stratégiából következő – célkitűzéseket, szempontokat kell szem előtt tartani a költséghatékonyság kritériumán túl. A bizonytalanság modellezésére a scenárió-generálás módszerét alkalmazom majd, valamint kitérek arra is, hogy a szállításiütemezés miként kapcsolódik más döntési szituációkhoz.

Az áttekintő tanulmányok különböző szempontok szerint csoportosítják a releváns irodalmat (döntési szintek, modellezési módszerek, célfüggvények, ellátási lánc szakaszok, stb.). A további alfejezetekben olvasható irodalomfeldolgozáshoz a biomassza ellátási lánc korábban bemutatott

döntési hierarchiája szolgáltatja a logikai vázat. Egy vagy több döntési szituációhoz köthető típusmodelleket azonosítok és mutatok be a lágyszárú biomassza ellátási láncok irodalmából.

3.3.2 Lágyszárú biomassza ellátási lánc költségbecslése, jövedelmezőségi számítások

Caputo és mtsai (2005) közvetlen tüzeléses és elgázosítást végző, mezőgazdasági mellékterméket vagy fahulladékot hasznosító biofeldolgozók esetére dolgoztak ki költségmodellt, és megvizsgálták, hogy bizonyos logisztikai paraméterek változása miként befolyásolja az erőművek profitabilitását (a beruházás nettó jelenértékét). Azt találták, hogy az alapanyag beszerzési árának 1%-os változása a nettó jelenérték kb. 2%-os változásához vezet. Ez a rugalmassági érték a fajlagos szállítási költség és a járműkapacitás kapcsán 1% körüli. 5-50MW teljesítményű erőművek esetére meghatározták a logisztikai paraméterek azon tartományát is, ahol az energetikai beruházás még jövedelmező marad.

Perrin és mtsai (2012) kínálati függvényeket alkottak három Nebraska államban működő bioetanol gyár működési adatai alapján. A költségmodellek megalkotása során feltételezték, hogy a területen megtermelt biomassza (kukorica és vesszős köles) felhasználható közvetlen tüzeléssel villamosenergia-termelésre és etanolgyártásra is, miközben az ellátási területek különböztek a termőföldek koncentrációja és az öntözés módja tekintetében. A termelési, betakarítási és szállítási költségek kalkulációjához egy jellemző technológiai folyamatot és ahhoz publikált vállalkozói díjakat vettek alapul. Becslésük alapján a teljes ellátási költség 13-19%-át a szállításhoz és a rakodáshoz kapcsolódó kiadások adták.

Thompson és Tyner (2014) a kukoricaszár felhasználásához adtak költségbecslést, annak leggyakoribb feldolgozási folyamatát feltételezve. A szükséges adatokat egy Iowa államban telepített kísérleti ültetvény többéves működése során nyerték. 68,2 km-es átlagos beszállítási távolsággal kalkuláltak, és a gazdasági számítások eredményeként azt nyerték, hogy a teljes ellátási költségből a szállítás, a rakodás és a tárolás költsége rendre 25, 8 és 21%-os részt képvisel. Lineáris programozási modell segítségével vizsgálták, hogy a nyert költségadatokat és várható értékesítési árak mellett a (részben) energetikai célú kukoricatermesztés milyen mértékben változtatja meg a termelők földhasználatra vonatkozó döntéseit. A fenti számításokat különböző piaci scenáriók mellett is elvégezték.

Morey és mtsai (2010) is a kukoricaszár egy lehetséges ellátási folyamatát elemezték, és a költségkalkuláción túl a fosszilisenergia-felhasználás és az üvegházhatású gázok kibocsátásának mértékét is megbecsülték. Petrolia (2008) egy Minnesota állambeli etanol üzem kapcsán elemezte a kukoricaszárral történő ellátás költségét. Cikkének újdonsága, hogy Monte Carlo szimulációval végzett érzékenységvizsgálatot a legbizonytalanabb input paraméterek kapcsán, melyek az alapanyag hozama, a termelők részvételi aránya, a bálák nedvességtartalma és a begyűjtés hatékonysága voltak.

Pintér és mtsai (2009) a szőlővenyige és fanyesedék erőművi felhasználásának gazdaságosságát elemezték. A szerzők összesítették azon költségeket, melyek a biomassza erőműbe történő eljuttatásig felmerülnek, és ezt összevetették az erőmű által fizetendő becsült átvételi árral (7400 Ft/t). A szállítási és rakodási költségek becslése során az FVM Mezőgazdasági Gépesítési Intézet által kidolgozott mezőgazdasági gépi munkák költségeit vették alapul (Gockler 2008). Azt kapták, hogy 45km-es szállítási távolságig fedezi az átvételi ár az ellátás költségeit. Hangsúlyozzák, hogy bár – a biomassza termelők részére – a beszállítás csekély jövedelemtermelő képességgel bír, de enyhíti

a felesleges melléktermék megsemmisítésének problémáját, valamint a gazdák közötti összefogásra ösztönöz.

Varga (2007) egy hazai, széntüzelésről átállított és egy németországi, új építésű, biomasszát (tűzifa és mezőgazdasági melléktermék) tüzelő, kb. 30 MW teljesítményű erőmű beruházás-gazdaságossági elemzéséhez dolgozott ki módszertant. Ligetvári és Tóth (2012) kisméretű, biomassza alapú energetikai rendszerek kapcsán elemezték a fosszilis energiaforrások kiváltásából fakadó költségmegtakarítás nagyságát.

3.3.3 Biomassza alapanyagok értékelése

Richardson és mtsai (2011) egy Washington állambeli CHP erőműhöz kapcsolódó esettanulmányt mutattak be. Ebben hat – az adott földrajzi területen elérhető – biomassza típus kínálatát és ellátási költségét értékelték. Az egyes biomassza típusokra jellemző technológiai folyamatot kiválasztva határoztak meg kínálati függvényeket és mennyiségeket. Az ellátási folyamatban rejlő bizonytalanság miatt mind a teljes költség, mind a kínálati mennyiségek széles tartományban változhattak. Az elemzések eredményeként azt kapták, hogy a meglévő iparágak (fakitermelés, gyümölcsstermesztés) melléktermékeire épülő rendszerek jelentik a leggazdaságosabb megoldást.

Csipkés (2011) hagyományos szántóföldi kultúrák (kukorica, őszi búza, napraforgó, őszi káposztarepce), valamint fás szárú energiaültetvények (akác, nyár, fűz) hosszú távú jövedelmezőségének (12 éves tervezési horizont) és versenyképességének összehasonlító vizsgálatát végezte el az Észak-alföldi régió esetére. Ehhez először a kapcsolódó növénytermesztési technológiákat definiálta, majd az egyes biomassza típusok hosszú távú jövedelmezőségét becsülte meg: az energiaültetvények gazdaságosabbnak bizonyultak a hagyományos kultúrákkal szemben. Végül, lineáris programozási modell segítségével határozta meg az optimális, maximális fedezeti hozzájárulást nyújtó, hosszú távú vetésszerkezetet egy 500 hektáros mintagazdaság esetén. Itt azt találta, hogy a hagyományos és új kultúrák körülbelül fele-fele arányban vesznek részt a termelésben.

3.3.4 Lágyszárú biomassza ellátási lánc logikai tervezése

A lágyszárú biomassza ellátási lánc logikai tervezése alatt elsősorban a technológia- és folyamatválasztási döntések meghozatalát, az ellátási lánc konfigurációjának meghatározását értem.

Tatsiopoulos és Tolis (2003) a gyapotszár felhasználására épülő ellátási lánc felépítését elemezték. Esettanulmányukban hat scenáriót különítettek el a vizsgált földrajzi terület biofeldolgozó kapacitása tekintetében a 20MW teljesítményű központi erőműtől az 1000 darab kisméretű CHP egységig. Tanulmányukban megbecsülték a fenti scenáriók és az azokhoz kapcsolható különböző logisztikai konfigurációk (alternatív szállítási és tárolási módok) költségét, majd ez alapján meghatározták az ellátási lánc optimális felépítését. Ennek keretében lineáris programozási modell segítségével optimalizálták az egyes termelői kategóriák és a biofeldolgozók közötti szállítási mennyiségeket.

Dunnett és mtsai (2007) a hőtermelésre alkalmas biomassza ellátási láncok logikai tervezéséhez és a tevékenységek (betakarítás, tömörítés, szárítás, tárolás és szállítás) ütemezéséhez dolgoztak ki keretrendszert. Az ellátási lánc tevékenységeinek reprezentálására állapot-feladat hálózatot (state-task-network) használtak. Az erre épülő MIP modellel egy 20MW teljesítményű, kínai nádat tüzelő

hipotetikus fűtőmű ellátási láncát tervezték meg. A modellben egy hónapos tervezési periódusokat alkalmaztak, ahol a végrehajtandó feladatok évente ciklikusan ismétlődnek. A modell egészértékű változói a telepítendő technológiai komponensek számát, míg a bináris változók a feladatok és a komponensek hozzárendelését adják meg. Az optimalizálás célja a rendszer teljes költségének minimalizálása.

Kovács és mtsai (2008) egy 1 MW teljesítményű virtuális fűtőmű esetén vizsgálták különböző betakarító és szállító jármű kombinációk, valamint logisztikai konfigurációk (közvetlen beszállítást, termőföldi tárolást, regionális depókat alkalmazó rendszer) esetén az ellátási folyamat teljes költségét. A Gyöngyös 10km sugarú környezetére alkalmazott számítások legfőbb eredménye szerint az 1-3 km-es távolságból közvetlen, míg nagyobb távolságból depókon keresztüli beszállítás mellett érhető el a rendszer költségminimuma.

Lam (2011) doktori értekezésében a P-gráf eljárást alkalmazta biomassza ellátási láncok optimális folyamatstruktúrájának meghatározására (ellátási lánc szintézise). Ehhez először definiálta a folyamat lehetséges anyagáramait a biomassza alapanyagoktól a különböző energetikai végtermékekig, meghatározta a potenciális folyamatelemeket a pelletüzemtől a gőzturbináig, majd – P-gráf algoritmusok segítségével – felépítette az összes lehetséges átalakítási láncot tartalmazó szuperstruktúrát. Ezen hálózatból korlátozás és szétválasztás módszerével választotta ki az optimális folyamatstruktúrát.

Doktori disszertációjában Pintér (2012) lágyszárú mezőgazdasági melléktermékeket (búzaszalma, kukoricaszár, napraforgószár, repceszalma) hasznosító, Európában jellemző erőműtípusokat vizsgált, melyek közül kettő nagyerőmű, kettő pedig lokális törpeerőmű, fűtőmű. Ezen technológiákhoz meghatározta a minimális beszállítási távolságot, majd az alapanyag-termelők számára még gazdaságos, maximális szállítási távolságot. A két érték összevetésével valójában a beruházás gazdasági életképességét elemezte. Ehhez megbecsülte a Magyarország esetén releváns, légvonalbeli és közúti távolságok közötti átváltási arányszámot is (1,4-es szorzó). A szerző érzékenységvizsgálatot végzett a fűtőérték, a fajlagos hozam és a betakarítási terület koncentrációjának függvényében. Kutatásának egyik eredményeként azt kapta, hogy egy 20MW-os CHP erőmű búzaszalmával való ellátásához 22-75 km sugarú területről szükséges az alapanyag begyűjtése, míg a termelők számára csak 14,3 km-es távolságra éri meg elszállítani a mellékterméket. A szerző egyértelmű konklúziója, hogy Magyarországon csak 2MW teljesítmény alatti törpeerőmű, fűtőmű esetén gazdaságos a lágyszárú melléktermékek hasznosítása.

3.3.5 Lágyszárú biomassza ellátási lánc fizikai tervezése és az anyagáramlás aggregált tervezése

Az irodalomban fellelhető döntési modellek közül legnagyobb számban a telepítési döntésekkel találkozhatunk. Ezen probléma megoldása általában magában foglalja a különböző részletességű aggregált termelési és szállítási mennyiségek meghatározását is.

Cundiff és mtsai (1997) vesszős kölest feldolgozó biomassza ellátási lánc számára dolgoztak ki lineáris programozási modellt. Ennek segítségével hozták meg a depók havi kapacitásbővítési (vagy szűkítési) döntéseit és határozták meg a depók és a központi biofeldolgozó közötti havi szállítási mennyiségeket. A modellt négy időjárási szcenárió esetén is futtatták. Az optimalizálás célja a kapacitásbővítési és szállítási költségek együttes minimalizálása volt.

Perpiná és mtsai (2009) a Földrajzi Információs Rendszerek (GIS) használatára épülő telepítési döntéshozatal folyamatát mutatták be tanulmányukban, és alkalmazták azt Valencia autonóm közösség esetén (általánosságban igaz, hogy a telepítési döntések input adatainak előállításához GIS használatára van szükség). Ennek első lépéseként a vizsgált földrajzi terület 1 km²-es négyzetrácsos beosztását adták meg, majd meghatározták azok biomasza kínálatát. Az egyes négyzetek közül – számos technológiai, társadalmi és környezeti kritérium alapján – kiválasztották azokat, melyek megfelelők biofeldolgozó telepítésére. Következő lépésként a releváns négyzetek közötti szállítási távolságokat, útvonalakat határozták meg. Végül, különböző kritériumok (például összes szállítási költség) alapján értékelték a potenciális telephelyeket, melyek segítségével kiválasztható a biofeldolgozó optimális telephelye. Ezen döntéshozatali folyamat továbbfejlesztését mutatta be Sultana és Kumar (2012) több biofeldolgozó és a kanadai Alberta tartomány esetén.

Az Eksioglu és mtsai (2009) által kidolgozott MIP modell a depók és a biofeldolgozók számát, méretét és telephelyét határozza meg a termőföldről a finomítóiig tartó ellátási láncban. Emellett megadja a heti optimális szállítási, feldolgozási és raktározási mennyiségeket is. A modell célfüggvénye a beruházási és működési költségek összegét minimalizálja. A szerzők Mississipi állam területét használták esettanulmányként a modell teszteléséhez. Hasonló modellt dolgoztak ki Huang és mtsai (2010) egy háromszereplős ellátási lánc (biomassza hulladék előállítók – biofeldolgozók – bioetanol fogyasztók) és Kalifornia állam esetére. A modell újdonsága, hogy a többéves tervezési horizont során lehetőség nyílik a feldolgozó kapacitás növelésére egy már létező telephelyen (a szerzők éves tervezési periódusokat alkalmaztak). Zhu és Yao (2011) több biomasza alapanyagot párhuzamosan alkalmazó ellátási lánc telepítési döntéseihez dolgoztak ki havi tervezési periódusokkal dolgozó MIP modellt, és illusztrálták ezen megoldás előnyeit.

Kim és mtsai (2011) bizonytalanságot is figyelembe vevő hálózattervezési modelleket dolgoztak ki. A vegyes egészértékű programozási modellt alkalmazó első döntési fázisban potenciális biomasza termelő, átalakító és feldolgozó telephelyek számára választották ki a termelt biomasza típusát, a telepítendő technológiát és annak kapacitását (telepítési probléma). A piaci és technológiai bizonytalanság vizsgálatához először meghatározták azon sztochasztikus paraméterek halmazát, melyek a leginkább befolyásolják a célfüggvényt, azaz az ellátási lánc által megtermelt profit nagyságát, majd ezen paraméterek lehetséges szélsőértékeinek kombinálásával generáltak jövőbeli scenáriókat. A második döntési fázisban a generált scenáriók mellett optimalizálták a hálózat elemei közötti anyagáramlást, majd az összes scenárió szimultán figyelembe vételével robusztus megoldást is szolgáltatottak.

Kostin és mtsai (2012) kétfázisú modellt alkottak az integrált bioetanol-cukor ellátási lánc stratégiai tervezéséhez keresleti bizonytalanság mellett, melyet az argentin cukornád iparág esetére alkalmaztak. A többscenáriós MIP modell segítségével a termelési és raktározási technológiák telepítési és dinamikus kapacitásfejlesztési, valamint az anyagáramlás (termelés és szállítás) mennyiségi döntéseit hozták meg. A bizonytalan keresleti mennyiségeket adott bekövetkezési valószínűséggel jellemzett scenáriókkal reprezentálták, az optimalizálás célja pedig az ellátási lánc nettó jelenértékének maximalizálása volt. A modellben a járművek átlagos számát az alábbi összefüggés szerint határozzák meg:

$$\text{átlagos járműszám} = \frac{\text{időegységre vetített szállítási igény}}{\text{egy jármű kapacitása}} \text{ átlagos szállítási idő}$$

A fajlagos szállítási költség magában foglalja az üzemanyag, a munkaerő és a karbantartás költségét, valamint a szállítási tevékenységhez kapcsolódó általános kiadásokat.

Akgul és mtsai (2012) Nagy-Britannia bioetanol piacára alkalmazták hálózattervezési modelljüket. A MIP modell döntési változói a biomassa típusok és a bioüzemanyag-termelés helyszínei, a termelési ráták, a földrajzi egységek közötti szállítás és az import mennyisége, valamint a szállítási módok (közúti, vasúti, vízi). A szerzők célja a minimális költségű ellátási lánc meghatározása. A kidolgozott modellbe fenntarthatósági feltételeket is építettek, melyekkel korlátozták a rendelkezésre álló termőterület és a megtermelt biomassa energetikai célú felhasználását. Ezek célja a fenntartható földhasználat és az élelmezési célú biomassa-mennyiség biztosítása.

Judd és mtsai (2012) Közép-Virginia területén alkalmazták lágyszárú biomassa beszállítást támogató modelljeiket, melyek egyike a depók (satellite storage locations – SSLs) számát és telephelyét adja meg, feltéve, hogy a biofeldolgozó helyszíne már ismert. A MIP modell eredményeként az optimális depó-termőföld hozzárendelést is megkapjuk. Az optimalizálás célja a telepítési és – a depók és a biofeldolgozó közötti – szállítási költségek minimalizálása. A depók telepítéséhez véges számú potenciális helyszínt jelöltek ki: a lehetséges helyszínek a termőföldek azon részhalmaza, melyek megfelelnek bizonyos kritériumoknak (állami fenntartású első- vagy másodrendű útvonal elérhetősége, legalább 500 méter távolság lakott területtől, stb.). A szerzők három különböző rakodási-szállítási eszközkombináció, valamint telepített és mozgatható felrakodó berendezések esetén is megoldották a fenti feladatot. A mobil eszközök esetén meghatározták azt is, hogy azok milyen sorrendben haladjanak végig a depókon (speciális utazó ügynök feladat). Ezen variációkról bővebben a további alfejezetekben esik majd szó. A kidolgozott modellek jellegzetessége a szállító járművek egyszerre csak egy depóból szállíthatnak alapanyagot a biofeldolgozóba. A szerzők kiemelik, hogy ezen korlát feloldásával és egy optimális ütemezés megadásával tovább csökkenthető a szükséges járművek száma.

3.3.6 Lágyszárú biomassa logisztika szállítási módok

Sokhansanj és Hess (2009) az agrárbiomassa ellátási láncok jellemző logisztikai folyamatát tekintették át. Három szállítási módot különböztettek meg, melyek a közúti, a vasúton és a csővezetékben történő szállítás. Mindhárom szállítási mód kapcsán megadtak egy-egy – szállítási távolságot és kapacitást figyelembe vevő – függvényt a költségek és az energiafelhasználás becslésére. Ezek alapján arra jutottak, hogy a közúti és vasúti szállítási módok tekintetében 110 km-es szállítási távolság alatt az előbbi, felette pedig az utóbbi az olcsóbb. Mindazonáltal nyomatékosan felhívták az olvasók figyelmét a fenti egyenletek feltétel nélküli átvételének veszélyeire, ugyanis a szállítási tevékenység tényleges kiadásai nagyban függenek az adott projektben elérhető infrastruktúrától, a szállítandó alapanyag jellemzőitől, a szállítási előírásoktól és a szállítási szerződések paramétereitől is.

Miao és mtsai (2012) a közúti, vasúti, vízi és csővezetékes szállítási módok főbb jellemzőit mutatták be irodalmi példákon keresztül. Azt találták, hogy 100 km-es távolság alatt a közúti szállítás az általánosan alkalmazott mód, főként, ha fontos a rugalmasság és sok termelőtől történik a biomassa beszállítása. Nagyméretű biofeldolgozók esetén a teljes üzemeltetési költségen belül csökken a szállítási tevékenység részaránya, azonban nem lehet figyelmen kívül hagyni a jelentősebb környezetterhelést és a megjelenő forgalmi torlódásokat. A szerzők felhívták a figyelmet arra, hogy érdemes megfontolni az intermodális szállítás lehetőségét is. Egy adott

beruházáshoz kapcsolódó optimális szállítási mód függ a biomassa hasznosításának módjától, a termelési kapacitástól, a logisztikai infrastruktúrától, a biomassa formájától és a minőségi előírásoktól, valamint a környezeti hatásoktól is, így annak kiválasztását egy teljesítmény-alapú értékelésnek kell megelőznie.

Searcy és mtsai (2007) különböző felépítésű bioenergetikai láncok kapcsán elemezték a szállítási módok fajlagos költségét. Bálázott gabonaszalma, kukoricaszár, valamint erdei apadék esetén közúti, vasúti, vízi és csővezetékes, etanol esetén közúti és csővezetékes, villamos energia esetén pedig átviteli hálózaton történő szállítást vizsgáltak. Az elemzett biofeldolgozó méretek 50MW és 500MW voltak. Két fő költségkomponenst különítettek el: a távolságtól függő (Distance Variable Cost – DVC) és a távolságtól független (Distance Fixed Cost – DFC) költségeket. A DVC a szállítási módtól és az ellátási lánc elemeinek földrajzi elhelyezkedésétől függ, míg a DFC a biomassa típusától, az alkalmazott berendezésektől és egyéb szerződéses feltételektől. Általános eredményként megállapították, hogy a végtermék (villamos energia és etanol) szállítása – a szükséges átviteli infrastruktúra kiépítése mellett is – gazdaságosabb, mint a keresleti helyszínhez közel telepített biofeldolgozó biomasszával történő ellátása. Az alapanyag tekintetében, kb. 100km-nél rövidebb szállítási útvonalak esetén – részben rugalmassága miatt – a közúti szállításnak nincs alternatívája, 500km-nél hosszabb szállítási útvonalak esetén először a vasúttal, majd a vízi szállítással kombinált közúti anyagmozgatás válik gazdaságossá.

Singh és mtsai (2010) a szállítási alternatívák értékeléséhez, a fajlagos szállítási költség számításához dolgoztak ki költségmodellt. Két szállítási módhoz (traktor és pótkocsi, kamion) kapcsolható négy különböző szállítási rendszert elemeztek tömörítés nélküli, bálázott és brikettált biomassa esetén. Érzékenységvizsgálatot végeztek a szállítási kapacitás nagysága és az alapanyag földrajzi koncentrációja kapcsán. A tanulmány eredményeként mindhárom tömörítési mód esetén kiválasztották – a szállítási távolságtól függő – optimális szállítási rendszert.

3.3.7 Lágyszárú biomassa logisztika berendezései és eljárásai

Sokhansanj és Hess (2009) áttekintő tanulmányukban a nedves és száraz biomassa leggyakoribb betakarítási, előfeldolgozási, szárítási módszereit ismertették. A betakarítás kapcsán összegyűjtötték a különböző eljárások (például bálázás, aprítás) műveleteit jellemző fajlagos költség, energiafelhasználás és emissziós értékeket. A különböző tárolási alternatívák kapcsán megadták azok nedvességtartalomra és szárazanyag-vesztésre gyakorolt hatását. Áttekintették az egyes előfeldolgozási műveleteket és áttekintették a tömörítési módszerekre vonatkozó technikai és pénzügyi paramétereket is.

Miao és mtsai (2012) a lignocellulóz biomassa anyagkezelési és szállítási folyamatai során alkalmazott berendezések (betakarító gépektől a szállító járművekig), módszerek, standardok irodalmát foglalták össze, elkülönítve a száraz energiafűveket, a rövid vágásfordulójú fás alapanyagokat, a zöld energianövényeket és a mezőgazdasági melléktermékeket. Az optimális logisztikai rendszer felépítése és az alkalmazott gépek, berendezések kombinációja számos tényező függvénye, így azt mindig az adott beruházáshoz kell igazítani. Bemutatták a logisztikai folyamat során alkalmazható szállító járművek technikai paramétereit a betakarításnál alkalmazott erőgépektől egészen az erőműbe szállító tehergépjármű típusokig.

Cundiff és Grisso (2008) áttekintették a körbálák fel- és lerakódása, valamint szállítása során alkalmazott módszereket. Ezután két olyan koncepciót dolgoztak ki, melyekkel körbálákat

tartalmazó konténerok mozgathatók hatékonyan. Az elsőben villás targoncával, míg a másodikban a kamion önrakodását lehetővé tevő emelővel történik a konténerok fel- és lerakodása. A két opció értékeléséhez költségkalkulációt készítettek.

Rentizelas és mtsai (2009) egy thesszáliai esettanulmány keretében vetették össze a három leggyakoribb biomassza tárolási megoldást (zárt raktár szárítási lehetőséggel; fedett tároló szárítás nélkül; szabadtéri tárolás műanyag fóliával fedve) gyapotszár és mandulafa nyesedék beszállítása kapcsán. Céljuk az volt, hogy összemérhetővé tegyék az alternatív tárolási módokat alkalmazó ellátási láncok teljes költségét. Legfontosabb eredményként azt kapták, hogy egyetlen alapanyag esetén a legalacsonyabb költségű tárolási megoldás (szabadtéri tárolás) mellett érhető el a teljes rendszer költségminimuma, ez azonban együtt jár az egészségügyi, biztonsági és technológiai kockázatok növekedésével. Két alapanyag kombinált felhasználása mellett, ami a teljes költség 15-20%-os csökkenését is eredményezheti, a drágább tárolási eljárások tűnnek előnyösebbnek.

Judd és mtsai (2012) három rakodási-szállítási eszközkombinációt hasonlítottak össze egy telepítési modell keretében: „hátrakodó tartókeretes”, „oldalt-rakodó tartókeretes” és brikettált biomasszát szállító „tömörítéses” rendszerrel történhetett a tüzelőanyag szállítása a depókból a biofeldolgozóba. További opciókat eredményezett, hogy a felrakodó berendezések vagy mozgathatók, vagy adott depóba telepítettek voltak. Az optimalizálás eredményeként azt kapták, hogy a „oldalt-rakodó tartókeretes” rendszer esetén átlagosan 21,3%-nyi költségmegtakarítás érhető el a „tömörítéses” rendszerhez képest, míg a „hátrakodó tartókeretes” rendszer hatékonysága elmarad a többi megoldásétól. Mozdítható felrakodók alkalmazásával 14,8%-nyi megtakarítás volt elérhető.

Bals és Dale (2012) biomassza előfeldolgozó depókban alkalmazható eljárásokat (ammóniás robbantás, gyors pirolízis, levélfehérje koncentrátum előállítás) értékelték gazdasági és környezeti szempontból. Az előfeldolgozó eljárások célja, hogy a biofeldolgozóba történő szállítás előtt homogén, tömörített köztés terméket előállítsanak elő, mely hatékonyabbá teszi a logisztikai folyamat további lépéseit.

3.3.8 Lágyszárú biomassza integrált anyagáramlási szimulációk

Az integrált szimulációs megoldások segítségével több döntési szituáció elemezhető párhuzamosan. Az – általában sztochasztikus – modellek segítségével értékelhető egy adott paraméterhalmazzal jellemezhető biomassza ellátási lánc működése, az input adatok változtatásával pedig megtörténhet az alternatív technológiák, eszközök, szállítási módok, telephelyek, stb. összehasonlítása.

De Mol és mtsai (1997) Biologics (BIOmass LOGistics Computer Simulation) néven dolgoztak ki szimulációs modellt a biomassza ellátási lánc vizsgálatához. Az ellátási láncot hálózati struktúrával modellezték, ahol a csomópontok a termőföldeket, a gyűjtő-, az átrakó- és az előfeldolgozási pontokat, valamint az erőművet, míg az élek a szállítási tevékenységet reprezentálták. A biomassza adott méretű tételekre osztva áramlik a hálózaton, amit az erőműnél található készlet nagysága aktivál húzó politikát alkalmazva. A köztés csomópontok adott méretű biomassza készlet tartására törekednek, és több lehetséges küldő csomópont esetén abból indul szállítás, ahol több alapanyag található. A szimuláció során figyelembe veszik a szárazanyag-veszteség és a nedvességtartalom-csökkenés mértékét is. Az ellátási lánc teljesítményét a rendszer éves teljes költségével (alapanyag

ára, logisztikai költség, erőmű üzemeltetési költsége) és a felhasznált energia mennyiségével mérik. A szállítási tevékenység kapcsán megkapjuk az szükséges fuvarok számát is.

A Nilsson (1998) által kifejlesztett SHAM (Straw Handling Model – Szalma Kezelési Modell) szimulációs modell célja, hogy a távfűtésre használt szalmatüzelésű kazánok ellátási láncát elemezze a termőföldektől a fűtőműig. A modell segítségével fejleszthetők az irányítási elvek és az ellátási lánc teljesítménye, mely a felmerülő költségek és a felhasznált energia csökkentését jelenti. A szimulációs modell magában foglalja a betakarítás, bálázás, szállítás, raktározás, előfeldolgozás és tüzelés tevékenységeket. A szerző az ellátási lánc folyamatait, az alapanyag áramlását diszkrét eseményvezérelt szimulációval (discrete event simulation) modellezte, és figyelembe vette a sztochasztikus időjárás feltételeket is, melyek a betakarítás ütemezését és az alapanyag nedvességtartalmát is befolyásolják. A modell négy modult tartalmaz:

- Lokációs modul: a termőhelyek, a raktárak és a fűtőmű elhelyezkedésére vonatkozó információk.
- Időjárás és szárítás modul (folytonos idejű szimuláció): a modell 15 év napi szintű időjárás adatait használja az időjárás-generátor futtatása során. Ennek figyelembe vételével történik az alapanyag nedvességtartalmának becslése.
- Betakarítási és anyagkezelési modul (diszkrét eseményvezérelt szimuláció): két entitás áramlása jelenik meg a részmodellben. Egyrészt a szalma diszkrét egységei (a bálázás során 1 tonna, míg a szállítás során egy fuvarnyi alapanyag) a betakarítástól a fűtőműig, másrészt a rendszer állapotát jelző információk, üzenetek az ütemezést végző menedzser (ütemező ágens) irányába. Az áramló entitásokat vagy kiszolgálja egy erőforrás (például bálázó, szállító jármű), vagy sorban állnak addig, míg felszabadul a foglalt erőforrás.
- Költség és energiafelhasználási modul: a szimulációs modell eredményeit kalkuláló részmodell.

A modellt három svédországi régióra is alkalmazta a szerző. Az esettanulmányokban a fűtőműveket terhelő teljes költségből körülbelül 10-15%-nyit tett ki az alapanyag ára, a maradék részt a logisztikai költségek (betakarítás, bálázás, szállítás, raktározás, aprítás) adták. A szállítás költsége elérte az összes kiadás 30%-át. A modell alkalmas arra, hogy segítségével kiválasszák az ellátási láncban alkalmazandó technológiákat, eszközöket, szállítási módokat, meghatározzák a gépek optimális számát és elemezzék az ütemező ágens alternatív döntési szabályainak hatását. A lokációs részmodell input adatainak változtatásával a telepítési alternatívák is elemezhetővé válnak.

Sokhansanj és mtsai 2006-ban publikálták az IBSAL (Integrated Biomass Supply Analysis and Logistics) elnevezésű keretrendszer, mellyel a mezőgazdasági biomassza (energiaültetvényektől melléktermékekig) biofeldolgozóba történő áramlását – begyűjtési, raktározási és szállítási folyamatait – szimulálták. A modell független működési modulokból (betakarítás, bálázás, járműre rakodás, szállítás, kazalba rakás stb.) áll, melyek összekötők által válnak egy teljes ellátási láncá. Az ellátási lánc anyagáramlását dinamikus szimulációval modellezzik, és a szállítandó tételek mozgását vagy éppen torlódását (várakozó sorok) vizsgálják a hálózat állomásain. Az egyes állomások, berendezések kapacitását az óránként feldolgozható tételek számával mérik. A modell egyenletei az állomások, berendezések működését és költségeit, valamint az alapanyag nedvesség- és szárazanyag-tartalmának változását írják le. Input paraméterként figyelembe veszik például a termelői hálózat térbeli eloszlásának jellemzőit, a napi részletességű időjárás adatokat, a

berendezések tulajdonságait és az azokból rendelkezésre álló mennyiséget. A szimulációs futtatások outputjaként – a biomassa tonnájára vetített fajlagos költség, energiaigény és emissziós értékek mellett – a feldolgozott biomassa mennyiségét, a szükséges berendezések méretét és számát, valamint az egyes tevékenységek időhosszát is megkapjuk.

A szállító járművek teljesítményének kalkulációja a következőképpen történik:

$$W_t = \frac{W_b}{t_{tr}},$$

ahol W_t az óránként szállított mennyiség (tonna/óra), W_b az egy járművön szállítható nedves biomassa tömege, t_{tr} pedig egy fuvar időtartama. A járművek kapacitása (W_b) a konténerterfogat, az alapanyag-sűrűség és egy telítettségi együttható szorzataként adódik. A fuvarok teljes időtartama (t_{tr}) a feldolgozó és a termőhely vagy depó közötti oda- és visszaút (t_{full} és t_{empty}), valamint opcionálisan a fel- és lerakodás időtartamának összege, korrigálva egy hatékonysági együtthatóval (e):

$$t_{tr} = \frac{t_{full} + t_{empty}}{e}.$$

A szállítási idők a szállítási távolság és az átlagsebesség hányadosaként adódnak,

$$t = \frac{L}{S_T},$$

ahol S_T a járművek – adott körülményektől függő – átlagsebessége, L pedig a szállítási pontok légvonalban mért távolsága és egy korrigáló együttható szorzata. Ezen, kanyargósságot mérő együttható alapértelmezett értéke az IBSAL-ban 1,4.

Az IBSAL modell kidolgozói több esettanulmányt is publikáltak, melyekben különböző biomassa típusok feldolgozási folyamatát elemezték:

- Az IBSAL modellt bemutató publikációban egy hipotetikus, naponta 1252,5 tonna kukoricaszárat feldolgozó biofeldolgozóba történik az alapanyag beszállítása. A járművek 16 tonnányi kockabálát szállítanak fuvaronként, kb. 500 depóból. A szállítási távolság 32 és 160 kilométer között változik. A modellben feltételezték, hogy a szállítási tevékenység ellátásához a következő járműpark áll rendelkezésre: 13 kamion, 5 homlokrakodó (bálák lerakódása) a biofeldolgozónál, valamint 2 homlokrakodó minden egyes depóban. Ezen flottanagyság segítségével egyenletes szinten tartották a naponta beszállított biomassa mennyiségét egész évben.
- Kumar és Sokhansanj (2007) a vesszős köles (switchgrass, *Panicum virgatum*) ellátási láncának költségét, energiafelhasználását és emisszióját becsülték meg különböző feldolgozási (kör- és kockabálázás, kazlázás, nedves és száraz aprítás) és azoknak megfelelő szállítási alternatívák esetén. A biofeldolgozó 2 000 tonnás napi kereslettel rendelkezett, a szállítási távolság pedig 3-77 kilométer között változott. Az alapanyag tömörítésének eltérő mértéke okán kb. 7-12 tonna kapacitású járművekkel kalkuláltak, ami alapján 9-20 szállító járműre volt szükség a szállítási igények kielégítéséhez. Kockabála alkalmazása esetén 8-8 fel és lerakodó berendezéssel és 9 szállító járművel terveztek.

- További elemzéseket végeztek az IBSAL felhasználásával Sokhansanj és mtsai (2009) napi 2 000-5 000 tonna vesszős kölest hasznosító nagyméretű biofeldolgozó esetén, melynek ellátásához óránként kb. 5-14 fuvar beérkezésére lenne szükség.

Ebadian és mtsai (2011) az IBSAL egy továbbfejlesztését mutatták be, mellyel egy olyan logisztikai rendszert modelleztek, ami egyszerre több mezőgazdasági alapanyagot hasznosít egy etanol üzem ellátására (IBSAL-Multi Crop – IBSAL-MC). Az IBSAL-MC modell két fő részre bontható: egy kínálatvezérelt (push) modulra, melyben a lehető legtöbb biomassza betakarítására törekednek a betakarítási időszakok során, valamint egy keresletvezérelt (pull) modulra, ami a biofeldolgozó napi keresletének kielégítésére fókuszál. Az IBSAL korábbi verzióit – a fentiekén túl – több helyen is módosították:

- Az alapanyagot szolgáltató régió termőhelyeit szeparáltan kezelik, saját eszközparkkal és raktárkapacitással.
- Az anyagáramlás mellett az információáramlást is kezelik.
- A raktárkapacitást korlátozzák és raktármenedzsment elemmel bővítették az alkalmazást.
- Néhány paramétert a korábbi determinisztikus helyett sztochasztikus jellegűnek tekintenek.
- Stb.

A közúti szállítás modellezése kapcsán nem történt elvi módosítás, csupán a szállítási útvonal kanyargósságát mérő együttható értékét csökkentették 1,2-re.

Esettanulmányukban egy 750 tonnás napi kereslettel (évi 365 napon keresztül) rendelkező biofinomító ellátását szimulálták, ahol három különböző búzaszalma szolgáltatta az alapanyagot a finomító 160 kilométer sugarú környezetéből. A kb. 15,5 tonnás kapacitású járművekből a számítások szerint 13 darabra volt szükség a legforgalmasabb napon. Átlagosan napi 48 fuvar valósult meg, míg a legforgalmasabb napon a beszállítások mennyiség 58-ra nőtt. Mivel a szimulációkban a járművek véletlenszerűen érkeznek a biofeldolgozóba, ezért ott számottevő torlódással, várakozási idővel számolhatunk. A futtatások során a járművek rendszerben töltött ideje (sorban állás és lerakodás együttes ideje) 0,5 és 3,76 óra között változott, a leghosszabb sor 8 kamionból állt. A biofeldolgozónál 3 500 tonnás raktárkapacitást engedélyeztek, ami kevesebb, mint 5 napnyi kereslet kielégítésére elegendő.

Zhang és mtsai (2012) a mezőgazdasági és erdészeti hulladéokra épülő bioüzemanyag ellátási láncot modellezték Michigan Alsó-félszigetén. Az ellátási lánc magában foglalja a betakarítási, feldolgozási, szállítási és készletezési folyamatokat, a működést értékelő teljesítménymutatók pedig az alapanyag-ellátás költsége, az energiefelhasználás és az üvegházhatású gázok kibocsátása. A szimulációs modellt két input paraméter mozgatja, az alapanyag iránti napi kereslet a biofeldolgozóban, valamint a napi kínálat a termőföldeken (kombinált húzó és toló rendszer). A modell egyediségét a tavaszi olvadás miatti forgalmi korlátozások, és ebből fakadóan a beszállítási folyamat időleges szüneteltetése adja. A szállítási folyamat szimulációja során nem engedik meg a több termőföldről történő kombinált beszállítást, ami megnövelheti a szükséges járműpark nagyságát. A bemutatott esettanulmányban, 50 tonnás járműkapacitást feltételezve, átlagosan 100 fuvarra volt szükség naponta.

Az integrált szimulációs megoldások egyértelmű előnye, hogy a teljes ellátási lánc viselkedését képesek modellezni, értékelni. Hátrányuk azonban, hogy csak korlátozott mértékben adnak lehetőséget a folyamatok fejlesztésére, optimalizálására. Ebadian és mtsai (2011) tanulmányának egy konklúziója például, hogy a berendezések és járművek hatékony üzemeltetése, a tevékenységek megfelelő ütemezése érdekében optimalizáló modellek kidolgozására van szükség.

3.4 Biomassza beszállítás szimuláció és ütemezés

A fentiekben példákat hoztam a lágyszárú biomassza ellátási láncot érintő hosszú és középtávra szóló döntési modellekre. Jelen alfejezetben áttérek a részletes tervezés területére, azon belül is a szállítástervezés döntési szituáció irodalmának áttekintésére. Az 1.4-es alfejezetben több példával is illusztráltam, hogy a szállítási tevékenység jelentős részt képvisel az ellátási folyamat teljes költségéből, mégis, fontossága ellenére, viszonylag kevés publikáció foglalkozik ezen területtel. Az alábbiakban bemutatok néhány olyan tanulmányt, melyek szimulációs technikákat alkalmazva elemzik a beszállítási és a biofeldolgozónál tapasztalható sorbanállási folyamatokat, valamint különböző ütemezési politikák hatását. Olyan megoldást azonban, amely a lágyszárú biomassza beszállítás optimális ütemezésének (szállítás- és kamionütemezés) megadását célozza, nem találtam az irodalomban. Ehelyett ismertetek néhány olyan optimalizáló modellt, melyeket más biomassza típusok esetére dolgoztak ki, majd bemutatom az úgynevezett beton kiszállítási problémát (Concrete Delivery Problem – CDP), amely jellemzői alapján a legközelebbi rokonságot mutatja a dolgozat témáját adó feladattal.

3.4.1 Biomassza beszállítás szimuláció

Vaatainen és mtsai (2005) egy finnországi CHP erőmű kapcsán elemezték a tüzelőanyagot beszállító járművek sorbanállási folyamatát diszkrét eseményvezérelt szimuláció segítségével. A logisztikai rendszer egyes paramétereinek módosításával tesztelték a járművek várakozási idejének és a két lerakodó állomás kihasználtságának változását. A modellben két járműtípust és két tüzelőanyagot (faapríték és tőzeg) különböztettek meg, melyeket egy közös raktárból szállítottak az erőműbe. Az esettanulmány októbertől áprilisig tartó időszakában kb. 10 000 fuvart kellett beérkeztetni, amihez 30 jármű állt rendelkezésre. A különböző logisztikai scenáriók szimulálása után azt találták, hogy – amennyiben az a gyakorlatban kivitelezhető – a járművek egyenletes ütemezése javítja leginkább a rendszer hatékonyságát.

Iannoni és Morabito (2006) is diszkrét eseményvezérelt szimulációt alkalmaztak a cukornád beszállítási folyamat elemzésére Brazíliában, Sao Paulo állam egy biofeldolgozója esetén. A biofeldolgozó érkeztetési folyamataira fókuszálva vizsgálták, hogy különböző logisztikai konfigurációk és diszpécser szabályok miként befolyásolják a járművek átlagos várakozási idejét, az átlagos lerakodási rátát és a cukornád malmok terhelését. A modell nyolc lerakodó sort és négy járműtípust tartalmazott, a diszpécser szabályok pedig figyelembe vették a malmok kapacitását, a köztes raktárak aktuális állapotát, valamint a beérkező alapanyag feldolgozottsági szintjét is. A járműveknek kb. 20 perces átlagos várakozási idővel kellett számolniuk a leghatékonyabb scenárió esetén.

Doktori disszertációjában Hajnal (2007) egy élelmiszeripari ellátási lánc kapcsán elemezte a sztochasztikus paraméterekkel jellemzett beszállítási folyamatot (kamionok beérkeztetése és lerakodása), valamint az ebből fakadó sorbanállási problémát. A szimulációs eszközbe épített optimalizáló modul segítségével a különböző feladatokat ellátó beosztottak optimális számát is

meghatározta az általános sorbanállási teljesítménykritériumok (például átlagos várakozási idő, rakodók kihasználtsága) javítása érdekében.

Ravula és mtsai (2008b) a gyapot begyűjtés logisztikai rendszerét vizsgálták Virginia délkeleti részén, ahol a kb. 80 napnyi szezon alatt közel 6000 termelőtől történik az alapanyag feldolgozóba szállítása. A szerzők diszkrét eseményvezérelt szimulációt alkalmaztak különböző ütemezési politikák hatékonyságának elemzésére. A modellben valószínűségi változóként kezelték a naponta előállított gyapot óriásbálák számát, a szállítási időket (a kamionok lehetséges meghibásodása miatt jobbra hosszan elnyúló, de felső korláttal rendelkező eloszlást alkalmazva) és a bálák feldolgozási rátáját a központi magtalanítóban. Az időjárás és a nagyobb közlekedési események explicit hatását nem modellezték, helyette a szimulációt az átlagos szállítási idő (az alkalmazott eloszlás egy paramétere) különböző értékei mellett többször lefuttatták. A beszállítás szervezése két fő elemből állt. A termelők jelezték, ha elkészültek bizonyos számú bálával, a biofeldolgozó pedig FIFO politikát alkalmazva ütemezte a begyűjtést: a termelőket a bejelentés sorrendjében látogatták meg, és egy adott termelőtől az összes alapanyagot beszállították mielőtt a következőre váltottak volna. Az elemzések során feltételezték, hogy a biofeldolgozónál nincs felső korlátja a tárolható gyapotbálák számának, és a magtalanítási folyamatot csak akkor indították el, ha a készlet szint elérte egy előre definiált küszöbértéket. A szimulációk során konstans méretű járműflotta meglétét tételezték fel.

A két új ütemezési politika az „elsőként a legrövidebb” (shortest first) és az „elsőként a leghosszabb, másodikként a legrövidebb” (longest first, shortest second) voltak, melyekkel az eredeti FIFO ütemezést váltották ki. Az első esetben a termelőkhöz tartozó szállítási idők növekvő sorrendjében került beszállításra az alapanyag. A másodikban pedig mindaddig a legtávolabbi termelőktől gyűjtötték be a gyapotot, míg a biofeldolgozó készlet szintje el nem érte a feldolgozást indító küszöbértéket, majd ezután váltottak az első politikára. Bár az „elsőként a legrövidebb” politika esetén a magtalanító hamar elindíthatta a feldolgozást, és az első hetekben biztosítva volt a folyamatos gyapotellátás, a szezon második felében – a hosszabb szállítási idők miatt – többször is alapanyaghiányba ütközött a biofeldolgozó. A második ütemezési politika esetén sikerült biztosítani a folyamatos alapanyag-ellátást, a magtalanító folyamatos működését, és a kamionok hasznosítási foka is 100%-ra nőtt. A szerzők közöltek egy egyszerűsített hátizsák feladatot is, egyetlen kamion esetére redukálva a problémát. Itt feltételezték, hogy az óriásbálák már a szezon elején rendelkezésre állnak, és ezek szállítási napokhoz rendelését adták meg: az adott napi fuvarokból adódó teljes szállítási idő nem léphette túl a kamion időben kifejezett kapacitását. Célfüggvényként a fuvarral rendelkező napok számát minimalizálták.

Ravula és mtsai (2008a) egy másik cikkükben már a lágyszárú biomassza beszállítás problémáját elemezték Virginia állam Piedmont régiójában ugyancsak diszkrét eseményvezérelt szimulációval. Most is két ütemezési politika hatását vizsgálták a járműflotta méretére, kihasználtságára valamint a biofeldolgozó készlet szintjére fókuszálva. Míg azonban a gyapotbeszállítás esetén önrakodó kamionok szállítják az alapanyagot a kb. 80 napos szezon folyamán, addig a biomassza gyűjtése és feldolgozása hat hónapon keresztül tart, valamint fel- és lerakodó eszközökre is szükség van a depóknál illetve a biofeldolgozóban. A biofeldolgozó kereslete és a felrakodók kapacitásának (napi 15 fuvar) ismeretében a szerzők kilenc mobil felrakodó eszközzel kalkuláltak. Valójában ezen eszközök depók közötti mozgatása kontrollálja a kamionok ütemezését is. Egy felrakodó akkor hagyhatja el aktuális depóját, ha onnan az összes alapanyag beszállításra került, „költöztetése” pedig egy nap kiesést jelent (az esettanulmányban kb. 100 depó szerepelt). Egy adott depóból a 15

fuvarnyi alapanyagot beszállító kamionok száma a depót jellemző szállítási időtől függ (biofeldolgozóhoz közeli depók esetén kevesebb, míg távolabbi depók esetén több kamion szükséges). Végül, a kilenc felrakodóhoz rendelt kamionszám adja meg minden egyes napra a járműflotta-igényt. A fentiek alapján a probléma két fő szekvenciális döntési szituációból áll: elsőként az ütemezési politikának megfelelően megtörténik a depók felrakodókhoz rendelése, majd a felrakodók útvonaltervezése saját depóhalmazukon.

Az első hozzárendelési politika az „elsőként a legrövidebb szállítási idő, majd a leghosszabb szállítási idő” (shortest travel time first and longest travel time next) nevet kapta, ahol az első négy felrakodóhoz a szállítási idők növekvő, a maradék öt felrakodóhoz pedig azok csökkenő sorrendjében rendelték a – még nem lekötött – depókat, a felrakodók napi 15 fuvarnyi kapacitását figyelembe véve. A hozzárendelés után egy TSP szolverrel adták meg a felrakodók pontos útvonalát a saját depók között. A beszállítás szimulációja során a biofeldolgozónak egyszer sem kellett leállnia alapanyaghiány miatt, a maximális készlet szint pedig három napnyi kereslet szintjén alakult. A szükséges járműflotta mérete 33 kamion, átlagos hasznosítási foka pedig 70% körül mozgott. A három lerakodó berendezés előtti leghosszabb várakozási sor négy kamionból állt, míg egy tipikus napon ez a szám kettő volt. A „szektor-alapú felrakodó hozzárendelés” (sector-based loader assignment) politika során először a teljes gyűjtő területet öt szektorra osztották, majd az első négy szektorhoz két-két, az utolsóhoz pedig egy felrakodót rendeltek. A felrakodó párok egyike a biofeldolgozótól legmesszebbi, míg a másik a legközelebbi depótól indult a szezon első napján. A pontos útvonalat itt is a TSP szolver segítségével adták meg. Általánosságban elmondható, hogy ezen politika eredményei kissé rosszabbak voltak az első politikához képest: nagyobb járműflottára volt szükség és hosszabb sor alakultak ki a lerakodók előtt.

3.4.2 Biomassza szállítás- és kamionütemezés

Milan és mtsai (2006) a cukornád betakarítás és beszállítás napon belüli ütemezéséhez alkottak MIP modellt, egy órás tervezési periódusokat alkalmazva. A biofeldolgozó folyamatos ellátásához közúti (a nap egy részében) és vasúti szállítási kapacitás állt rendelkezésre. Az optimalizálás célja a szállítási költségek minimalizálása a biofeldolgozó keresletének kielégítése és az alapanyag minőségének megfelelő szinten tartása mellett. A modell fő döntési változói az egyes relációkon óránként szállított és az egyes termőföldeken óránként betakarított alapanyag mennyisége. A szerzők lehetővé tették a betakarításhoz felhasznált mobil eszközpark termőföldek közötti mozgását is napi egy alkalommal. A részletes ütemterv ellenére a modell nem tér ki a járművek menetrendjének meghatározására: szállítási tevékenységre vonatkozó outputként óránkénti szállítási kapacitást-igényt nyerünk.

Judd és mtsai (2012) korábban már többször hivatkozott tanulmánya a bálázott, lágyszárú biomassza beszállításának bizonyos elemeit optimalizálja. Egyik modelljükben a depók telepítésének problémáját integrálták a mobil felrakodó berendezések depók közötti mozgásának ütemezésével (Biomass Logistics Problem-Mobile – BLP-M). A feladatot két lépcsőben oldották meg. Először meghatározták a depók helyszínét és a depó-termőföld hozzárendelést, majd – többszörös aszimmetrikus utazóügynök problémaként (multiple asymmetric traveling salesman problem, mATSP) modellezve – megadták a felrakodó berendezések számát és depók közötti útvonalát. Az alkalmazott modellek jellegzetessége, hogy a mobil felrakodók csak akkor hagyhatnak el egy depót, ha onnan már az összes bálát beszállították, valamint, hogy a kamionok egyszerre csak egy depóból szállíthatnak alapanyagot.

Az erdészeti rönkszállítás ütemezésének (Log Truck Scheduling Problem) célja, hogy az utak mellett felhalmozott rönkkínálatból minimális költség mellett elégítse ki a keresleti pontokon felmerülő igényeket (Palmgren 2005). Bár ez a feladattípus látszólag nagyon hasonlít a lágyszárú biomassza beszállítási problémához, azonban számos megkülönböztető jellemzővel is bír: a kínálat különböző rönktípusokból álló választékkal rendelkezhet, a járműflotta különböző típusú járművekből állhat, a keresleti helyeknél időablakokat jelölhetnek ki a rakomány fogadására, stb. A feladat fókuszában a járművek által követendő útvonalak kijelölése áll. Ennek megfelelő, a rönkszállítási probléma a járatszerkesztési feladat egy általánosítása.

3.4.3 Beton kiszállítás ütemezés

A különböző szállítás- és kamionütemezési problémák (transportation and truck scheduling), mint például az iskolabusz körúttjárat tervezés (school bus routing (Park és Kim 2010)) vagy az olaj tartályhajó ütemezés (oil tanker scheduling (Christiansen és mtsai 2013)) általában rokonságot mutatnak a járatszerkesztési problémával (vehicle routing). Ezen feladatok legfőbb célkitűzése, hogy optimális útvonalat adjanak a járművek számára, bizonyos kiterjesztésekben kötelező időablakokat előírva a kínálati és keresleti pontok meglátogatásához. Ezzel szemben, a LBEL szállításütemezési probléma kapcsán nagyobb hangsúlyt kap a kamionok speciális ütemezése, a fuvarok időbeli összehangolása. Ennek legfőbb okai az erőmű korlátozott raktárkapacitása, valamint a lerakodási folyamatban tapasztalható szűk keresztmetszet. A szállításütemezési irodalomban egyetlen olyan modellcsaládot találtam, ami hasonló fókusszal rendelkezik, ez pedig a beton kiszállítási probléma (Concrete Delivery Problem).

Durbin és Hoffman (2008) egy betonkeverék előállító vállalat számára dolgoztak ki döntéstámogató modelleket, a keresleti helyekre történő kiszállítás tervezési és ütemezési döntéseinek javításához. A betonkeverék kiszállítása bonyolult feladat, hiszen

- a beton rendkívül „romlandó” áru, néhány órás késés esetén akár meg is köthet a szállító járműben,
- a megrendelések kiszámíthatatlanok és változékonyak, az előzetes megrendelések 90%-át módosítják vagy törlik,
- a betongyártó vállalatok kapacitásukat meghaladó mennyiségű megrendelést fogadnak el a várható lemondások miatt,
- a megrendelések egy része több jármű összehangolt munkáját igényli,
- a járművek megérkezésekor a megrendelő nem áll minden esetben készen a beton felhasználására, de városi környezetben el kell kerülni azt, hogy a járművek a felhasználás helyszínén várakozzanak,
- a nagyobb forgalomnak kitett városi területeken jelentős mértékű a szállítási idő változékonysága.

A kidolgozott modellekben homogén járműpark meglétét feltételezték, de a szállítandó betonkeverék különböző összetételű lehet. Az ütemezés során figyelembe vették azt is, hogy a gyárak véges kapacitással rendelkeznek a járművek megtöltése tekintetében. A szerzők több döntési szituációt különítettek el: megrendelés elfogadás a következő napokra, gépjárművezetők munkába érkezésének időpontja a következő napra, járművek ütemezése a következő napra, valós-idejű megrendelés elfogadás adott napra, járművek valós-idejű újraütemezése.

Ezen feladatban nem elegendő az, ha csupán a járművek útvonalának meghatározására fókuszálnak: a gyáraknál és a felhasználói oldalon tapasztalható szűk keresztmetszet, valamint a kamionok összehangolásának igénye miatt a probléma olyan reprezentációjára volt szükség, ami lehetővé teszi azok részletes ütemezését. A valós-idejű újraütemező modellben például egyperces tervezési periódusokat alkalmaztak kétórás tervezési horizont mellett, és minden öt percben újrafuttatták a modellt. Ehhez az úgynevezett dinamikus idő-tér hálózat modellt (dynamic time-space network) alkalmazták, ahol a hálózat csomópontjai egy fizikai/logikai helyszín és egy időpont kombinációját jelentik. A csomópontokat összekötő élek az áramlási, mozgási lehetőségeket írják le, figyelembe véve a térbeli és időbeli korlátokat is. A LBEL szállításütemezési modellek leírásához én is az idő-tér hálózati reprezentációt használom majd.

A fenti cikkhez hasonlóan Yan és mtsai (2008) is az idő-tér hálózati modellt alkalmazták az integrált készbetonkeverék gyártás és kiszállítás problémájának leírásához, ami alapján mellékfeltételes vegyes egészértékű hálózati folyam modellt írtak fel. Kinable és mtsai (2014) áttekintették és rendszereztek a beton kiszállítási probléma eddig megjelent variánsait. A közös elemeket megtartva, az egyedi feltételeket pedig kiszűrve alkottak meg egy alapmodellt a problémára.

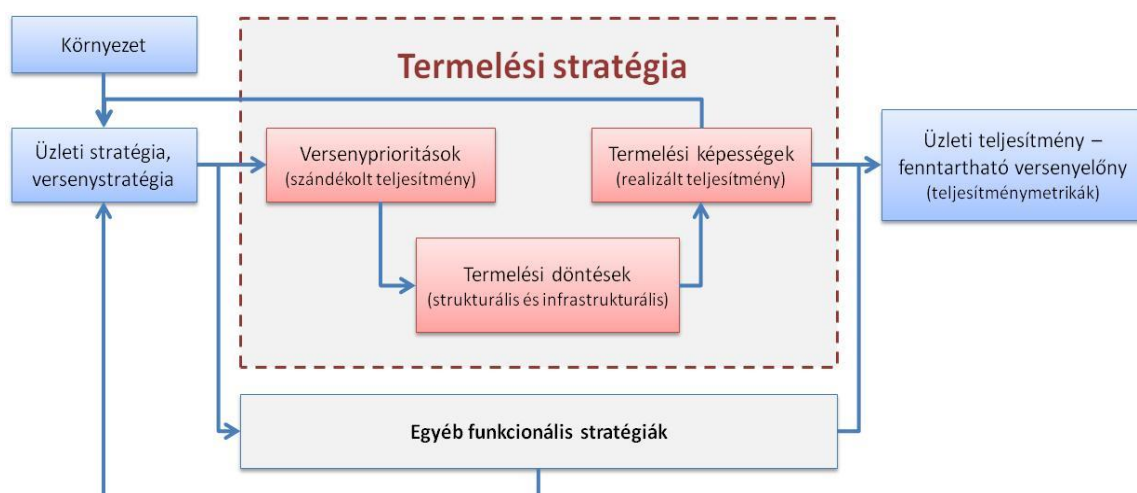
4 A lágyszárú biomassza ellátási láncról elvárt stratégiai képességek

4.1 Termelési stratégia, versenyprioritások és teljesítményértékelés

A 'termelési' jelzővel a továbbiakban az angol 'operations' kifejezésre utalok, ami alatt a termelési-logisztikai tevékenységek összességét értem. Ahogy a dolgozatban korábban is tettem, az alapanyag-termeléstől az erőművi energiatermelésig tartó tevékenységsor kapcsán nem jelölök ki szervezeti határokat, a teljes értékláncot egy egységként kezelem mind a stratégiai fókusz meghatározása, mind a kapcsolódó menedzsment kérdések tárgyalása során. Ez illeszkedik azon elváráshoz, miszerint az ellátási lánc tagjai között stratégiai integrációnak kell létrejönnie, azaz ugyanazon célokkal és stratégiai fókusszal kell rendelkezzenek a vevőkiszolgálást illetően.

A termelési stratégia témakörének tárgyalása nem hagyható el, hiszen az előző fejezetben bemutatott döntési szituációk kezelése az adott funkcionális stratégia, jelen esetben a termelési stratégia szerint, azt támogatva kell, hogy megtörténjen. A funkcionális stratégiák viszont a teljes szervezet/ellátási lánc kompetitív stratégiájából vezethetők le. Ahogy Vörös (2010, 40) írja: „A termelési stratégia cselekvések összessége, melynek célja olyan termelési rendszer létrehozása, mely az üzleti stratégia megvalósítását szolgálja”, így járulva hozzá a szervezet hosszú távú sikerességéhez. Ezen elv a dolgozat központi témáját adó szállításütemezési döntések kapcsán a következőképpen jelenik meg: a LBEL versenystratégiájából következő termelési stratégia határozza meg az alkalmazandó döntési modelleket, és az azokba építendő célokat, feltételeket. Jelen fejezetben tehát megvizsgálom, hogy a lágyszárú biomassza ellátási láncnak milyen termelési képességekkel kell rendelkeznie, és azok megszerzéséhez miként járulhatnak hozzá a szállításütemezési döntések.

Doktori értekezésében – ahol többek közt a termelési stratégia és a vállalati versenyképesség kapcsolatát elemezte empirikus módon – Városiné Demeter (2000) széleskörű irodalmi összefoglalót adott az üzleti és termelési stratégia, a versenyprioritások és termelési kompetenciák, valamint a termelési funkció döntési területei témakörében, melyre erőteljesen támaszkodtam jelen szakasz kidolgozása során. Ezen tényezőik kapcsolatrendszerét illusztrálja a 4.1 ábra.



4.1 ábra Üzleti és funkcionális stratégiák kapcsolatrendszere Szász és Demeter (2012) alapján

Egy ellátási lánc által követett, a külső környezet és a szervezeti képességek alapján kidolgozott általános versenystratégia – kiterjesztve Porter (1980) vállalatokra megfogalmazott elméletét –

lehet költségvető, megkülönböztető (például termékben, minőségben, imázsban, szolgáltatásokban) vagy fókuszáló. A költségvető stratégia mellett, a lehetséges megkülönböztető stratégiák között is találunk olyanokat, melyek elsődlegesen a termelési funkcióra, a termelési képességekre építve akarják fejleszteni az ellátási lánc versenyképességét. A kiválasztott versenystratégia és a funkcionális stratégiák között a versenyprioritások (competitive priorities) teremtik meg a kapcsolatot. A versenyprioritásokra jelen dolgozatban úgy tekintek, mint a szervezet termékeivel, tevékenységével kapcsolatos fogyasztói elvárások (vevőérték dimenziói: például alacsony ár, megbízhatóság, gyorsaság) teljesítéséhez szükséges belső teljesítménycélok, szervezeti képességek. A versenyprioritások tehát azok a dimenziók, melyek mentén egy szervezet versenyezni akar egy megcélzott piacon. Ezen képességek megszerzését írja elő a versenystratégia a funkcionális területek számára, melyek a strukturális és infrastrukturális döntések által realizálják azokat. Egyes versenyprioritások ekvivalensek bizonyos vevőérték dimenziókkal (például megbízhatóság, gyorsaság), míg mások inkább belső képességekre utalnak (például költséghatékonyság).

Számos publikáció – mind teoretikus, mind empirikus – született a termelési funkcióhoz kötődő versenyprioritásokról, valamint a közöttük fellelhető kapcsolatrendszeréről. Ezek időbeli fejlődését mutatom be az alábbiakban néhány tanulmány kiemelésével. Elsőként Skinner (1969) hívta fel a figyelmet arra, hogy a termelési stratégiát össze kell kapcsolni mind a szervezet versenystratégiájával, mind a többi funkcionális stratégiával, és azt a felsővezetők látókörébe kell emelni mint a versenyképességhez eredendően hozzájáruló területet. Tanulmányában négy olyan tényezőt (még nem versenyprioritásnak nevezve azokat) jelenített meg, melyekre a termelési rendszernek befolyása van: termelékenység, szolgáltatások, minőség és megtérülés (ROI). Ezeket a tényezőket a termelési stratégia eredményességének értékelése érdekében teljesítménymutatókon keresztül mérni is kell. Egy későbbi cikkében (Skinner 1974) teljesítménykritériumokként a rövid szállítási időt, a kiváló minőséget és megbízhatóságot, a megbízható szállítást, a gyors termékfejlesztést, a mennyiségi rugalmasságot és az alacsony árakat említette. Wheelwright (1978) a hatékonyságot, a minőséget, a megbízhatóságot és a rugalmasságot tekintette a legfontosabb kritériumoknak a termelési rendszer kapcsán.

Hayes és Wheelwright (1984) vezették be a versenyprioritások fogalmát. Négy alapvető versenyprioritást vázoltak fel: költség, minőség, szállítás (megbízhatóság és gyorsaság), rugalmasság. Ezen négy tényező alkalmazása általánosan elfogadottá vált, azonban találunk szép számmal olyan tanulmányokat is, melyekben kisebb-nagyobb mértékben módosították ezt a felsorolást. Ward és mtsai (1990) például az innovációval, míg Díaz-Garrido és mtsai (2011) az értékesítés utáni szolgáltatásokkal és a környezetvédelemmel egészítették ki az eredeti négy pontot. Meg kell említeni, hogy a versenyprioritások idővel gyűjtőfogalmakká váltak, azokat az egyes szerzők több-kevesebb (mérhető) aldimenzióra bontották szét. Kathuria (2000) például a következő struktúrát használta egy empirikus kutatás keretében (4.1 táblázat):

| Versenyprioritás | Aldimenziók |
|-------------------------------------|--|
| Költség (Cost) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Termelési költségek ▪ Munkaerő termelékenysége ▪ Berendezések üzemeltetésének hatékonysága |
| Rugalmasság (Flexibility) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Terméktervek termelésbe vonásának gyorsasága ▪ Kapacitások rövid távú illesztésének képessége ▪ Kiszállítások ütemezésében bekövetkező módosulások kezelése ▪ Termékmix változásának gyors kezelése |

| | |
|---|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Termékek egyéniesítésének képessége |
| Megfelelőség (Quality of conformance) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Végtermékek specifikációnak való megfelelése ▪ Termelés pontossága ▪ Termelés konzisztenciája |
| Tervezési minőség (Quality of design) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tartós és megbízható termékek előállítása ▪ Vevői igények alapján a terméktervek módosítása ▪ Vevői elvárások és preferenciák teljesítése, felülmúlása |
| Szállítás (Delivery) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Átfutási idő a termelésben ▪ Szállítási határidők betartása ▪ Gyors szállítás |

4.1 táblázat Versenyprioritások és aldimenzióik Kathuria tanulmányában

A termelési versenyprioritások közötti kapcsolatrendszer megítélése is sokat változott Skinner (1969) tanulmánya óta. Ő határozottan amellett érvelt, hogy az egyes termelési képességek csak egymás kárára javíthatók, azaz trade-off kapcsolat van közöttük. Ennek megfelelően a verseny és termelési stratégiában egy képességre kell koncentrálni, a többit fel kell áldozni. Nakane (1986) piramis, valamint Ferdows és mtsai (1986) homokkúp modellje azonban azt állítja, hogy a versenyprioritások bizonyos sorrendiség mellett egymást erősítve fejleszthetők.

Hill (1993) a versenyprioritásokat két csoportra osztotta: képesítő kritériumnak hívta azokat, melyek az adott piacon való jelenlét minimumfeltételeit jelentik, míg rendeléshelyező kritériumnak azokat, melyek miatt a fogyasztók az adott terméket választják. Corbett és Van Wassenhove (1993) látva, hogy a versenyprioritásokat az irodalomban néhol a (külső) piaci versenyképesség mutatóiként (a termék értékelésére felhasznált dimenziók), máskor viszont a (belső) termelési kompetenciák mérésére használják, azt ajánlották, hogy a fogalom tisztázása érdekében azokat válasszák szét a fenti két kategóriának megfelelően.

A versenyprioritások aldimenziókra bontása, valamint a vállalati információs rendszerek fejlődése lehetőséget teremtett arra, hogy az aldimenziókhoz kvantifikálható mérőszámokat rendeljenek. Ezzel párhuzamosan számos, a termelési funkció teljesítményének értékelésére használt mutatószámrendszer is kidolgozásra került (Városiné Demeter 2000,40), melyek között találunk a versenyprioritások koncepciójából kifejlődő, de más alapokról induló metrikarendszereket is (számviteli, pénzügyi mutatókat alkalmazó (Kurien és Qureshi 2011), bottom-up jellegű (Chenhall és Langfield-Smith 2007), balanced scorecard alapú (Bhagwat és Sharma 2007) megoldások). A mutatószámrendszerek azonban nem lehetnek öncélúak, végső soron a kitűzött stratégiai irányokhoz való kapcsolódást, az annak elérése érdekében tett erőfeszítések eredményességét, valamint a további fejlesztési lehetőségeket kell megjeleníteniük és kommunikálniuk (Melnik és mtsai 2004). A termelési stratégia és a termelési teljesítmények értékelésére hivatott metrikarendszerek illesztéséhez De Lima és mtsai (2009) ajánlottak egy 16 lépésből álló eljárást.

A következő két alfejezetben két eltérő megközelítést alkalmazva elemzem, hogy a lágyszárú biomassa ellátási láncnak mely stratégiai képességekre, versenyprioritásokra kell koncentrálnia a sikeres működés érdekében. Elsőként olyan, kimondottan ellátási láncokra kidolgozott metrikarendszereket mutatok be, melyek a hagyományos versenyprioritás-koncepcióra épülnek és megvizsgálom, hogy ezek miként adaptálhatók a LBEL esetre. A rákövetkező alfejezetben felvázolom, és a LBEL kapcsán alkalmazom a Fisher (1997) nevével fémjelzett végtermék-ellátási lánc illesztési elméletet, mely szerint elsődlegesen a végtermék jellemzői határozzák meg az ellátási láncból elvárt stratégiai képességek körét.

4.2 Ellátási lánc versenyprioritások a teljesítményértékelési rendszerekben

A Supply Chain Council által kidolgozott SCOR folyamatmodellt (SCC 2010) már használtam a korábbiakban. Ezen modell tartalmaz egy hierarchikus teljesítményértékelési rendszert (SCOR Performance) is: az öt attribútumhoz (versenyprioritások) rendelt tizenegy stratégiai metrika (1. szintű metrikák, Key Performance Indicators) dezaggregálásával a SCOR folyamatemekhez rendelhető mérőszámokat nyerünk. Maguk az attribútumok nem mérhetőek, a stratégiai irányok kifejezésére szolgálnak. A metrikák viszont ezen stratégiai képességek aktuális szintjét számszerűsítik. Fontos megemlíteni, hogy a SCOR fókuszának megfelelően a metrikarendszer egy adott szervezet ellátási lánc funkciójára (anyagáramlási folyamataira) koncentrál (4.2 táblázat):

| Attribútum irányultsága | Attribútumok | Leírás |
|-------------------------|------------------------------------|--|
| Fogyasztó fókuszú | Megbízhatóság (Reliability) | Képesség arra, hogy a feladatok az elvárásoknak megfelelően kerüljenek végrehajtásra (időben, mennyiségben, minőségben). |
| | Gyorsaság (Responsiveness) | Képesség a feladatok gyors végrehajtására (ciklusidők). |
| | Agilitás (Agility) | Képesség a változásra (adaptability – alkalmazkodás) és a külső hatásokra való gyors reagálásra (flexibility – rugalmasság). |
| Szervezet fókuszú | Költség (Costs) | Képesség a feladatok alacsony költségű végrehajtására. |
| | Hatékonyság (Assets) | Képesség az eszközök hatékony hasznosítására. |

4.2 táblázat A SCOR teljesítményértékelés attribútumai

Az attribútumokhoz tartozó stratégiai metrikákat a 4.3 táblázat mutatja be:

| Attribútumok | Stratégiai metrikák |
|------------------------------------|---|
| Megbízhatóság (Reliability) | <ul style="list-style-type: none"> Tökéletesen kielégített megrendelések aránya |
| Gyorsaság (Responsiveness) | <ul style="list-style-type: none"> Megrendelések kielégítésének ciklusideje |
| Agilitás (Agility) | <ul style="list-style-type: none"> Ellátási lánc rugalmassága kedvező bizonytalanság mellett (20%-os forgalomnövekedésre való fenntartható reagálás időigénye) Ellátási lánc alkalmazkodóképessége kedvező bizonytalanság mellett (30 nap alatt, fenntartható módon elérhető maximális kapacitásnövekedés mértéke) Ellátási lánc alkalmazkodóképessége kedvezőtlen bizonytalanság mellett (30 nappal a kiszállítást megelőzően a maximálisan elviselhető rendeléscsökkenés mértéke) Ellátási lánc kockázatosított érték (VaR) |
| Költség (Costs) | <ul style="list-style-type: none"> Ellátási lánc menedzsment költsége Értékesített áruk költsége |
| Hatékonyság (Assets) | <ul style="list-style-type: none"> Készpénz-konverziós ciklus (cash-to-cash cycle) Ellátási lánc eszköz-arányos megtérülés Működő tőke arányos megtérülés |

4.3 táblázat A SCOR teljesítményértékelés stratégiai metrikái

Az agilitás attribútumnál többször használt 'fenntartható' jelző arra utal, hogy a beavatkozások nem okozhatnak szignifikáns növekedést az egy termékegységre jutó költség tekintetében. Amint a táblázatokból látható, a SCOR metrikarendszere magán viseli a versenyprioritások kapcsán korábban bemutatott történeti fejlődés jeleit: a hierarchikus struktúra legfelsőbb szintjén a stratégiai képességeket kifejező attribútumokat találjuk, melyeket megkülönböztethetünk fogyasztói és szervezeti irányultságuk alapján.

A lágyszárú biomassa ellátási lánc speciális volta miatt a fenti attribútumok sajátos értelmezést nyernek. A Megbízhatóság attribútum tekintetében az erőműbe szállított biomassa kapcsán előírt minőségi követelmények betartása a hagyományos módon értelmezhető, a határidőre történő szállítás helyett azonban a folyamatos alapanyag-ellátás biztosítása jelenik meg teljesítendő kritériumként. Ennek megfelelően, nélkülözhetetlen mérni az alapanyaghiánnyal terhelt időszakok hosszát és gyakoriságát (az átalakítási folyamat elindítása és megállítása számottevő plusz költséget jelent az erőmű számára (Ravula és mtsai 2008b)). Az előzőekkel összhangban, a SCOR szerinti Gyorsaság sem tekinthető releváns attribútumnak az erőmű mint vevő esetén. A LBEL logisztikai rendszerétől elvárt gyorsaság inkább a váratlan eseményekre történő azonnali válaszadást jelenti, ami a 4.3 táblázatban az Agilitás attribútumhoz köthető. Szem előtt tartva, hogy az erőmű tervezett kereslete – a technológia kötöttsége miatt – konstansnak tekinthető, az Agilitás attribútum kapcsán a következőképpen értelmezem a rugalmasság és alkalmazkodás képességét. A Rugalmasság azt jelenti, hogy az ellátási rendszer képes reagálni a rövid vagy hosszú távon ható nem várt események bekövetkezésére, amivel biztosítja a szokásos üzletmenet fenntartását. Ilyen események lehetnek például a váratlan közlekedési szituációk vagy időjárás körülmények okozta kimaradások, csúszások a beszállításban, vagy éppen a szerződő alapanyag-termelők számának csökkenése. Az alkalmazkodóképesség azt jelenti, hogy az ellátási lánc képes a piaci igények, struktúrák változására reagálni. A biomasszára alapozott energiatermelő rendszerek alkalmazkodóképessége erősen korlátozott, ami főként a kazán speciális technológiájából, az infrastrukturális beruházások nagy költségéből és azok hosszú megtérülési idejéből fakad. Az energetikai iparágban hosszú távú szerződések, törvényi szabályozások alkalmazásával minimalizálják az energia-előállító láncok kockázatát a piaci struktúrák változására vonatkozóan. A Költség és Hatékonyság attribútumok a fenti értelmezésük mellett is relevánsak maradnak, ahol – stabil árbevétel feltételezése mellett – a működési hatékonyság fejlesztésének közvetlen célja az ellátási folyamatok költségének csökkentése. A továbbiakban – ahol ez nem rontja az elemzések érthetőségét – ezen két attribútumot Költséghatékonyság címke alatt összevontan kezelem.

Chan (2003) hét attribútumra épülő metrikarendszert alakított ki, és azokhoz pénzben, időegységben vagy naturáliában mérhető teljesítménymutatókat rendelt, melyek közül az alkalmazó szervezetnek kell kiválasztania a számára releváns mérőszámokat. Az attribútumok közül kettő kvantitatív (Költség, Erőforrás hasznosítás), míg öt kvalitatív (Minőség, Rugalmasság, Információmegosztás, Bizalom, Innovativitás) jellegű (4.4 táblázat):

| Attribútumok | Aldimenziók | Teljesítménymutatók |
|--|----------------------|--|
| Költség (Cost) | – | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Disztribúciós költségek ▪ Termelési költségek ▪ Készletezési költségek ▪ Raktározási költségek ▪ Adók és támogatások ▪ Immateriális költségek ▪ Általános költségek ▪ Hosszú távú költségek |
| Erőforrás hasznosítás (Resource utilization) | – | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Munkaerő, gépek, kapacitások, energia hasznosítási foka |
| Minőség (Quality) | – | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Regisztrált vevői panaszok száma |
| | Idő (Time) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Megrendelés kiszolgálásának időigénye ▪ Termék átfutási ideje ▪ Határidőre történő szállítás aránya ▪ Azonnal kielégített megrendelések aránya ▪ Készlethiány valószínűsége |

| | | |
|--|------------------------------------|--|
| | | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pontos termékszállítás aránya |
| Rugalmaság (Flexibility) | Input (Input) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Munkaerő által végrehajtott feladattípusok száma ▪ Rugalmasabb gép alkalmazásából fakadó hatékonyságnövekedés |
| | Folyamat (Process) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Belső anyagáramlási útvonalak száma ▪ Alternatív termelési útvonalakkal rendelkező termékek száma ▪ Alternatív műveleti sorrenddel rendelkező termékek száma |
| | Output (Output) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Output mennyiségi változtathatóságának mértéke ▪ Termékmix változtathatóságának mértéke ▪ Kiszállítási idő lerövidíthetőségének mértéke |
| | Fejlesztés (Improvement) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Termékmódosítási lehetőségek száma ▪ Új termék termelésbe vonásának költsége ▪ Lehetséges kapacitásbővítés nagysága |
| Információmegosztás (Visibility) | – | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Termékmódosítás és termelésbe vonás között eltelt idő ▪ Hibás termelés aránya új termék bevezetése után |
| Bizalom (Trust) | – | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Hibás szállítások aránya az ellátási lánc következő tagja számára |
| Innovativitás (Innovativeness) | – | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Új termékek száma adott időszak alatt ▪ Termelés átfutási idejének csökkenése új technológia bevezetése által |

4.4 táblázat Attribútumok és aldimenziók Chan tanulmányában

A SCOR modellhez képest a Rugalmasság értelmezése, valamint három új attribútum – Információmegosztás, Bizalom és Innovativitás – megjelenése számít újdonságnak. A Költség, Erőforrás hasznosítás, valamint Minőség attribútumok megfeleltethetők a Költség, Hatékonyság és Megbízhatóság-Gyorsaság SCOR képességeknek. A Rugalmasság Channél részben szervezeti irányultságot kap (Input, Folyamat és Fejlesztés aldimenziók), és nem csak a mennyiségi, de a minőségi (termék-) módosítási képességet is magában foglalja. Az Input és Folyamat aldimenziók belső rugalmasságra koncentráció mérőszámai a bizonytalanság kezelésére alkalmas eszközök kidolgozására adhatnak ötleteket (például alternatív szállítási útvonalak alkalmazása). A termékmix változtatása, a termékfejlesztés azonban nem releváns tevékenység a LBEL esetén. Az Információmegosztás attribútumhoz a lágyszárú biomassza ellátási láncban a termékfejlesztéssel kapcsolatos karakterisztikák mérése helyett azt a képességet társítom, amely biztosítja, hogy a tagok valós idejű információkkal rendelkezzenek a logisztikai rendszer aktuális állapotáról, valamint hogy gyors/azonnali jelzést kapjanak a váratlan események bekövetkezéséről (tranzakciós információs rendszer). Ezen attribútumhoz köthetjük a fenti információkat felhasználó, a teljes ellátási láncot átfogó előrejelzési, döntéshozatali rendszer meglétét is (analitikai információs rendszer). A Bizalom attribútum az ellátási lánc tagjai közötti hosszú távú együttműködést, célrendszerük összehangolását, a keletkező jövedelem és felmerülő kockázatok megosztását segíti elő. Az Információmegosztás és Bizalom olyan támogató képességek, melyek megalapozhatják mind a fogyasztó fókuszú, mind a szervezet fókuszú versenyprioritások fejlesztését. Az Innovativitás attribútum teljesítménymutatóinak a technológiai (például a logisztikai rendszer eszköz- és eljárásfejlesztése) és a szervezési innovációk (például a döntéshozatali rendszer fejlesztése) megvalósításának képességét kell mérniük.

Saarijarvi és mtsai (2012) egy olyan módszer kialakítását tűzték ki célul, mellyel felmérhető az ellátási lánc tagjai közötti stratégiai illeszkedés foka: a páros összehasonlítások módszerét alkalmazva kérdezték meg egy ellátási lánc meghatározó döntéshozóit a különböző versenyprioritások relatív fontosságáról, melynek segítségével megállapították a láncon belüli

stratégiai (in)konzisztencia mértékét. Az irodalom áttekintése után az alábbi versenyprioritásokat vonták be elemzésükbe (4.5 táblázat):

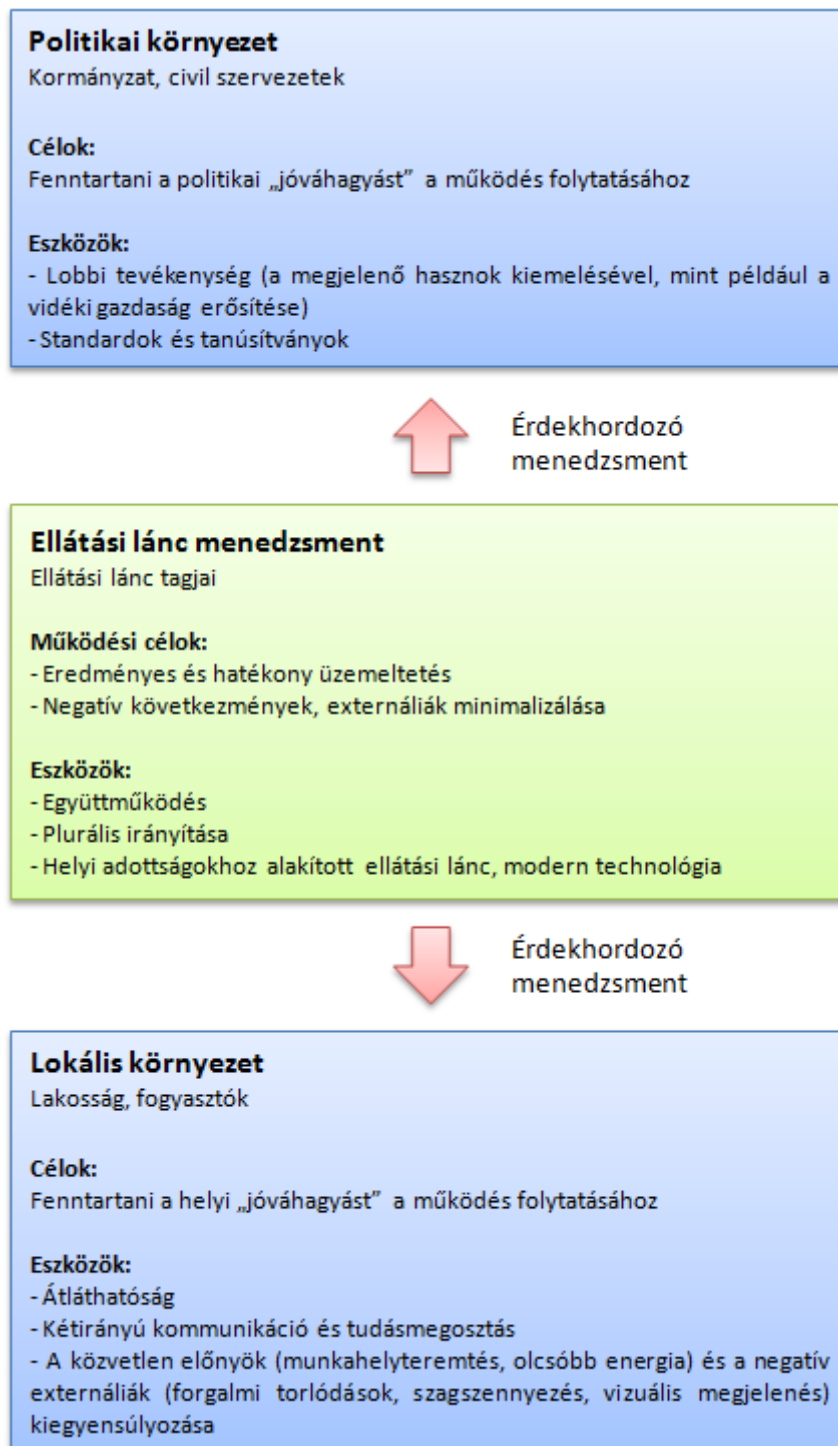
| Versenyprioritások | Leírás |
|--|--|
| Költséghatékonyság (Cost efficiency) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Különböző folyamatok költségének csökkentése |
| Gyorsaság (Speed) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Termékek és szolgáltatások gyors piacra vitele ▪ Termékfejlesztés gyors végrehajtása ▪ Megrendelések gyors kielégítése ▪ Gyors információmegosztás az ellátási lánc tagjai között |
| Megbízhatóság (Reliability) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Termék megbízhatósága és minősége a teljes lánc mentén |
| Innovativitás (Innovativeness) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ A lánc tagjai kompetenciáinak kombinálása a termékfejlesztés érdekében |
| Rugalmasság (Flexibility) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nem várt eseményekre, változásokra való reagálás |
| Együttműködés (Collaboration) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ A lánc tagjai koordinálva végzik tevékenységüket ▪ Megtörténik az erőforrások és az információ megosztása ▪ Közös probléma-megoldási folyamat alkalmazása |

4.5 táblázat Versenyprioritások Saarijarvi és mtsai tanulmányában

A Saarijarvi és mtsai által bemutatott versenyprioritások jellemzően megerősítik a korábban leírtakat (a biomassza ellátási lánc specifikumaira vonatkozó megállapítások mellett). Az Együttműködés attribútum kap a korábbiaknál nagyobb hangsúlyt, magában foglalva Chan Információmegosztás és Bizalom attribútumait is.

Az Együttműködés képesség – jelen dolgozatban releváns – értelmezéséhez Gold (2011) tanulmánya nyújt segítséget, aki a 2000 és 2009 között született tudományos közlemények áttekintése alapján vizsgálta a bioenergetikai láncok kapcsolatrendszer menedzsmentjét a belső és külső stakeholderek vonatkozásában. A témakör bemutatása külön szakaszt is megérdemelne, de – ahogy Gold is megemlíti – elenyésző számú cikk foglalkozik a kérdéssel. A szerző arra hívja fel a figyelmet, hogy a sikeres bioenergia ellátási lánc fenntartásának szükséges, de nem elégséges feltétele a technológiai tevékenységsor optimális kialakítása, a részletes logisztikai tervek elkészítése. Annak érdekében, hogy az ellátás stabil és elegendően rugalmas maradjon hosszabb távon is, a lánc operatív üzemeltetésében résztvevő tagok összefűzése, valamint a külső szereplők (politikai környezet, lakosság) bevonása, a tevékenység folytatására vonatkozó „jövőhagyásuk” megszerzése is szükséges. Gold szerint nélkülözhetetlen az ellátási lánc tagjai közötti hosszú távú együttműködés kialakítása, aminek a hozamok volatilitása, a mezőgazdasági és energiapiaci árak változása miatt adaptívnek kell lennie. Ennek megfelelően, a hosszú távú szerződéseknek elegendő rugalmassággal kell rendelkezniük, és a formális szabályozást a kapcsolati irányításnak (relational governance) kell kiegészítenie. Ez kölcsönös bizalmi viszony kiépítését igényli, ami csökkenti az opportunistá viselkedési formák megjelenésének kockázatát. Az együttműködés legfontosabb komponense a hasznok és kockázatok méltányos allokációja. Az ellátási láncban horizontálisan az erőforrások megosztása (esetleg szövetkezeti forma, közös tulajdonlás), vertikálisan új technológiák fejlesztése, a melléktermékek hasznosítása (Innovativitás) javíthatja a közös jövedelmezőséget. Minél több tag részvételével zajló, kompromisszumra törekvő döntéshozatali eljárásokra van szükség, aminek egyik alapja a folyamatos információmegosztás (Információmegosztás). A tagok közötti kommunikáció segít a konfliktuskezelésben, a tudásmegosztásban, valamint a közös 'learning-by-doing' programok végigvitelében.

Gold cikkének legnagyobb újdonsága a külső érdekhordozókkal való együttműködés vizsgálata (4.2 ábra).



4.2 ábra Érdekhordozó menedzsment feladatok a bioenergetikai ellátási láncban

Általános igazságként megfogalmazható, hogy azok a bioenergia ellátási láncok lesznek sikeresek, melyek képesek a külső szereplőket is bevonni a megtermelő hasznok allokációjába, miközben minimalizálják a megjelenő negatív hatásokat. A politikai környezet érdekhordozói számára kommunikálni kell az elérhető pozitív eredményeket, valamint el kell érni, hogy a ténylegesen

fenntartható, társadalmi és ökológiai szempontból is elfogadható technológiákat támogassák a szabályozási környezet átalakításával. A helyi lakosság kapcsán az átláthatóság megteremtése, a folyamatos kommunikáció fenntartása az egyik legfontosabb feladat, melynek segítségével eloszthatók a nem valós információon alapuló félelmek, és felépíthető a beruházást támogató bizalmi légkör.

Bár az ezredforduló után több szerzőnél (Melnik és mtsai 2004, Chenhall és Langfield-Smith 2007, Díaz-Garrido és mtsai 2011, Kurien és Qureshi 2011) megjelent versenyprioritásként – vagy legalábbis a metrikarendszerekből hiányolt elemként – a pozitív környezeti és szociális hatás, de ezidáig sem az ellátási lánc elmélet, sem az üzleti gyakorlat nem fordított kellő figyelmet ezen területre (Piplani és mtsai 2008). A 'fenntartható ellátási lánc menedzsment' (sustainable supply chain management – sSCM) viszonylag új irányzata pótolhatja ezen elmaradást, többek között az alábbi kérdésekre keresve választ:

- Hogyan egyeztethetők össze a gazdasági és nem gazdasági célok az üzleti döntések meghozatala során?
- Az ellátási lánc tagjai hogyan tudnak együttműködve megfelelni a fenntarthatósággal kapcsolatos kormányzati és lakossági elvárásoknak?
- Miként lehet az ellátási láncokat úgy újrastrukturálni, hogy képesek legyenek összegyűjteni és minél nagyobb arányban újrahasznosítani a fogyasztók által már nem használt termékeket?

Hassini és mtsai (2012) összefoglaló tanulmányukban áttekintették a fenntartható ellátási lánc menedzsment ezredforduló után született irodalmát, és Elkington (1997) hármas optimalizálás (triple bottom line (TBL) – profit, planet, people) elvére támaszkodva kiegészítették az ellátási lánc menedzsment definícióját. Szerintük a fenntartható ellátási lánc menedzsment nem más, mint az ellátási lánc tevékenységek, az erőforrások, az információ és a pénzügyi források menedzsmentje az ellátási lánc profitjának maximalizálása, a környezetterhelés minimalizálása valamint a társadalmi jólét maximalizálása érdekében. Az ellátási lánc metrikarendszereket tanulmányozva hét olyan cikket találtak, ahol megjelent valamilyen környezeti vagy társadalmi mutató, de egy olyat sem, ami mindhárom területet (gazdasági, környezeti, társadalmi) magában foglalta volna. A létező megoldások kapcsán kiemelték, hogy azok általában egy-egy iparágra vagy vállalatra szabottak (esettanulmány jellegűek) és a metrikák számát illetően is nagy szórást mutatnak (3-98 metrika). A szerzők számos olyan tényezőt is bemutatnak, amik a fenntarthatósági mutatók teljesítményértékelési rendszerekbe építését hátráltatják.

A lágyszárú biomassza ellátási lánc kapcsán a fenntarthatóság kérdésköre kiemelten fontos, hiszen a bioenergetikai láncok kiépítésének elsődleges mozgatórugója éppen a fenntarthatósági elvek érvényesítése. A Fenntarthatóság attribútum alatt a továbbiakban azon pozitív gazdasági, ökológiai és társadalmi externáliák előidézésének képességét értem, melyeket már a bevezető fejezetben is említettem (például károsanyag-kibocsátás csökkentése, munkahelyteremtés), és melyek rendkívül fontosak az előzőekben bemutatott érdekhordozói jóváhagyás megszerzéséhez.

A 4.6 táblázatban foglaltam össze a fenti elemzések eredményét, a lágyszárú biomassza ellátási lánc kapcsán releváns versenyprioritásokat.

| Versenyprioritások | Leírás |
|--|---|
| Költséghatékonyság (Cost efficiency) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ellátási lánc költsége ▪ Értékesített áruk költsége ▪ Ellátási lánc erőforrások hasznosítási foka |
| Megbízhatóság (Reliability) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Megfelelő minőségű alapanyag biztosítása ▪ Folyamatos alapanyag-ellátás biztosítása |
| Rugalmasság (Flexibility) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Rövid távon ható, kínálati oldalt érintő nem várt eseményekre való reagálás ▪ Rövid távon ható, keresleti oldalt érintő nem várt eseményekre való reagálás ▪ Hosszabb távon ható, kínálati oldalt érintő nem várt eseményekre való reagálás |
| Innovativitás (Innovativeness) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Technológiai (eszköz-, és eljárásfejlesztés) újítások megvalósítása ▪ Szervezési újítások megvalósítása |
| Információmegosztás (Visibility) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Valós idejű információk biztosítása a rendszer állapotáról ▪ Azonnali jelzés a nem várt események bekövetkezéséről ▪ Közös előrejelzés és tervezés |
| Együttműködés (Collaboration) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Hosszú távú együttműködés (szerződéses és bizalmon alapuló) ▪ Ellátási lánc tagok célrendszerének összehangolása ▪ Jövedelem- és kockázatmegosztás ▪ Közös problémamegoldás ▪ Együttműködés a külső érdekhordozókkal |
| Fenntarthatóság (Sustainability) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Extern gazdasági hatások ▪ Extern ökológiai hatások ▪ Extern társadalmi hatások |

4.6 táblázat Releváns versenyprioritások a lágyszárú biomassza ellátási láncban

Meg kell említeni, hogy a fenti lista kialakítása közben – egyes attribútumok speciális értelmezése vagy éppen elhagyása kapcsán – többször hivatkoztam az erőmű stabil, hosszú távú szerződéseiben rögzített tüzelőanyag keresletére. Ez nem véletlen, hiszen az ellátási lánc irodalomban is meghatározó szerepet játszik azon elmélet, mely szerint elsődlegesen a végtermék jellemzői határozzák meg, hogy az ellátási lánc milyen stratégiai képességekkel kell, hogy rendelkezzen. Köszönhetően a biomassza kereslet ezen erőteljes karakterisztikájának, a fenti gondolatmenet során – implicit módon – már „hasznosítottam” ezen irodalmi eredmények egy részét, ezért fontosnak tartom, hogy a következő szakaszban explicit módon is bemutassam azok meghatározó elemeit. Ennek megfelelően az olvasó redundáns gondolatokkal, magyarázatokkal is találkozhat majd. Én egyfajta megerősítésként, a két megközelítésmód összekapcsolásaként tekintek minderre. Mivel a 4.6 táblázatban bemutatott versenyprioritások, termelési képességek nem függetlenek egymástól, ezért a következő szakaszban kitérek azok kapcsolatrendszerére is.

4.3 Ellátási láncok stratégiai fókuszának kijelölése a végtermék jellege alapján

Az alábbiakban azon elmélet fejlődését vázolom fel röviden, mely szerint elsődlegesen a végtermék jellemzői határozzák meg azt, hogy az ellátási lánc milyen stratégiai képességekkel kell, hogy rendelkezzen. Nagy (2010) részletesen áttekintette ezen elmélet fejlődését doktori értekezésében, melyre erőteljesen támaszkodtam jelen szakasz kidolgozása során.

Fisher (1997) – ezen terület úttörője – szerint egy termék elsődlegesen funkcionális vagy elsődlegesen innovatív lehet. A funkcionális termék alapigényt elégít ki, kereslete hosszabb távon stabil, így könnyen előrejelezhető marad, a termék hosszú életciklussal, de alacsony profitrátaival jellemezhető. Ezzel szemben egy innovatív termék kereslete nehezen becsülhető, időben erősen változékony, a termék rövid életciklusú, viszont magas profitráta kapcsolódik hozzá. A 4.7 táblázat szemlélteti a funkcionális, illetve az innovatív termékek fő jellemzőit.

| | Funkcionális termék | Innovatív termék |
|--|----------------------------|-------------------------|
| Életciklus hossza | 2 évnél hosszabb | 3 hónap és 1 év között |
| Haszonkulcs | 5%-20% | 20%-60% |
| Termékválaszték | Szűk | Széles |
| Átlagos eltérés az előrejelzéstől | 10% | 40%-100% |
| Átlagos készlethiány | 1%-2% | 10%-40% |
| Átlagos szezonvégi kedvezmény | 0% | 10%-25% |
| Átfutási idő rendelésre gyártás esetén | 6 hónap és 1 év között | 1 nap és 2 hét között |

4.7 táblázat Funkcionális és innovatív termékek keresleti jellemzői

Mivel a két terméktípus jelentősen eltérő tulajdonságokkal rendelkezik, ezért – a sikeres piaci jelenlét érdekében – az azokhoz kapcsolódó ellátási láncoknak is eltérő képességekkel kell bírniuk. A különbség megértéséhez fontos felismerni, hogy az ellátási láncok alapvetően két funkciót töltenek be:

- a fizikai funkció az anyagok átalakítását és mozgatását foglalja magában a teljes ellátási lánc mentén, míg
- a piaci közvetítő funkciónak azt kell biztosítania, hogy a piacra vitt termékválaszték és mennyiség a lehető legpontosabban fedje az aktuális keresletet.

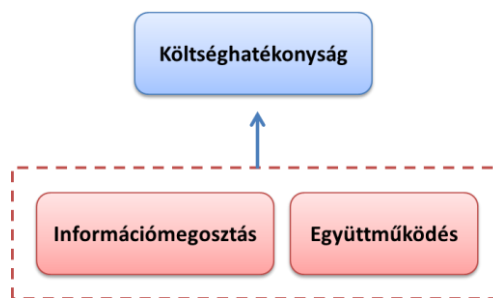
A fizikai funkcióhoz kapcsolódó költségek a gyártás, szállítás és raktározás költségei, míg a piaci közvetítésből származó költségek abból erednek, hogy több, illetve kevesebb végtermék kerül piacra, mint amennyit a fogyasztók vásárolni akarnak. Funkcionális termékek esetén – mivel a kereslet viszonylag pontosan előrejelezhető, és a piaci közvetítés költségei elhanyagolhatóak – az ellátási lánc alapvető feladata a kereslet kielégítése a fizikai költségek minimalizálásával. Fisher ezt a típusú ellátási láncot hívja hatékony ellátási láncnak. Innovatív termékek esetén – a bizonytalan piaci kereslet miatt – a fizikai kiadásoknál magasabb költségeket eredményez az elégtelen vagy túlkínálat, ennek megfelelően az ellátási láncnak elsősorban a piaci jelzések minél korábbi és minél pontosabb felismerésére, valamint a gyors reagálási képesség kifejlesztésére kell koncentrálnia. Ezt a típusú ellátási láncot Fisher rugalmas ellátási láncnak nevezi.

A dolgozat tárgyát képező ellátási lánc végterméke, a lágyszárú biomassa – és az abból előállított energia is – a funkcionális termékek szélsőséges példája: az erőmű 20 évre tervezett technológiája és állandó kapacitása stabil keresletet teremt a tüzelőanyag iránt. Ebből következően hatékony ellátási lánc kialakítására van szükség, ami a fizikai költségek minimalizálásának igényét veti fel. A dolgozat fókuszát jelentő szállítási-üzemelési döntések kapcsán ez a szállítási költségek, a fel- és lerakodási költségek, valamint a raktározással kapcsolatos költségek minimalizálását jelenti, ami a felesleges kapacitások (túlzott jármű- és eszközpark, raktárkapacitás) eliminálásán, valamint a meglévő eszközök hatékony használatán (állásidők, torlódások csökkentése) keresztül valósítható

meg. Érdeemes megjegyezni, hogy az erőműnél és a depóknál kiépített raktárkapacitás, és így a készletek „karcsúsítása” nem csak a jövedelmezőségi elvárások miatt szükséges: az alapanyag alacsony sűrűsége miatt helyhiány léphet fel, így a készletek minimális szinten tartása kényszerű megoldásként jelentkezik.

Fliedner (2003) szerint az ellátási lánc költségoptimalizálásához erőteljesen hozzájárul a közös előrejelzés és tervezés (döntéshozatal), azonban ezen megoldások alkalmazásának egyik gátja, ha a felek nem bíznak meg egymásban és nem hajlandók kiadni a megvalósítás alapfeltételének tekinthető érzékeny információkat. Az információmegosztás fontosságára Fisher is felhívja a figyelmet, és általános tanácsként azt is megfogalmazza, hogy az ellátási lánc szereplői közötti versengés (például a fix jövedelem elosztásáról szóló ártárgyalások) helyett, a szorosabb együttműködésből fakadó költségcsökkentéssel érdemes az elosztható jövedelem tömegét növelni: az ellátási lánc szereplői tehát tervezzék és szervezzék folyamataikat közösen az ellátási lánc teljes jövedelmét növelve, a közös optimum elérésére törekedve.

Összegzésként azt mondhatjuk, hogy Fisher elmélete alapján a biomassza ellátási láncnak kiemelt figyelmet kell fordítania a Költséghatékonyság, az Információmegosztás és az Együttműködés képességekre. Ez utóbbi kettő a Költséghatékonyságot megalapozó, támogató képességnek tekinthető (4.3 ábra).



4.3 ábra Hatékony ellátási lánc meghatározó képességei Fisher alapján

Meg kell említeni, hogy bár Fisher termék-ellátási lánc illesztési elmélete rendkívül logikusnak és kézenfekvőnek tűnik, az empirikusan vizsgálatok során általában nem sikerült igazolni annak gyakorlati relevanciáját. (Nagy 2010) Az irodalomban ezért többen továbbfejlesztették ezen elméletet újabb terméktípusok bevezetésével. Ezek általában a fisheri innovatív termékek további szétbontását, vagy a funkcionális és innovatív közötti hibrid termék bevezetését jelentették. (Li és O'Brien 2001, Huang és mtsai 2002, Wong és mtsai 2006) Mivel a biomassza ellátási lánc végterméke egyértelműen funkcionális terméknek tekinthető, ezért ezen eredményekkel nem foglalkozom részletesen.

Fisherhez hasonlóan két alapvető ellátási lánc típust különböztetnek meg Naylor és mtsai (1999) valamint Mason-Jones és mtsai (2000) is: az agilis (agile) és karcsú (lean) ellátási lánc koncepciók a megegyező nevű termelési módszertanból származnak. Míg az agilis ellátási láncok alapvető célja a vevők gyors kiszolgálása (kiszolgálási színvonal mint rendeléselnyerő kritérium), addig a karcsú ellátási lánc elsődlegesen a költségek minimalizálására törekszik (ár/teljes vevőköltség mint rendeléselnyerő kritérium). Ez utóbbi megfeleltethető a fisheri hatékony ellátási lánc kategóriájának, ezért az ott leírtakat tekinthetjük érvényesnek itt is.

Lee (2002) a termékek kereslet-alapú kategorizálását egészítette ki a kínálat oldali bizonytalanság aspektusával. A keresleti karakterisztikákat tekintve csoportosítása megegyezik Fisherével (funkcionális és innovatív termékek). A biomassa alapanyag itt is funkcionális terméknek tekinthető, a Lee által felhozott összes jellemző illik rá, egy kivételével. Míg az elméletben a készlethiány alacsony költségnövekedést eredményez, addig a biomassa ellátás kapcsán ez nincs így. A technológiai jellemzőkből fakadóan, az alapanyaghiány okozta jelentős erőművi veszteségek miatt a megbízhatóság, az ellátás biztonsága fontosabb, mint más funkcionális termékek esetén. Ez azt jelenti, hogy a fisheri elmélet kapcsán említett Költséghatékonysági követelmény mellett a biomassa ellátási láncnak a Megbízhatóság képességével is rendelkeznie kell, ami – az alkalmazható eszközök költségnövelő természete miatt – trade-off megjelenését okozza a versenyprioritások rendszerében.

A Megbízhatóság kérdéskörét az előzőekben a kereslethez kapcsolatosan vizsgáltam, de ez az attribútum vezet el Lee koncepciójának újdonságához, a kínálat oldali bizonytalansághoz, ami a nem megbízható szállítás alapvető oka. Lee elmélete a kínálati oldalon stabil és fejlődő kategóriákat különböztet meg (4.8 táblázat). Míg az előbbi kiforrott technológiát, stabil ellátó hálózatot feltételez, addig az utóbbi esetében mind a technológia, mind a potenciális ellátó vállalatok köre gyorsan változik. A stabil kínálat természetesen alacsony, a fejlődő kínálat pedig magas bizonytalansággal jellemezhető.

| Stabil kínálat | Fejlődő kínálat |
|------------------------------------|--|
| Kevés üzemzavar | Hajlam az üzemzavarra |
| Stabil és magasabb termelési hozam | Változékony és alacsonyabb termelési hozam |
| Kevés minőségi probléma | Lehetséges minőségi problémák |
| Több ellátási forrás | Korlátozott számú ellátási forrás |
| Megbízható beszállítók | Nem megbízható beszállítók |
| Kevés változtatás a folyamatokban | Gyakori változtatás a folyamatokban |
| Nem releváns kapacitáskorlátok | Releváns kapacitáskorlátok |
| Könnyű átállás | Nehézkes átállás |
| Rugalmasság | Rugalmatlanság |
| Stabil átfutási idő | Változékony átfutási idő |

4.8 táblázat A stabil és a fejlődő kínálat jellemzői

Általában igaz, hogy egy funkcionális termékhez már kialakult a stabil kínálatot biztosító ellátási lánc, de ez nincs mindig így. Éppen a mezőgazdasági termékek hozhatók fel példaként a stabil kereslettel, de – például az időjárási viszonyok miatt – bizonytalan kínálat jellemezhető terméktípusra. A biomassa ellátási lánc a stabil és a fejlődő kínálat között helyezkedik el. Bár az alkalmazott technológia megbízhatónak tekinthető, bizonyos rendszerelemek hordoznak magukban stratégiai, taktikai vagy operatív jellegű bizonytalanságot. Ezek egy része az ellátási lánc tagjai közötti együttműködés elmélyítésével csökkenthető, más részük viszont külső környezeti tényezők függvénye. A 4.9 táblázatban olyan bizonytalansági elemeket soroltam fel, melyek relevánsak a lágyszárú biomassa ellátási lánc kapcsán. Ehhez Lee tanulmányán túl felhasználtam Van Landeghem és Vanmaele (2002) és Tang és Musa (2011) ellátási láncokra, valamint Awudu és Zhang (2012) bioenergetikai láncokra vonatkozó munkáját, melyekben lehetséges kockázati tényezőket mutattak be.

| | Menedzselhető | Külső környezeti |
|-------------------|---|---|
| Stratégiai | | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Korlátozott számú ellátási forrás ▪ Releváns kapacitáskorlátok a logisztikai folyamatban ▪ Speciális technológia ▪ Politikai és lakossági támogatottság esetleges hiánya |
| Taktikai | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Biomassza termelők opportunistá viselkedésformái | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Termelési hozam változékonysága ▪ Költségek és árak változékonysága |
| Operatív | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nem megbízható biomassza termelők (mennyiségi, minőségi) ▪ Nem megbízható fuvarozók ▪ Akadozó és hibás információmegosztás (részben külső környezeti) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Zavarok az szállítási hálózat egyes elemeinél (termelés helyszíne, depók, úthálózat) ▪ Változékonny szállítási idők ▪ Nem megfelelő minőségű tüzelőanyag ▪ Működési zavarok az erőmű telephelyén (részben menedzselhető) |

4.9 táblázat A lágyszárú biomassza ellátási lánc kínálatában megjelenő fő bizonytalansági elemek

A menedzselhető tényezők között a legsúlyosabb változást az okozhatja, ha egy alapanyag-termelő – a szerződéses korlátok mellett – úgy dönt, hogy nem akar a továbbiakban részt venni az ellátási lánc működésében, ami az adott évi kínálatot általában nem befolyásolja (taktikai bizonytalanság). Az így kieső kínálat mindaddig pótolható, míg a gazdaságos szállítási távolságon belül találni bevonható ellátási forrást. A szállítási ütemtervek nem megfelelő végrehajtása (akár a termelők, akár a fuvarozók hibás teljesítése folytán) operatív szintű bizonytalanságot okoz. A beszállítás valós idejű irányítását akadályozza a logisztikai rendszer aktuális állapotát leíró adatok visszatartása és az információs rendszer meghibásodása is.

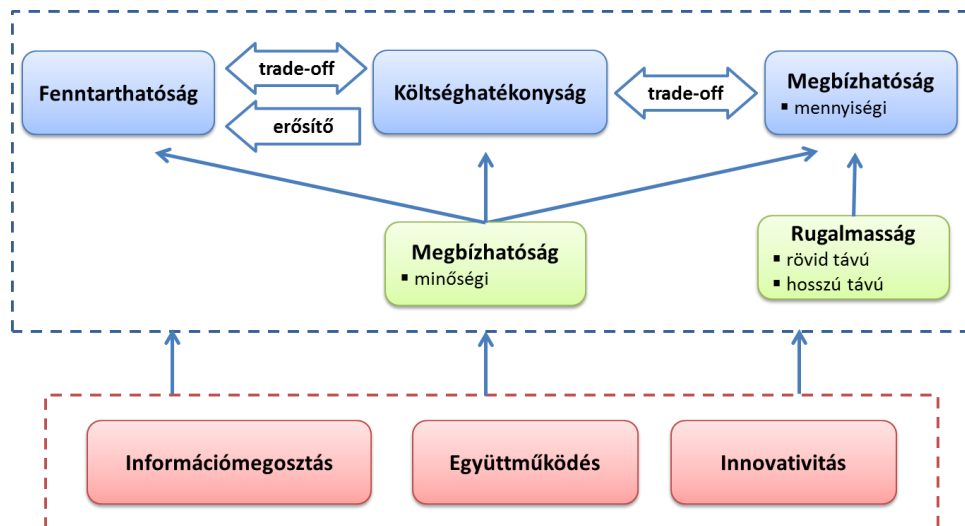
A külső környezeti tényezők között stratégiai szinten – a technológia specializáltságából fakadóan – az alkalmazkodóképesség hiányát, valamint az általánosan jelentkező kínálat oldali volumenkorlátot (ellátási források száma és kapacitáskorlátok) említhetjük. Ezen tényezők mindaddig nem jelentenek problémát a működés során, amíg a beszállítók megbízható módon, az ellátási lánc céljai szerint végzik feladataikat. A stratégiai kockázati elemek közé kell sorolni a külső érdekhordozók támogatásának hiányát is, aminek pozitív irányú módosítása általában csak hosszabb távon lehetséges. A taktikai bizonytalansági elemek között találjuk az évről-évre változó terméshozamot (melyet negatívan befolyásolhat a klímaváltozás folyamata is), valamint a biomassza és az alternatív mezőgazdasági termékek árának, valamint a működés költségeinek változékonyságát. A jelentős mértékű szállítási tevékenység – az alacsony készletszint mellett – magában hordozhatja operatív ellátási problémák megjelenését (időleges alapanyaghiány az erőműnél): kedvezőtlen közlekedési és időjárési körülmények mellett számottevő lehet a szállítási idők változékonysága és megnő a fuvarok kimaradásának esélye. Ezzel ekvivalens, ha nem megfelelő minőségű tüzelőanyag érkezik az erőműbe (például az előírtnál magasabb nedvességtartalmú biomassza). Mivel dolgozatomban fókuszát a szállításütemezési döntések jelentik, így a később bemutatandó modellekben az operatív bizonytalansági elemekre koncentrálok csak, és feltételezem, hogy az ellátási lánc rendelkezik azon kapacitásfejlesztési és aggregált termelési tervekkel, melyek hosszú- és középtávon lehetővé teszik az erőmű keresletének kielégítését, a stratégiai és taktikai kockázatok kivédését.

Lee (2002) az alacsony keresleti és kínálati bizonytalansággal rendelkező végtermékhez hatékony ellátási láncot, míg az alacsony keresleti, de magas kínálati bizonytalansággal jellemezhető outputhoz úgynevezett kockázat-fedező ellátási láncot illeszt. Az előbbi karakterisztikái megegyeznek a fisheri hatékony, valamint a karcsú ellátási láncok jellemzőivel, célja a minimális költségű rendszer kialakítása. Ehhez nélkülözhetetlen a tagok közötti információmegosztás, valamint a folyamatok és a megjelenő döntési szituációk optimalizálása. A kockázat-fedező ellátási láncban a menedzselhető bizonytalanságot szerződéses, valamint – az azt kiegészítő – bizalom-alapú együttműködés által lehet csökkenteni. A külső környezeti, nem menedzselhető bizonytalanság kezelésére olyan eszközöket, eljárásokat kell bevezetni, melyek eliminálják a lehetséges negatív következményeket (alapvetően az alapanyaghiányt). A SCOR teljesítménymetrika rendszere kapcsán leírtakkal összhangban akkor tekintem a biomassza ellátási láncot rugalmasnak, ha a külső környezeti és a belső működési bizonytalanságok, a nem várt események bekövetkezése ellenére is képes a szokásos üzletmenet fenntartására. Ebben az értelemben a Rugalmasság képességét a Megbízhatóság (alapanyaghiány mentes ellátás) versenyprioritás megalapozó komponensének tekintem (a rugalmasságot növelő eszközök köréről később részletesebben írok).

Lee (2004) egy későbbi cikkében három olyan képességet (triple-A) sorolt fel, melyek nélkülözhetetlenek az ellátási láncok hosszú távú sikerességéhez (funkcionális termékek esetén is):

- Az ellátási lánc legyen agilis, legyen képes gyorsan reagálni a kereslet vagy kínálat nem várt rövid távú változásaira! (Agility)
Bizonyos rugalmasságot fejlesztő termelésmenedzsment eszközökön túl az információmegosztás és az együttműködés fontosságát emelte ki a szerző, mint agilitást megalapozó elemek.
- Az ellátási lánc legyen alkalmazkodóképes, ha strukturális változás következik be a piacon! (Adaptability)
A korábban leírtaknak megfelelően ez a képesség nem releváns a biomassza ellátási lánc kapcsán.
- Az ellátási lánc alkalmazzon olyan ösztönzőket, melyek által a tagok a közös jövedelmezőség fejlesztésében lesznek érdekeltek! (Alignment)
Ezen képesség megteremtését segítő módszerek: egyenlő hozzáférés az előrejelzésekhez, értékesítési adatokhoz és tervekhez (Információmegosztás), a tagok feladat- és felelősségi körének tisztázása, szerződésben rögzített kockázat-, költség- és jövedelemmegosztás (Együttműködés). Ezen harmadik képességet (alignment) emelték ki Narayanan és Raman (2004) is, akik a bizalom-alapú együttműködés (mint a szerződés-, majd információ-alapú együttműködési formák utáni szint) megteremtését tartják szükségesnek.

A fejezetben ismertetett irodalomkutatás eredményét foglalja össze a 4.4 ábra, mely a biomassza ellátási lánc meghatározó versenyprioritásainak kapcsolatrendszerét mutatja be (a Fenntarthatóság és az Innovativitás attribútumokat az előző alfejezet alapján jelenítettem meg).



4.4 ábra Lágyszárú biomassza ellátási lánc versenyprioritásainak kapcsolatrendszere

A vevőt (erőmű) közvetlenül érintő legfontosabb versenyprioritások a Fenntarthatóság, a Költséghatékonyság és a mennyiségi Megbízhatóság. Páronként vizsgálva ezen attribútumok kapcsolatát a következő megállapításokat tehetjük:

- Fenntarthatóság-Költséghatékonyság: a két versenyprioritás kapcsolatára nem mondhatjuk, hogy egyértelműen egymást erősítő vagy trade-off jellegű lenne. Azon termelési döntések, melyek az erőforrások hatékony hasznosítására irányulnak, mindkét képességet fejlesztik (például alacsony károsanyag-kibocsátás; takarékos, olcsó erőforrás-felhasználás). A technológia és az erőforrások kiválasztása, beszerzése kapcsán viszont ellentétes irányú hatásokat is tapasztalhatunk. Erre példa az alacsonyabb károsanyag-kibocsátású, de drágább vagy éppen lassabb szállítási módok alkalmazása, vagy az automatizálás visszafogása a nagyobb arányú élőmunka javára, ami okozhat költségnövekedést, de a helyi gazdaságot támogatja.
- Költséghatékonyság-Megbízhatóság: a korábbi megállapításoknak megfelelően trade-off kapcsolat fedezhető fel ezen két attribútum között.
- Fenntarthatóság-Megbízhatóság: a beszállítás mennyiségi megbízhatóságának javítása általában pótlólagos erőforrások bevonását igényli, ami ronthatja a fenntarthatósági mutatók értékét. Ez a hatás azonban nem feltétlenül szignifikáns.

A további versenyprioritás elemek kapcsán elmondható, hogy a Rugalmasság attribútum közvetlenül hozzájárul a mennyiségi Megbízhatóság fejlesztéséhez. Az Információmegosztás, Együttműködés és Innovativitás képességek mind szükségesek ahhoz, hogy a fogyasztók által közvetlenül érzékelt versenyprioritások tekintetében magas színvonalat képviselhesen az ellátási lánc. Ezen három attribútum jelen dolgozat keretében releváns komponenseit a 4.6 táblázatban már bemutattam, precízebb definiálásuk, bővebb kifejtésük, valamint kapcsolatrendszerük cizelláltabb feltérképezése további kutatási lehetőségeket rejtenek magukban.

4.4 LBEL versenyprioritás-struktúra megjelenése a szállítási-ütemezési döntésekben

A dolgozat fókuszát az alapanyag-beszállítás ütemezése jelenti, ezért jelen alfejezetben azt vizsgálom, hogy a fent felvázolt versenyprioritás-struktúra miként jeleníthető meg az elemzett

döntési szituációkban. A döntési modellekbe építendő konkrét eszközöket egyelőre nem részletezem (azt a döntési folyamat leírása során teszem meg), most olyan koncepcionális kérdésekre fókuszálok, mint például a bizonytalanság modellezése, a Költséghatékonyság-Megbízhatóság trade-off kezelésének módja vagy a támogató versenyprioritások szerepe. Komplexitása miatt az alfejezet nagy részét a Megbízhatóság és Rugalmasság versenyprioritások tárgyalása teszi ki.

4.4.1 A Fenntarthatóság és Költséghatékonyság versenyprioritások

A szállításütemezési döntések az alapanyag mozgatására, az erőforrások működtetésére fókuszálnak, és nem érintik a hálózat tervezésének, a technológia, a berendezések vagy éppen az alvállalkozók kiválasztásának kérdéskörét. Ebből következően hasonló eszközök alkalmazhatók a Fenntarthatóság és a Költséghatékonyság képességek javítására: a beruházások minimalizálása (például a járműflotta méretének minimalizálása), az erőforrások hatékony üzemeltetése (például a járművek tétlen idejének csökkentése) vagy a felesleges anyagkezelés és mozgatás eliminálása. Ezt kihasználva, a továbbiakban nem foglalkozom önállóan a Fenntarthatóság attribútummal, a kapcsolódó célokat és eszközöket összevontan a Költséghatékonyság képesség alatt tárgyalom.

4.4.2 A bizonytalanság modellezése

Teljes mértékben kontrollálható – azaz determinisztikus paraméterekkel leírható – ellátási folyamat mellett is fennállhatnak olyan körülmények, melyek megkövetelik pótlólagos kapacitások, készletek fenntartását a tüzelés helyszínén. Ezen körülmények jellegzetessége ugyanis, hogy az erőmű folyamatos keresletének kiszolgálását korlátozzák:

- a logisztikai tevékenység okozta zajterhelés miatt éjszakánként és hétvégente csak korlátozott mértékben fogadhat járművet az erőmű,
- az alacsonyabb bérjellegű kiadások érdekében korlátozzák az éjszakai és hétvégi beszállítást,
- bizonyos közlekedési szabályozások (például kamion-stop) befolyásolják a szállító járművek ütemezését.

Amennyiben a felsorolt vagy ezekhez hasonló tényezők jellemzik a logisztikai folyamatot, úgy egyrészt készletezéssel kell biztosítani az alapanyag rendelkezésre állását, másrészt a járműflotta, a raktár-infrastruktúra kapacitásának bővítése is szükségessé válhat.

A fenti, tervezhető korlátozásokon túl, a megbízhatóságot biztosító eszközök, például további kapacitáspárna vagy biztonsági készletek alkalmazásának célja, hogy az ellátási lánc kivédje a különböző nem várt események negatív következményeit. A dolgozatban csak az operatív szintű bizonytalansági elemek kezelésével foglalkozom (ld. 4.9 táblázat), melyek például az alábbiak:

- a depók és az erőmű közötti szállítási idő változékonysága a forgalmi viszonyok függvényében,
- baleset vagy kedvezőtlen időjárás viszonyok miatt útszakaszok kiesése, a depók megközelíthetetlensége,
- a szállító járművek vagy a rakodó berendezések meghibásodása,
- minőségileg nem megfelelő alapanyag beérkeztetése (amit felfoghatunk egy fuvar elmaradásaként is),

- a kazán vagy az azt kiszolgáló berendezések, esetleg a fogadó infrastruktúra meghibásodása.

(A bizonytalansági elemek részletesebb felméréséhez és rendszerezéséhez felhasználható az Aytug és mtsai (2005) által termelési rendszerekhez kidolgozott négyelemű keretrendszer.)

Míg az első négy esetben alapanyaghiány léphet fel, addig az utolsó a készletek túlzott felhalmozódását eredményezheti. Ez utóbbi viszonylag egyszerűen kezelhető, ezért a későbbiekben nem térek rá ki részletesen: ha az erőmű raktárai megközelíthetőek, akkor azok feltöltése után, egyébként pedig azonnal le kell állítani a beszállítás folyamatát; az éppen fuvarozó járművek beérkeztetését – adott esetben a járművek tárolására használt telephelyen – még el kell végezni. Az ütemezési tervhez képest elmaradást okozó nem várt események (első négy példa) kezelése már összetettebb feladat: azok az eszközök, melyek segítségével számottevő módon csökkenthetők vagy eliminálhatók ezen események negatív következményei – azaz elkerülhető az alapanyaghiány – költségnövelő hatásúak. Fontos megemlíteni, hogy a fentiekhez hasonló nem várt eseményekre a későbbiekben 'elemi' nem várt eseményként hivatkozom, az ezekből következő alapanyaghiányt már következménynek tekintem.

Bizonytalan paraméterekkel rendelkező problémák kezelésének leggyakoribb módjai az alábbiak, melyek önmagukban vagy egymással kombinálva is alkalmazhatók (zárójelben az ellátási láncok modellezésének irodalmából hozok alkalmazási példákat):

- Szimuláció sztochasztikus paraméterekkel, melynek során nagyszámú bizonytalan paraméter esetén is megfigyelhetjük egy rendszer működését. Ezen technika lehetővé teszi – az alacsonyabb számítási igényből kifolyólag –, hogy a folyamatok elemi műveleteihez, eseményeihez rendeljünk sztochasztikus paramétereket (például Sokhansanj és mtsai 2006).
- Sztochasztikus programozás, ahol tipikusan olyan matematikai programozási feladatok megoldása történik, melyek diszkrét valószínűségi eloszlással jellemzett paramétereket tartalmaznak. Az optimalizálási cél, és az ebből fakadó nagyobb számítási igény miatt általában valamilyen mértékű egyszerűsítésre, aggregációra van szükség a probléma leírása során (például Sodhi és Tang 2009 vagy Chien-Wei és Fan 2011).
- Fuzzy optimalizálás (fuzzy matematikai programozás), ahol az adatok reprezentálása fuzzy számokkal történik (például Peidro és mtsai 2009).
- Robusztus optimalizálás, ami nem a bizonytalan események modellezésében, hanem a megengedett megoldások kiértékelésében hoz újdonságot. A kiválasztott megoldással kapcsolatban ugyanis megjelenik az az igény is, hogy annak elegendően jónak kell maradnia a bizonytalan paraméterek lehetséges értékeinek egy adott intervallumán. Ezzel a módszerrel csökkenthető a szükséges újratervezések száma, ami rendkívül hasznos azon problémák esetén, ahol a tervek módosítása számottevő költségnövekedést eredményez (például Van Landeghem és Vanmaele 2002).
- Szenáriógenerálás, ahol viszonylag kisszámú alternatív modell előállítása történik meg, melyek már csak determinisztikus paramétereket tartalmaznak. A modellek eltérhetnek a paraméterek értékeiben, de feltételrendszerükben, struktúrájukban is (például Schütz és Tomasgard 2011).

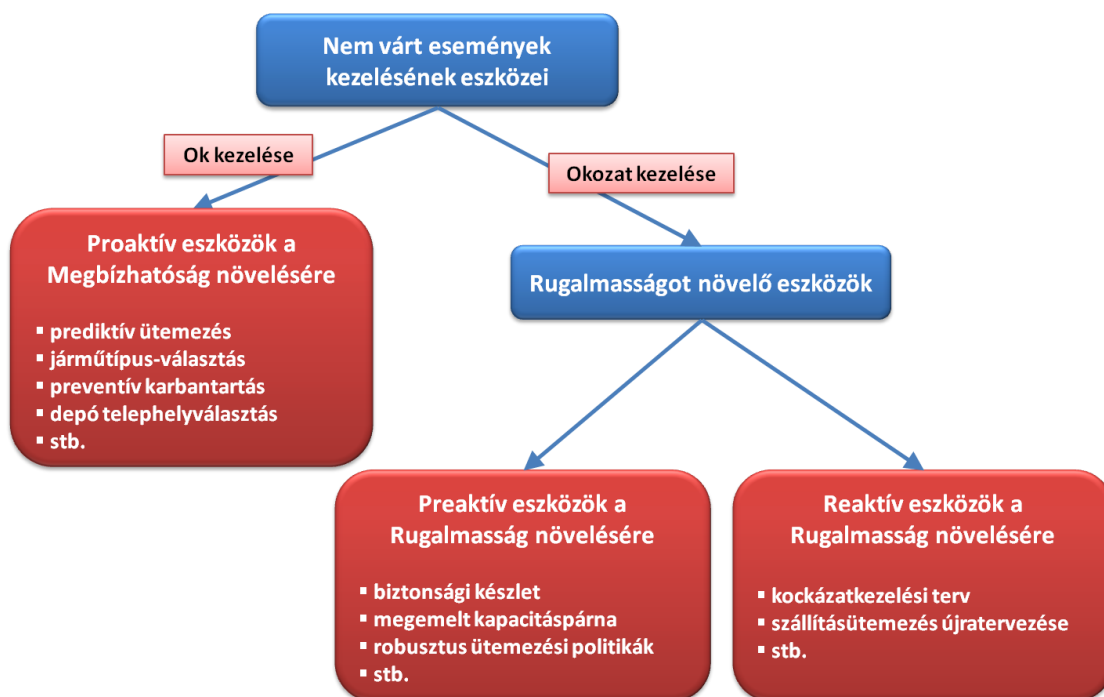
Dolgozatomban elsősorban a scenáriógenerálás módszerét alkalmazom. Egyrészt, a bizonytalan műveleti időket (szállítási idők, fel- és lerakodási idők) determinisztikus paraméterekkel reprezentálom, bizonyos mértékben felülbecsülve azokat (az időhorizontot diszkretizálva és az egyes műveletek hosszát periódusszámban kifejezve). Másrészt, a nagyszámú elemi bizonytalan esemény egyedi hatásának elemzése helyett – részben az empirikus adatok hiánya miatt is – úgynevezett 'Aggregált Bizonytalansági Forгатókönyveket' (ABF) vezetek be. Az egyes ABF-ek lehetséges bekövetkezése mellett optimalizálom a logisztikai rendszer működését. Ilyen forгатókönyvek lehetnek például:

- egy nap teljes beszállítási kapacitása kiesik (azaz nem történhet beszállítás)
- két egymást követő napon a lerakodási kapacitás fele kiesik (azaz csökkentett mértékű beszállítás történhet csak)
- stb.

Az egyes aggregált bizonytalansági forгатókönyvek tehát különböző bizonytalansági szinteket reprezentálnak.

4.4.3 A Megbízhatóságot és Rugalmasságot növelő eszközök típusai

Az LBEL Megbízhatóság és Rugalmasság képességeinek magas színvonalát lehetővé tevő, a nem várt események ellen védelmet nyújtó eszközök számbavételére, tipizálására tesztek kísérletet jelen alfejezetben. Érdemes felidézni a Megbízhatóság és Rugalmasság versenyprioritások jelen dolgozatban alkalmazott definícióját. Míg az előbbi a folyamatos alapanyag-ellátás képességét jelenti, addig az utóbbi biztosítja a szokásos üzletmenet fenntartását nem várt események bekövetkezése esetén is. Az alkalmazható eszközöket első lépésként három csoportba sorolom (4.5 ábra).



4.5 ábra A megbízható beszállítást veszélyeztető nem várt események kezelésének eszközei

A biomassza ellátás lánc megbízhatóságát növelő eszközök első csoportja az elemi nem várt események bekövetkezési valószínűségének csökkentésére, azaz megelőzésre törekszik (okok kezelése – megbízhatóságot növelő proaktív eszközök). Ezen eszközökre példák egyrészt a meghibásodási statisztikákat figyelembe vevő járműtípus-választás vagy az úthálózat és a járművek preventív karbantartása, másrészt, a közúti forgalmi, időjárás stb. előrejelzéseket nyújtó rendszerek, melyek prediktív ütemezési technikák alkalmazását teszik lehetővé. Mivel az előbbi eszközcsoport logikailag megelőzi az általam vizsgált döntési szituációkat, az utóbbi megoldások vizsgálata pedig külön disszertációt is megérne, ezért a továbbiakban ezen eszközökkel nem foglalkozom. Megjegyzem azonban, hogy a kidolgozott szállításütemezési modellek egy része – azok rendkívül alacsony számítási igénye folytán – alkalmas arra, hogy prediktív on-line ütemezési eljárások alapjául szolgáljon.

A további eszközök a már bekövetkezett eseményekre való reagálásban nyújtanak segítséget (okozat kezelése – rugalmasságot biztosító eszközök). Ezeket két csoportba sorolhatjuk. Az elsőbe a döntési modellekben megjelenő preaktív eszközök tartoznak. Ezen eszközök alkalmazásával előzetesen felkészülünk a nem várt eseményekre, hogy azok bekövetkezése után is biztosított legyen a stabil ellátást (például biztonsági készlet szint). A második csoportba azon reaktív elemeket sorolom, melyeket a nem várt eseményekre reagálva kell, lehet bevetni. Jelen dolgozat kapcsán alapvetően az újratervezési eljárásokra kell gondolni.

4.4.4 A Rugalmasságot növelő preaktív eszközök

A szállításütemezési döntési szituáció során az alábbi preaktív eszköztípusokat használom a Rugalmasság – így indirekt módon a Megbízhatóság – fejlesztésére. Részletes leírásukra az ütemezési modellek bemutatásánál térek ki.

1. Speciális, robusztusságot növelő ütemezési szabályok: a hosszabb időtávú tervezés kapcsán törekedni kell arra, hogy minél egyenletesebb legyen a beszállítás időbeli eloszlása, a járműflotta használata, hiszen a „túlzsúfolt” napok, időszakok elkerülésével csökken a „maximális kockázatos érték” nagysága is.
A rövidtávú, napon belüli szállításütemezés során hasznos lehet egyszerre több irányból érkeztetni járműveket, valamint – a maximális hatékonyság elvének feladása mellett – érdemes lehet tervezett várakozási sort kialakítani a szűk keresztmetszetnek számító állomások előtt, hogy egy csúszás miatt az eredeti ütemezést ne kelljen módosítani.
2. Biztonsági készlet alkalmazása: a biztonsági készlet jelenti az elsődleges védelmet az alapanyaghiánnyal szemben.
3. Kapacitáspárna alkalmazása: a beszállítás hosszabb távú kiesése csak megemelt készlet szinttel védhető ki, ami egyben megnöveli a raktárkapacitások nagyságát is. Az eszközök lehetséges meghibásodása miatt tartalék egységek beszerzésére van szükség, de ez a megemelt kapacitáspárna nyújt segítséget az elmaradt tüzelőanyag-beszállítás mielőbbi pótlásában is.

Bár útvonal-tervezési kérdésekkel nem foglalkozom az ütemezési döntések kapcsán (a szállítási útvonalak halmazát adottnak tételezem fel), de megemlítem, hogy bizonyos esetekben a szállításban is alkalmazható a késleltetés (postponement) módszere. Az erőmű és a depók között olyan útvonalak kijelölése ajánlott, melyek lehetővé teszik, hogy a járművek minimális többletráfordítás mellett célpontot (depót) válthassanak, amivel valójában a szállítási idők mint input paraméterek ingadozását csökkenthetjük. Tehát, az empirikus adatok ismeretében érdemes

lehet olyan főútvonalakat választani, melyekről több depó is megközelíthető, még ha ezzel kis mértékben meg is hosszabbodik a szállítási távolság.

A fenti eszközök alkalmazásának célja, hogy minden egyes ABF esetén előálljon az a részletes, induló ütemezés (predictive schedule), ami viszonylagos robusztussággal bír a nem várt események tekintetében. Abban az esetben azonban, ha nem teljesül az aktuális ütemterv, szükségessé válhat az ütemezés még hátralévő részének módosítása vagy teljes újratervezése (reactive scheduling, rescheduling). Ezen eszközrendszer alapelemeit mutatom be a következő szakaszban, melynek célja, hogy felvillantsam annak alkalmazási lehetőségeit. Meg kell azonban jegyezni, hogy jelen dolgozat keretein belül nem foglalkozom részletesen az újraütemezés kérdéskörével.

4.4.5 A Rugalmasságot növelő reaktív eszközök

A nem várt események egyes típusainak kezelésére operatív beavatkozási tervet kell kidolgozni. Ezek a különböző hibaelhárítási protokolloktól kezdve alternatív útvonalak kijelölésén át az ütemezések újratervezéséig sokféle megoldást jelenthetnek (a sokféle elemi nem várt eseményre válaszul). A dolgozat fókuszának megfelelően az újraütemezési eszközök alapvetéseit mutatom most be.

Bár Vieira és mtsai (2003), valamint Aytug és mtsai (2005) összefoglaló cikkükben nem logisztikai, hanem termelési rendszerekben alkalmazható újraütemezési megoldásokkal foglalkoztak, de ezen modellek közelebb állnak a jelen dolgozatban bemutatandó szállításütemezési problémához, mint például a járatszervezési (VRP) modellek. (Dinamikus, azaz előre nem ismert és/vagy sztochasztikus paraméterekkel rendelkező VRP változatok kapcsán Pillac és mtsai (2013) írtak áttekintő tanulmányt.) Vieira és mtsai (2003) kidolgoztak egy keretrendszert az újraütemezési megoldások rendszerezésére, melyben négy réteget különítettek el:

- Újraütemezési környezet: az ütemezendő munkák (jelen esetben fuvarok) száma lehet véges vagy végtelen (azaz nem ismerjük az összes fuvar jellemzőit előre). Az előbbi esetben statikus, míg az utóbbiban dinamikus környezetről beszélünk.
- Újraütemezési stratégiák: a 'predictive-reactive' stratégia szerint először előállítunk egy induló ütemezést, majd a nem várt események bekövetkezésének függvényében módosítjuk azt. A 'dynamic' stratégiában valójában nem dolgozunk ki ütemtervet (így újraütemezés sem történik), itt az aktuálisan szabadabbá váló géphez (járműhöz) valamilyen szabály szerint, valós időben rendelünk hozzá egy feldolgozásra váró munkát (fuvart).
- Újraütemezési politikák: ezek határozzák meg, hogy mikor és hogyan végezzük el az újratervezést. A 'predictive-reactive' stratégiához három újraütemezési politika tartozik, melyek a periodikus (előre rögzített időközönként történik meg az újratervezés), az esemény-vezérelt (a nem várt események hatásától függően történik meg az újratervezés) és a hibrid (az előző kettő kombinációja) politikák.
- Újraütemezési módszerek: ezek jelentik a tényleges újraütemezési algoritmusok típusait, mint például a jobbra toló (az ütemezett fuvarok csúsztatása időben), a részlegesen újraütemező vagy a teljes újratervezést végző módszerek.

Kutatási eredmények alapján az látszik, hogy alacsonyabb bizonytalansági szint mellett jobban működik a globális információkat felhasználó predictive-reactive stratégia, de ahogy a paraméterek változékonysága növekszik (globális információk csökkenő adekvátsága, túl gyakori újraütemezési igény), úgy lesz egyre sikeresebb a dinamikus hozzárendelési szabályokat alkalmazó stratégia (Aytug

és mtsai 2005). Ennek oka, hogy az újraütemezési lépések gyakran időigényesek és költségnövekedést eredményeznek (például IT és számítási költségek, régi ütemezés elvesztett költségei, új ütemezés pótlólagos anyagmozgatási és –kezelési költségei). Természetesen a felmerülő költségek nagysága a termelési-logisztikai rendszer jellemzőitől függ (Schütz és Tomaszgard 2011) operatív döntési rugalmasságnak (operational decision flexibility) nevezték azt a képességet, melynek birtokában a termelési rendszer alacsony pótlólagos ráfordítás vagy minimális veszteség mellett képes váltani a módosított tervekre. Ezen képesség fejlesztésén túl más eszközök is rendelkezésre állnak a fenti probléma kezelésére:

- A nem várt események hatásának számszerűsítésével és egy aktiválási küszöbérték segítségével hozunk döntést arról, hogy szükséges-e (megéri-e) a beavatkozás.
- Egyre több tanulmány foglalkozik az újraütemezési folyamat stabilitási aspektusával, azaz egyrészt az egyes ütemezések „hasonlóságának” mérésével, másrészt az eredeti tervhez minél közelebbi – de a teljesítménykritériumok szerint jobb – új ütemezés előállításának módszereivel: egy hasonló ütemezésre való áttéréssel ugyanis a fent említett költségek jelentős hányada eliminálható.

A LBEL szállításütemezési döntései kapcsán – a fent bemutatott keretrendszer fogalmait használva – azt mondhatjuk, hogy egy statikus, de bizonytalan paraméterekkel jellemzett újraütemezési környezettel állunk szemben. Egyrészt a bizonytalanság (empirikus adatok hiányában) várhatóan tolerálható szintje, másrészt az ellátási lánc karakterisztikái lehetővé teszik, hogy a beszállítási ütemtervek kisebb mértékű módosítása ne okozzon észrevehető költségnövekedést. A kismértékű módosítás azt jelenti, hogy a járművek újraütemezése nem jár együtt például a felrakodó berendezések jelentős mozgatásával vagy a munkaerő vezénylés jelentős mértékű átalakításával, azaz ügyelünk a szállításütemezés stabilitására. Ennek megfelelően a predictive-reactive újraütemezési stratégia és az esemény-vezérelt újratervezési politika alkalmazását javaslom. A hosszabb időhorizonra vonatkozó ütemezési döntések kapcsán a napi tervektől való eltérés, míg a napon belüli ütemezés esetén a kimaradó, késő fuvarok követelik meg az ütemezés megújítását. Ezen túlmenően a jövőre vonatkozó feltételezésekben bekövetkező módosulások (például a fuvarok időhosszának várható változása az időjárási viszonyok függvényében) is szükségessé tehetik az újratervezést (prediktív újraütemezés külső információk hatására). A bekövetkezett vagy várhatóan bekövetkező események hatásának nagyságától függ, hogy egy egyszerű jobbra toló vagy egy teljes újratervezést végrehajtó módszert választunk. A valós időben történő újratervezés (online rescheduling) feltétele, hogy a járművek és a központi tervezési egység között kétirányú, valós-idejű információáramlás valósuljon meg, és megfelelően rövid futási idővel rendelkező ütemezési modellek álljanak rendelkezésre.

A fenti két alfejezetben olyan rugalmasságot növelő eszközöket mutattam be, melyek alkalmazhatók a LBEL kapcsán, de le kell szögezniem, hogy a probléma bizonytalan jellegének precízebb kezelése, valamint az újratervezési szabályok aprólékosabb kidolgozása már túllépnék jelen dolgozat keretein, és további kutatási irányokat jelölnek ki. Az újratervezési megoldások iránt érdeklődő olvasó számára további forrásként ajánlom Pfeiffer (2007) doktori disszertációját, valamint Ngai és mtsai (2012) logisztikai területre fókuszáló tanulmányát.

4.4.6 A Költséghatékonyság-Megbízhatóság trade-off kezelése

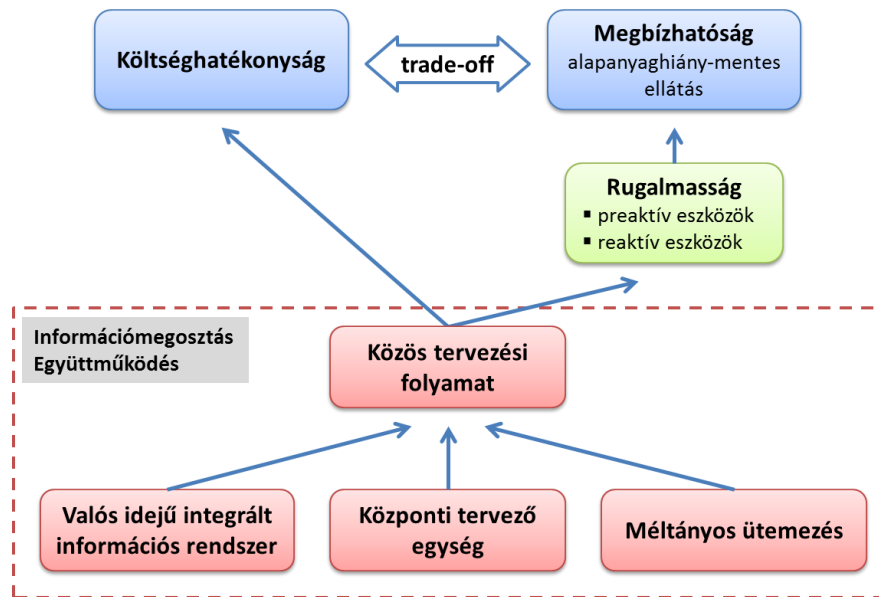
A korábban bemutatott Költséghatékonyság-Megbízhatóság trade-off kapcsán nem töreksem explicit módon összemérhetővé tenni a két attribútumot. Általánosabb és a döntéshozók számára talán több információt nyújtó megoldásként különböző „Költséghatékonyság-Megbízhatóság képességgárral” jellemezhető ütemezéseket állítok elő (Pareto-optimális megoldások). Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy minden egyes ABF (bizonytalansági szint) esetén megadom azt a minimális költségű ütemezést, mely még biztosítja az alapanyaghiány-mentes ellátást. Az egyes ABF-ek esetén tehát a Megbízhatóság képesség prioritást élvez a Költséghatékonysággal szemben, de a valós működés során a döntéshozók – saját preferenciáiknak megfelelően – természetesen választhatnak olyan ABF-et (és ahhoz tartozó Költséghatékonyság-Megbízhatóság képességgárt) is, mellyel alulbecslik a valós kockázatokat. Így alacsonyabb költségű, de valószínűleg alapanyaghiányt elszenvedő szállítási tervet nyernek.

4.4.7 Támogató versenyprioritások a szállításütemezési döntésekben

A támogató versenyprioritások közül az Információmegosztás és az Együttműködés képességek szerepe hangsúlyos a szállításütemezési döntések meghozatala során. Ezek kapcsán az alábbi elemeket érdemes kiemelni:

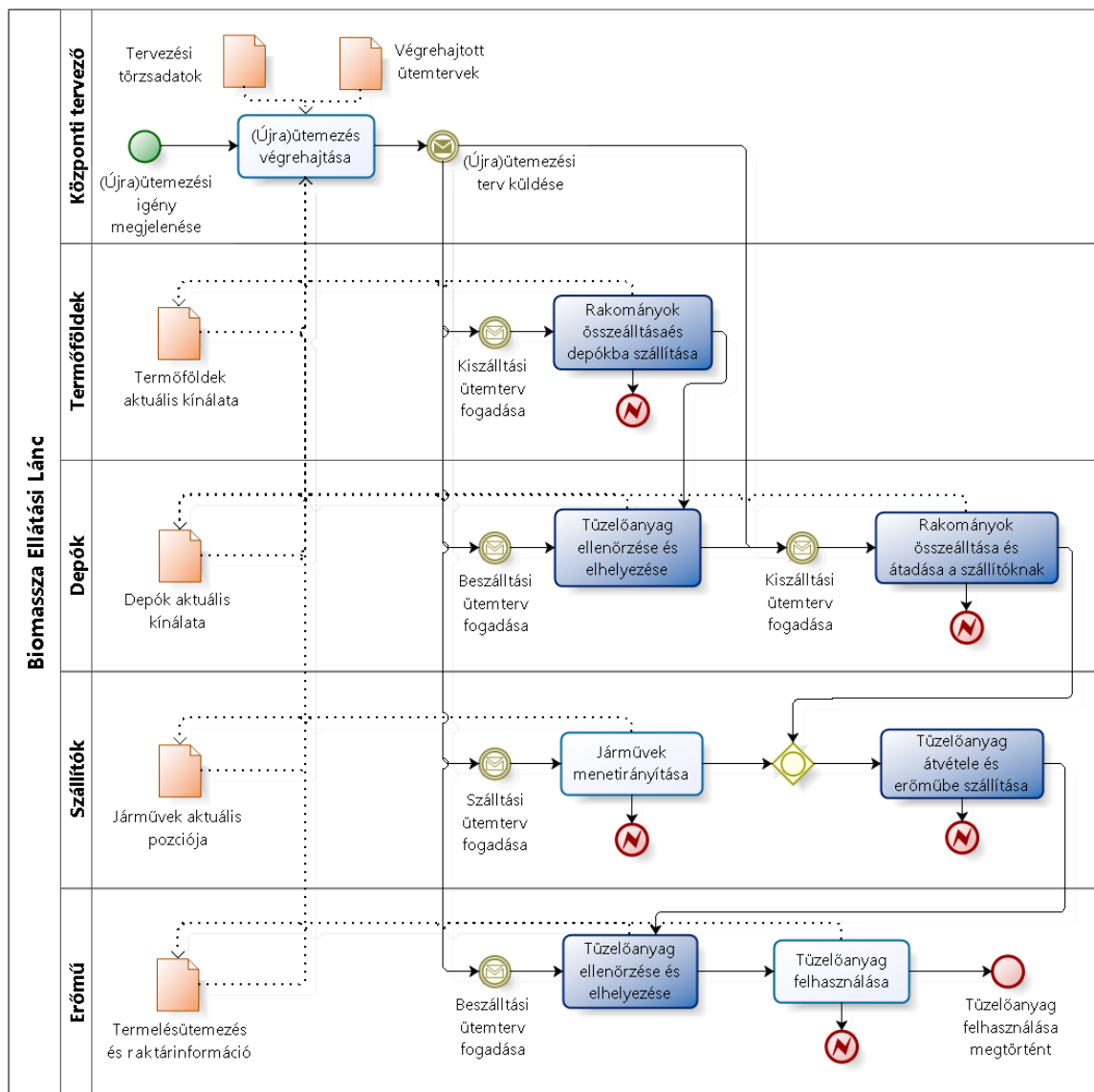
- Közös tervezési rendszer: a teljes ellátási lánc szempontjából optimális ütem- és kapcsolódó kapacitástervek kidolgozására van szükség, ami támogatja a Költséghatékonyság és Megbízhatóság versenyprioritások fejlesztését.
- Központi tervező, irányító egység: az előző pontban említett tervezési folyamatot egy központi egységnek kell végrehajtania, melynek feladatköre a különböző kockázatkezelési beavatkozások megtételétől a szállításütemezési tervek folyamatos aktualizálásáig terjed. Lehetséges megoldásként merül fel az is, hogy a teljes beszállítási folyamat tervezése, irányítása és fejlesztése egy 4PL (Fourth-Party Logistics) szolgáltatónak kerül kiszervezésre.
- Jövedelem- és kockázatmegosztás: mivel a több önálló szervezetből álló és közös tervezési rendszert alkalmazó ellátási láncokban előfordulhat, hogy bizonyos tagok számára szuboptimális döntések születnek, ezért szükséges egy olyan mechanizmus kialakítása, mely az ellátási lánc közös jövedelmét méltányos módon allokálja a lánc szereplői között. Ez az elem speciális követelményt támaszt a szállításütemezési modellekkel szemben. Mivel a gyakorlatban a termelők az általuk előállított tüzelőanyag beszállítása után kapják meg annak ellenértékét, valamint a biomassza termőföldeken történő tárolása bizonyos fokú állagromlással jár, és hasznos területet foglal, ezért biztosítani kell, hogy ne legyenek méltánytalan egyenlőtlenségek a termelők között a beszállítás éven belüli eloszlása tekintetében (Méltányos ütemezés).
- Integrált információs rendszer: a közös tervezési és jövedelem-megosztási rendszer alapja a tagokat átfogó információs rendszer és a valós idejű információmegosztás. GPS és mobil technológiára épülő Intelligens Szállítási Rendszernek (Intelligent Transportation System) kell összekötnie a járműveket, az egyes telephelyeket és a központi tervező egységet. (Bielli és mtsai 2011) Ez teszi lehetővé azt, hogy a nem várt események bekövetkezése esetén a lehető leghamarabb megtörténhessen a beavatkozási tervek végrehajtása.

A 4.4-es alfejezet megállapításait foglalja össze a 4.6 ábra:



4.6 ábra LBEL versenyprioritások megjelenése a szállításiütemezési döntésekben

A biomassza ellátási lánc fő szereplőit és az azok által végrehajtandó fő folyamatokat mutatja be a – BPMN folyamatleíró nyelvet alkalmazó – 4.7 ábra, mely a korábban bemutatott anyagáramlást szemléltető 2.4 ábra kiegészítése. Itt már külön szereplőként tüntettem fel a Központi tervező egységet, ami az egyes ellátási lánc tagoktól származó információkat használja fel az ütemezés során. A teljes folyamat az '(Újra)ütemezési igény megjelenése' állapottól indul, melyet aktiválhat egyrészt a tervezési időszakok kezdete, másrészt a nem várt események utáni újraütemezési igény. A „villámjel”-ek a váratlan események bekövetkezési lehetőségére utalnak, melyek újraindíthatják a teljes folyamatot.

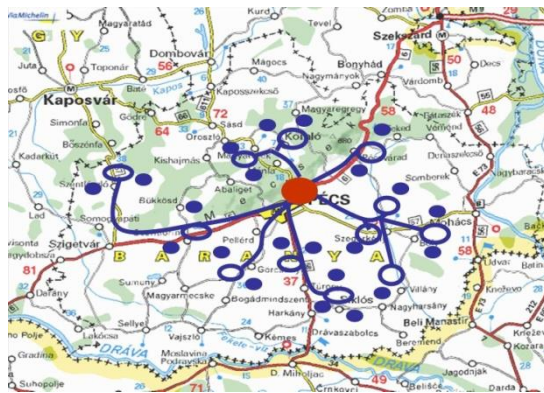


4.7 ábra A lágyszárú biomassza ellátási lánc fő szereplői és folyamatai – Központi tervező egységgel

5 A LBEL hierarchikus szállításütemezési folyamata

A dolgozat további fejezeteiben elemzett esettanulmány nagyban hasonlít a Ravula és mtsai (2008a), valamint Judd és mtsai (2012) által vizsgált ellátási lánc konfigurációkra, és a Pécssett megvalósuló biomassza-tüzelésű erőmű ellátási láncára. Azt azonban fontos megjegyezni, hogy a megvalósult biomassza ellátási láncok több-kevesebb speciális jellemzővel rendelkezhetnek. Célom az volt, hogy az itt ismertetendő hierarchikus ütemezési folyamat megfelelő kiindulási alapként szolgáljon hasonló biomassza ellátási láncok döntéstámogató megoldásaihoz is.

A szállításütemezési döntési modellek kidolgozása során azon feltételezésből indulok ki, hogy az ellátási lánc hálózata adott. Ismertek a hálózatot jellemző paraméterek, mint például a termőföldek és a depók térbeli elhelyezkedése, az egyes helyszínek közötti szállítási útvonalak hossza, a termőföldek kínálata, az erőmű kereslete. A hálózattervezés és az aggregált tervezés döntéseit már meghoztuk. Az 5.1 ábra illusztrálja a termelőföldek, a depók és az erőmű ellátási hálózatát.



5.1 ábra Az erőmű, a depók (○) és termőhelyek (●) hálózatának illusztrációja

A kétszintű csillag topológia élein a termelők a hozzájuk legközelebbi depóba szállítják az alapanyagot, ami aztán az erőműbe jut. Sem a termőföldek, sem a depók között nem jelölök ki szállítási útvonalakat, hiszen ezek kínálata messze meghaladja a szállító járművek kapacitását, azaz gyűjtőjáratok indítására nincs szükség. A valóságban 40-60 darab depóval és háromszor ennyi termőfölddel számolhatunk.

Az alkalmazott tervezési horizont hossza egy év. Az alapanyag betakarítása az év egy viszonylag rövid, jól behatárolható időszakában történik meg, és az így keletkező biomassza kínálat fedezi az erőmű éves keresletét. Az optimalizálás során figyelembe veendő célok többsége éves vagy rövidebb időszakon értelmezett (például a kamionok tétlen idejének minimalizálása). A középtávú célok, mint például a járműflotta méretének minimalizálása kapcsán érdemes több évre is megoldani a modelleket, majd ezen eredmények együttes felhasználásával hozni döntést. A kidolgozott modellek számítási időszükségletét csökkentené az egy évnél rövidebb tervezési horizont alkalmazása. Ebben az esetben két fő kérdést kell előzetesen megválaszolni:

- Miként szükséges az éves szintű input paraméterek (például az egyes termőföldek/depók éves biomassza kínálata) értékét megosztani a rövidebb tervezési időszakok között?
- Miként szükséges a hosszabb időtávra vonatkozó eredményváltozók (például járműflotta nagysága) értékét aggregálni?

A modellekben az éves tervezési horizontot diszkretizálom, annak alapegysége 1 periódus (10 perc), ami egy fuvar erőműben történő lerakódásának időigénye. Az alapanyag mennyisége kapcsán hasonlóan járok el: a depók és az erőmű között alkalmazott homogén járművek kapacitását használom alapegységként (1 fuvar = 15 tonna). Ezt a kapacitásértéket a lágyszárú biomassza alapanyagok esetén nem a szállítható súlyra vonatkozó szabályok, hanem a térfogatkorlát határozza meg.

5.1 A beszállítási folyamat részletes bemutatása

A beszállítási folyamat azon elemeit tekintem át az alábbiakban, melyek lényegesek a szállításiütemezés szempontjából (a 2.4 és 4.7 folyamatleíró ábrákkal összhangban). A húzó rendszerű anyagáramlásnak megfelelően, végrehajtási sorrendjükkel ellentétesen veszem sorba ezeket, melynek praktikus oka, hogy a leíró paraméterek származtatása is ebben a sorrendben történik:

1. Biomassza tüzelése
2. Biomassza bálák raktározása az erőműnél, raktárközi anyagmozgatás
3. Biomassza lerakódása az erőmű raktáraiban
4. Biomassza erőműbe szállítása
5. Biomassza kamionra rakodása
6. Biomassza depóba szállítása
7. Biomassza bálák raktározása a termőföldeken

5.1.1 Biomassza tüzelése

Az erőmű kazánjának tervezett működési ideje évi kb. 8 000 óra (~333nap). Az év fennmaradó 760 órája megoszlik a tervezett karbantartás 4 hete (672 óra) és az üzemzavarok várható értéke között. A 35MW-os kazán alapanyagigénye 30 tonna/óra, azaz évente 240 000 tonna (16 000 fuvar) biomasszát tüzel el (üzemzavarok nélkül 242 600 tonna és 16 176 fuvar).

5.1.2 Biomassza bálák raktározása az erőműnél, raktárközi anyagmozgatás

A tüzelés folytonosságának biztosítása érdekében – az előző fejezetben leírtaknak megfelelően – az erőmű telephelyén tüzelőanyag felhalmozására van szükség. A lágyszárú biomassza alacsony sűrűsége miatt azonban ez a mennyiség erősen korlátozott: három napra elegendő készlet (2 160 tonna) térfogatigénye például – az alapanyag fajtájától és a tömörítés mértékétől függően – 9-13 000 m³ között mozog. Az üzemi raktárt (at-plant storage) futószalag köti össze a kazánnal. Ha helyhiány miatt nem biztosítható elegendő kapacitás az üzemi raktárban, úgy érdemes kiépíteni egy, az erőmű telephelyéhez közeli második raktárhelyet is (külső raktár), ami pufferként szolgálhat a depók megközelíthetlensége esetén. Jelen esettanulmányban feltételezem, hogy az üzemi raktár kapacitása 1 500 tonna (100 fuvar, 50 órányi kereslet), valamint az erőmű rendelkezik egy külső raktárral. A döntési modellekben a napvégi (éjféli) készletszint nagyságát tartom számon, melynek értéke legalább 12 fuvarnyi kell, hogy legyen az üzemi raktárban. Ezzel biztosítható ugyanis a kazán tüzelőanyag-ellátása a nap első fuvarjának beérkezéséig (6 órányi kereslet). Raktárközi anyagmozgatás csak a külső raktárból az üzemi raktárba irányulhat (napi kapacitása 900 tonna). Ennek hatékonysága azonban elmarad a depókból történő közúti szállítástól. A matematikai modellek természetesen adaptálhatók más raktár-konfigurációk esetére is.

A kidolgozott modellek egyik célja, hogy segítségükkel meghatározzam a külső raktár kapacitásának szükséges nagyságát különböző aggregált bizonytalansági forgatókönyvek (ABF) mellett. A beszállítási ütemtervhez kapcsolódóan megadom a raktárközi anyagmozgatás napi értékét is.

5.1.3 Biomassza lerakódása az erőmű raktáraiban

A beszállítás során korlátként jelentkezik, hogy bizonyos időszakokban nem végezhető fuvarozás (kamion-stop), vagy az erőmű nem fogadhat járművet (hétvégi és éjszakai zajterhelési korlátozások). Jelen esetben felteszem, hogy csak munkanapokon 6:00-21:00 között érkezethetők be fuvarok. A bálák járműről való lerakódása automatizált híddaruk segítségével történik, melyekből a raktárakban egy-egy darab található (az üzemi raktárban – kockázatminimalizálási szempontok miatt – két híddaru telepítése javasolt, de a modellekben egy berendezés üzemeltetésével számolok). Egy fuvar lerakódása 10 percet vesz igénybe (1 periódus), ami egyben meghatározza az erőmű fogadó kapacitását is: a 6:00-21:00 óra közötti időszak 90 periódusra osztható, így lerakodó berendezésenként naponta legfeljebb 90 fuvart fogadhat az erőmű (a kazán kereslete naponta 48 fuvarnyi tüzelőanyag).

A szállításiütemezési modellek természetesen megadják a lerakodók működtetésének ütemtervét is, és választ adnak azon kérdésre, hogy elegendő kapacitást jelent-e a két lerakodó berendezés.

5.1.4 Biomassza erőműbe szállítása

Az erőmű és a depók közötti szállítási éleket átlagos szállítási idővel jellemzem. A modellekben ezen értékeket egész periódusszámban fejezem ki (1 periódus = 10 perc, az egész értékeket felfelé kerekítéssel nyerem). A gyakorlatban általában eltér az erőműből a depókba (p_a^o), valamint a depókból az erőműbe irányuló (p_a^i) szállítási idő, mivel – a domborzati és közlekedésszervezési tényezőkön túl – a járművek lassabban haladnak rakománnyal, mint üresen (az általánosság korlátozása nélkül felteszem, hogy a depók üzemi és külső raktártól mért távolsága megegyezik). A d -edik depót érintő fuvarok teljes időtartama a következőképpen adható meg: $p_a = p_a^o + p^l + p_a^i + p^u$, ahol p^l a felrakodás p^u pedig a lerakodás időigénye ($p^l = 2$, $p^u = 1$). Amennyiben a modellekben nincs szükség a felrakodási művelet explicit kezelésére, úgy a p_a^o és p_a^i értékek szeparált kerekítése (ld. 5.1 táblázatban Depó 2 esete) helyett elegendő a percben kifejezett szállítási idők összegének felső egészrészét venni.

| Depók (d) | Erőmű-depó szállítási idő (perc; periódus – p_a^o) | Depó-erőmű szállítási idő (perc; periódus – p_a^i) | Fuvar időtartama (perc; periódus – p_a) |
|---------------|--|--|---|
| Depó 1 | 47; 5 | 55; 6 | 132; 14 |
| Depó 2 | 32; 4 | 36; 4 | 98; 11 |
| ... | ... | ... | ... |

5.1 táblázat Szállítási időigény az erőmű és a depók között

Figyelembe véve a kazán négyhetes tervezett karbantartását és a lerakodási időszakokra vonatkozó korlátozásokat, az évi beszállítási napok száma kb. 230 (2013-ban 231). Ez azt jelenti, hogy naponta átlagosan kb. 70 fuvart kell beérkeztetni az erőmű raktáraiba. Fontos kiemelni, hogy a járművek speciális kialakítása miatt azok csak korlátozott mértékben vagy egyáltalán nem használhatók fel más szállítási feladatok elvégzésére. (Ravula és mtsai 2008a)

A kidolgozott modellek célja a beszállítást végző járművek ütemezésének meghatározása, amiből már könnyedén származtatható a szükséges járműflotta mérete. A beszállítási ütemterv időegysége 1 periódus, azaz 10 perces részletességű menetrendet nyerünk.

5.1.5 Biomassza kamionra rakodása

A felrakodó berendezéseket a fuvarozást végző szervezeti egység üzemelteti, ami egyrészt a felrakodási tevékenységet, másrészt az eszközök depók közötti mozgatását foglalja magában. A kamionok terhelését annak vezetője végzi el, ami 20 percet vesz igénybe. A felrakodó berendezéseket – a hatékony üzemeltetés és a szervezési feladatok minimalizálása érdekében – csak hétvégén lehet mozgatni a depók között, valamint a meghibásodások miatti veszteségek és a kamionok torlódásának elkerülése érdekében azokat mindig párban kell telepíteni.

Az ütemezési modellek megadják a felrakodó berendezések szükséges számát, valamint azok használatának operatív tervét. Érdekes útvonal-tervezési feladatként jelentkezik a felrakodók mozgatásának optimalizálása is, de ezzel nem foglalkozom jelen dolgozatban.

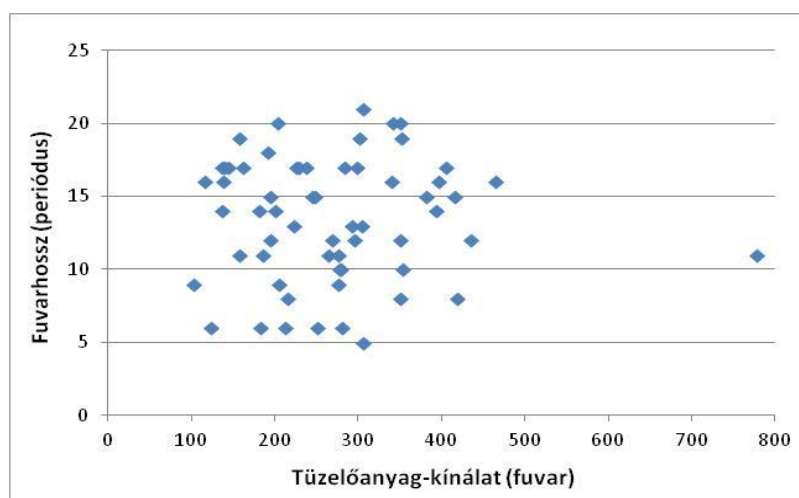
5.1.6 Biomassza depóba szállítása

A biomassza-termelők a számukra előírt szállítási tervnek megfelelően juttatják el a szükséges alapanyag-mennyiséget a hozzájuk legközelebb eső depóba. Ezen ütemterv kidolgozásával részletesen nem foglalkozom a dolgozatban, egy egyszerű – a depókból történő kiszállításra épülő – feltöltési szabályt fogalmazok csak meg. A depókat a hozzájuk rendelt termőföldek aktuális kínálatának összegével jellemezhetjük (5.2 táblázat).

| Depók | Éves biomassza kínálat (tonna) | Éves biomassza kínálat (fuvarszám) |
|--------|--------------------------------|------------------------------------|
| Depó 1 | 12 000 | 800 |
| Depó 2 | 7 500 | 500 |
| ... | ... | |

5.2 táblázat Az egyes depók éves biomassza kínálata

Az esettanulmány során 60 depóval számolok, melyek a következőképpen helyezkednek el a tüzelőanyag-kínálat és fuvarhossz dimenziók által meghatározott térben (5.2 ábra).



5.2 ábra Az egyes depókhoz tartozó éves tüzelőanyag-kínálat és fuvarhossz

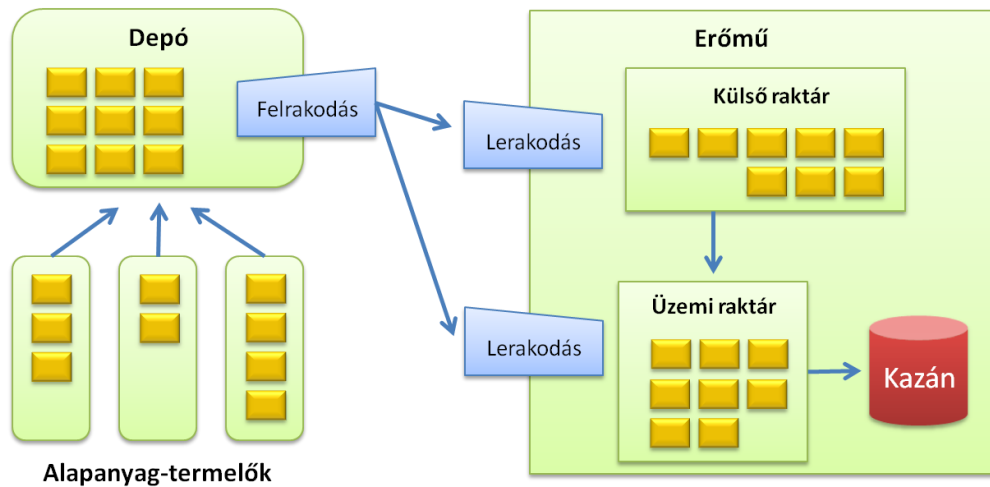
5.1.7 Biomassza bálák raktározása a termőföldeken

Betakarítás után a biomassza bálákat a termőföldek egy meghatározott pontján rakják kazalba. A termőföldeket aktuális kínálatukkal jellemezhetjük (5.3 táblázat).

| Termőföldek | Éves biomassza kínálat (tonna) | Éves biomassza kínálat (fuvarszám) |
|---------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Termelőföld 1 | 3 000 | 200 |
| Termelőföld 2 | 4 500 | 300 |
| ... | ... | ... |

5.3 táblázat Az egyes alapanyag-termelők éves biomassza kínálata

Az esettanulmány beszállítási folyamatának releváns elemeit mutatja az 5.3 ábra.



5.3 ábra Lágyszárú biomassza beszállítási folyamata

A beszállítási folyamat részletes leírása után, a következő szakaszban bemutatom az ütemezési modellek eredményeként várt output tartalmát (beszállítási menetrend), valamint az ennek előállításához kidolgozott háromfázisú hierarchikus ütemezési folyamatot.

5.2 A hierarchikus ütemezési folyamat végső outputja és három döntési fázisa

Az ütemezési folyamat outputjában a tervezési időhorizont minden egyes lerakodási periódusa (munkanapok 6:00 és 21:00 közötti 10 perc hosszúságú időablakai) és minden egyes lerakodó berendezés esetén megadom, hogy történik-e fuvar érkeztetése, és ha igen, akkor az melyik depóból származik és melyik járművel került beszállításra. A raktárközi alapanyag-mozgatás nem érinti a lerakodó berendezéseket, itt csak napi részletességű ütemezést adok. Két végletes megoldást illusztrál az 5.4 táblázat.

| Lerakodási periódus | Ütemezés 1 | | Ütemezés 2 | |
|---------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | Üzemi raktár | Külső raktár | Üzemi raktár | Külső raktár |
| 2013.01.02. 6:00 | Depó 1 – Jármű 1 | Depó 1 – Jármű 2 | Depó 1 – Jármű 1 | Depó 2 – Jármű 2 |
| 2013.01.02. 6:10 | Depó 1 – Jármű 3 | Depó 1 – Jármű 4 | Depó 3 – Jármű 3 | Depó 4 – Jármű 4 |
| 2013.01.02. 6:20 | Depó 1 – Jármű 5 | Depó 1 – Jármű 6 | Depó 5 – Jármű 5 | Depó 6 – Jármű 6 |
| ... | ... | ... | ... | ... |

5.4 táblázat LBEL szállításütemezés két végletes megoldása

Ahogy korábban már láttuk, egy éves tervezési időhorizont esetén 16 176 fuvarral, raktáranként kb. 20 700 lehetséges lerakodási periódussal (kb. 230 beszállítási nap és napi 90 lerakodási periódus), valamint 40-60 depóval számolhatunk. A fenti kombinatorikus optimalizálási feladat lehetséges megoldásainak száma rendkívül nagy. A LBEL versenyprioritás struktúrából származtatott – és a következő alfejezetben részletesen bemutatandó – célfüggvények szerinti legjobb megoldások megkeresése rendkívül nagy számításigényű probléma, így nem várható, hogy az eredeti feladat dekompozíciója nélkül tolerálható időtávon belül optimális, vagy akár csak közel optimális megoldást nyerünk. Természetesen adott a lehetőség, hogy valamilyen (meta)heurisztika segítségével próbáljuk kezelni a problémát, de jelen dolgozatban a szekvenciális döntési fázisra bontás módszerét alkalmazom.

A fentieknek megfelelően, az alábbi három döntési fázisra bontom az eredeti feladatot:

1. Napok közötti ütemezés
2. Depók közötti allokáció
3. Napon belüli ütemezés

Az 1. döntési fázisban a tervezési időszak minden egyes napjára megadom a beszállítandó fuvarok számát (5.5 táblázat). Az erőmű kereslete – leszámítva a négyhetes, nyári karbantartási időszakot – állandó, így a napvégi készlet szint nagyságát a beérkezett fuvarok száma határozza meg. Az illusztrációs példa utolsó két napja szombat és vasárnap, ekkor nem történik beszállítás (a továbbiakban a tüzelőanyag mennyiségét fuvarszámomban adom meg, 1 fuvar = 15 tonna).

| Dátum | 01.07. | 01.08. | 01.09. | 01.10. | 01.11. | 01.12. | 01.13. |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Kereslet | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 |
| Fuvarszám üzemi raktárba | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | - | - |
| Fuvarszám külső raktárba | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | - | - |
| Raktárközi anyagmozgatás | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 43 | 43 |
| Napvégi készlet üzemi raktárban | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 5 | 0 |
| Napvégi készlet külső raktárban | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 57 | 14 |

5.5 táblázat 1. döntési fázis – Napok közötti ütemezés

Ezen fázis eredményeként megkapjuk a raktárközi anyagmozgatás ütemezését, valamint a külső raktár és a lerakodási berendezések szükséges kapacitását is.

A 2. döntési fázisban adottnak tekintem a napi fuvarszámokat. Itt a napi fuvarszámok depók közötti allokációja történik meg (5.6 táblázat).

| Dátum | 01.07. | 01.08. | 01.09. | 01.10. | 01.11. | Kapacitás |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Fuvarszám | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 350 |
| Depó 1 | 70 | | | 5 | 5 | 80 |
| Depó 2 | | 40 | 30 | | 10 | 80 |
| Depó 3 | | 30 | 40 | 20 | | 90 |
| Depó 4 | | 0 | 0 | 45 | 55 | 100 |

5.6 táblázat 2. döntési fázis – Depók közötti allokáció

Az alkalmazott döntési modellek eredményeként megkapjuk a felrakodó berendezések szükséges számát és a szállító jármű-flotta becsült méretét is.

Végül, a 3. döntési fázisban – ismert fuvarszám és depók közötti allokáció mellett – végzem el a fuvarok napon belüli ütemezését (5.7 táblázat). Az illusztrációs példán – a korábbi döntéseknek megfelelően – 70 fuvar beszállítása történik meg, melyek az első (5 fuvar), második (10 fuvar) és negyedik (55 fuvar) számú depókból származnak. Mivel a lehetséges lerakodási periódusok száma (180) meghaladja a tényleges beszállítások számát, ezért üres lerakodási időablakokat is találunk.

| | Üzemi raktár | Külső raktár |
|------------------|------------------|------------------|
| Fuvarszám | 50 | 20 |
| 2013.01.11. 6:00 | Depó 2 – Jármű 1 | Depó 4 – Jármű 2 |
| 2013.01.11. 6:10 | Depó 2 – Jármű 3 | Depó 4 – Jármű 4 |
| 2013.01.11. 6:20 | – | Depó 1 – Jármű 5 |
| 2013.01.11. 6:30 | Depó 1 – Jármű 1 | – |
| ... | ... | ... |

5.7 táblázat 3. döntési fázis – Napon belüli ütemezés

Az utolsó döntési fázis során adom meg a kamionok, valamint a fel- és lerakodó berendezések részletes ütemezését, valamint a járműflotta méretét.

Amennyiben a teljes biomassza kereslet nem haladja meg a teljes kínálatot, úgy nem fordulhat elő egyik döntési fázisban sem, hogy megoldhatatlan (túlkorlátozott) feladathoz jutunk. Ahogy az egyes döntési fázisok részletes bemutatásánál látni fogjuk, a hierarchikus dekompozíció eredményeként kezelhető méretű és komplexitású modelleket nyerünk.

5.3 A LBEL versenyprioritás struktúra és a döntési fázisok kapcsolata

Természetesen, a döntési fázisok során nyerhető megoldások eltérő nagyságú raktárkapacitást, készlet szintet, járműparkot igényelhetnek, a járművek, berendezések használatában eltérő fokú hatékonyságot eredményeznek, valamint nem egyformán támogatják a Megbízhatóság versenyprioritás fejlesztését. A hierarchikus ütemezési folyamat célkitűzése, hogy megtalálja azon megoldásokat, melyek a legjobban illeszkednek a lágyszárú biomassza ellátási lánc céljaihoz, a leginkább támogatják az előző fejezetben felvázolt versenyprioritás struktúrát (ld. 4.6 ábra). A továbbiakban feltételezem, hogy a támogató versenyprioritások közül az Információmegosztáshoz kapcsolódó elemek rendelkezésre állnak, azaz valós idejű kommunikáció valósítható meg az ellátási lánc szereplői között, valamint a tervezési, ütemezési feladatokat egy központi egység végzi. A közös tervezési folyamat bemutatása a következő fejezetek feladata.

Érdeemes újra felidézni, hogy az ütemezési modellek futtatása során különböző aggregált bizonytalansági forgatókönyvek (ABF) bekövetkezését tételezem fel, melyek az ellátási rendszer bizonytalanságának szintjét jelzik. Ezek mellett keresem azon alapanyaghiány-mentes (azaz megbízható) ütemezéseket, melyek a Költséghatékonyság versenyprioritáshoz kapcsolódó célok szerint optimálisak. Az alapanyaghiány-mentes beszállítás igénye azonban megköveteli a Rugalmasságot növelő preaktív eszközök alkalmazását, melyek kiegészítő feltételek és célfüggvények formájában jelennek meg a matematikai modellekben. Ezekon kívül, speciális korlátozó feltételek használatával biztosítható az alapanyag-termelők szempontjából méltányos ütemezés előállítása.

5.3.1 Költséghatékonyság és Együttműködés versenyprioritások célkitűzései

Elsőként a Költséghatékonysághoz kapcsolódó célkitűzéseket mutatom be az anyagáramlás mentén (5.8 táblázat).

| Állomás | Típus | Célkitűzés |
|------------------------|-------------------------|--|
| Felrakodás a depóknál | Minimális beruházás | Felrakodó berendezések számának minimalizálása A felrakodó berendezések mozgatása számottevően alacsonyabb költséggel jár, mint addicionális beszerzésük, ezért törekedni kell ezek számának minimalizálására. A korábban leírtaknak megfelelően a felrakodó eszközök mindig párban és csak hétvégén mozgathatók. Ebből az következik, hogy adott héten a munkába állított eszközök száma megegyezik az ezen időszakban meglátogatott depók számának kétszeresével. |
| Beszállítás az erőműbe | Minimális beruházás | Járműflotta méretének minimalizálása A logisztikai rendszer meghatározó költségtétele a járműparkba (kamionok) történő beruházás. A járművek speciális kialakítása miatt azok csak korlátozott mértékben vagy egyáltalán nem használhatók fel más szállítási feladatok elvégzésére. |
| | Hatékony üzemeltetés | Kamionok tétlen idejének minimalizálása Ezen cél főként a sofőrök bérjellegű költségeinek redukálásához járul hozzá. |
| Raktározás az erőműnél | Minimális beruházás | Külső raktár kapacitásának minimalizálása Az egyes raktárak kapacitása legalább akkora kell legyen, mint a napi készletcsúcsok legnagyobb értéke. Mivel naponta eltér a fuvarok beérkezésének időbeli eloszlása, ezért a napi készletcsúcs elérésének időpontja sem állandó. Azonban a napi készletcsúcs értéke nem lehet magasabb, mint a napvégi (éjféli) készlet és a napi eltüzelt mennyiség (48 fuvar) összege. Ezt kihasználva, az optimalizáló modellekben a napvégi készletszint értékével helyettesítem a készletcsúcs nagyságát. Az üzemi raktár esetén a napvégi készletszint nagysága legfeljebb 100 fuvarnyi lehet, míg a külső raktár esetén célként jelenik meg a kapacitás minimalizálása. |
| | Minimális anyagmozgatás | Raktárközi anyagmozgatás minimalizálása Mivel a raktárközi anyagmozgatás kevésbé hatékony, mint a közúti szállítás, így törekedni kell annak minimalizálására. Ennek eredményeként a tüzelőanyag-beszállítás elsősorban az üzemi raktárt célozza majd. |

5.8 táblázat A Költséghatékonyság versenyprioritáshoz kapcsolódó célok

Ahogy korábban írtam, a termelők a tüzelőanyag elszállítása után kapják meg annak ellenértékét, valamint a biomassza termőföldeken történő tárolása bizonyos fokú állagromlással jár, és hasznos területet foglal, ezért törekedni kell arra, hogy a beszállítás és így a pénzbeli kifizetések ütemezése méltányos legyen (például ne érjen negatív diszkrimináció egyes termelőket általa, hogy csak a tervezési időszak végén jutnak bevételhez). Mivel a hierarchikus ütemezési folyamatban a termelőktől a depókba történő beszállítással nem foglalkozom részletesen, így a modellekben csak azt a szükséges követelményt jelenítem meg, amely a depók szintjén biztosítja a méltányosságot (5.9 táblázat). Ha ez teljesül, akkor a depókba történő beszállítás ütemezésére kidolgozandó algoritmusban ez továbbbontható a termelők irányába.

| Versenyprioritás elem | Célkitűzés |
|-----------------------|---|
| Méltányos ütemezés | Depónkénti átlagos szállítási hét maximumának minimalizálása (célfüggvény) A depónkénti átlagos szállítási hét értéke a beszállított tüzelőanyag mennyiségével súlyozva számítható. Az így nyert értékekhez bevezetett felső korlát minimalizálásával érem el, hogy a beszállítás „átlagos hete” hasonló legyen minden depó esetén. |
| | Likviditási ciklus feltétel (feltétel) A kifizetések viszonylagos egyenletességének biztosítása érdekében „likviditási ciklusokat” képezek (például 4 hónap), mely időszakok alatt minden depóból |

| | |
|--|---|
| | szükséges bizonyos mennyiségű fuvart indítani (például az egyes depók összes kínálatának legalább 20 százalékát). |
|--|---|

5.9 táblázat Az Együtműködés versenyprioritáshoz kapcsolódó modellelemek

Mielőtt rátérek a Rugalmasság képességhez kapcsolódó eszközök tárgyalására, megvizsgálom, hogy miként kapcsolódnak a fenti célkitűzések az előző szakaszban bemutatott döntési fázisokhoz (5.10 táblázat). Pontosabban azt elemzem, hogy az egyes döntési fázisok befolyással bírnak-e ezen kritériumok értékére (vagy a korlátozó feltételként megfogalmazott célkitűzés érdemben szűkíti-e a döntési fázisok megengedett megoldásainak halmazát). Az egyes döntési fázisok bizonyos célkitűzések elérését erőteljesen befolyásolják („X”), míg mások számára gyakorlati („–”) vagy elméleti („–”) szempontból közömbösek.

| Verseny-prioritás | Célkitűzések | 1. döntési fázis | 2. döntési fázis | 3. döntési fázis |
|----------------------------|--|------------------|------------------|------------------|
| Költség-hatékonyság | Felrakodó berendezések számának minimalizálása | – | X | – – |
| | Járműflotta méretének minimalizálása | – | X | X |
| | Kamionok tétlen idejének minimalizálása | – | – | X |
| | Külső raktár kapacitásának minimalizálása | X | – – | – |
| | Raktárközi anyagmozgatás minimalizálása | X | – – | – – |
| Méltányos ütemezés | Depónkénti átlagos szállítási hét maximumának minimalizálása | – | X | – – |
| | Likviditási ciklus feltétel | – | X | – – |

5.10 táblázat Célkitűzések és döntési fázisok kapcsolata

A fenti táblázatban megfogalmazott első célt, a felrakodó berendezések számának minimalizálását elemezve azt mondhatjuk, hogy annak értékét alapvetően a 2. döntési fázis határozza meg. Itt allokáljuk ugyanis a napi fuvarszámokat az egyes depók között (egy adott héten a meglátogatott depók száma adja meg a munkába állítandó felrakodó berendezések számát). Mivel a 3. döntési fázisban (napon belüli ütemezések) adott a fuvarszám és a meglátogatandó depók halmaza, így ez a döntési szituáció semmilyen módon nem hat a vizsgált célkitűzésre. Bár az 1. döntési fázisban elképzelhető olyan megoldás (például extrém módon ingadozó napi fuvarszámok), ami szűkíthetné a 2. döntési fázis „mozgásterét” a vizsgált kritérium értékét illetően, de egyrészt ezen szélsőséges megoldások nem relevánsak a gyakorlatban, másrészt a célfüggvény értékkészlete sem csökkenne számottevő mértékben. Az 5.10 táblázat tehát megmutatja, hogy az egyes döntési modellekbe mely célkitűzéseket kell bevonni.

Döntési fázisok közötti konfliktus abban az esetben léphet fel, ha

- van olyan átnyúló célfüggvény, ami több döntési fázisban is megjelenik,
- a korábbi döntési fázis eredményeként ezen célfüggvény értékét rögzítjük, és
- a követő döntési fázisban ez a cél trade-off kapcsolatban áll más kritériumokkal.

Ebben az esetben ugyanis a rögzített célfüggvényérték jelentősen szűkítheti a követő döntési fázis lehetséges megoldásainak halmazát és a trade-off kapcsolatban lévő többi célfüggvény

értékkészletét. Ilyen esetben visszatérhetünk a korábbi döntési fázishoz, és az átnyúló célfüggvény optimális értékén „lazítva” nagyobb mozgásteret hagyhatunk a követő döntési fázisban.

Az 5.10 táblázatban az egyetlen átnyúló cél, melyre két döntési fázis is érdemben tud hatni, a járműflotta méretének minimalizálása. Azonban a 2. döntési fázisban még nem történik meg a járművek részletes ütemezése, így a szükséges járművek számát sem rögzítem a 3. döntési fázis előtt, azaz nem szűkítem érdemben az utolsó fázis megengedett megoldásainak halmazát.

5.3.2 Rugalmasság versenyprioritás célkitűzései

A Rugalmasság képességet fejlesztő preaktív eszközöket foglalja össze az 5.11 táblázat az anyagáramlás mentén.

| Állomás | Típus | Preaktív eszközök |
|------------------------|--------------------------------|--|
| Felrakodás a depóknál | Megemelt kapacitás | Felrakodó berendezések számának alsó korlátja (modellen kívüli feltétel) Mivel az esettanulmányban feltételezem, hogy kettő lerakodó híddaruvál rendelkezik az erőmű, ezért a fel- és lerakodás műveleti idejéből (kettő, illetve egy periódus) az következik, hogy – állásidő nélkül – legfeljebb négy felrakodó berendezést üzemeltethetünk, hogy ne lépjük túl az erőmű napi lerakodási kapacitását (180 lerakodási/nap). A napi tüzelési mennyiség ismeretében (48 fuvar/nap) és a korlátozott raktárkapacitás miatt nem valószínű, hogy sor kerül a lerakodó berendezések ilyen szintű kihasználására, de a rugalmassági követelményeket szem előtt tartva – a minimális beruházási cél korlátozásaként – előírom, hogy legalább hat felrakodó eszközzel rendelkeznie kell a logisztikai rendszernek. |
| | Többforrású ellátás | Többforrású beszállítás követelménye (feltétel) Egyes depók megközelíthetlenségének vagy útvonalak kiesésének negatív következményeit csökkenti, ha egyszerre több depóból történik beszállítás. Ennek érdekében felső korlátot fogalmazok meg az adott napon egy depóból történő beszállítás nagyságára a napi fuvarszám arányában. Ezen arányszám csökkentése természetesen azt eredményezi, hogy egyre több depót kell bevonni az adott napi beszállítás lebonyolításába, ami a felrakodó daruk számának növekedését is maga után vonja. |
| Beszállítás az erőműbe | Megemelt kapacitás | Járműflotta megemelt kapacitása adott ABF-nek megfelelően (feltétel) Explicit alsó korlátot nem fogalmazok meg a kamionok minimális számára, viszont alapvető feltételként jelenik meg a modellekben, hogy különböző ABF-ek mellett is biztosítani kell az alapanyag-ellátást. Ez természetesen emelkedést eredményezhet a járműflotta méretében a determinisztikus esethez képest. |
| | Erőforrás felhasználás simítás | Napi szállítójármű-igény simítása (célfüggvény) A járműflotta méretének minimalizálása célkitűzés bizonyos mértékben csökkenti a napi járműigény értékek ingadozását, azonban érdemes külön célfüggvényt is megfogalmazni ezzel kapcsolatban. Ennek eredményeként csökken a sok járművet igénylő napok száma, ami rugalmasabbá teszi a logisztikai rendszert. |
| Lerakodás az erőműnél | Erőforrás felhasználás simítás | Napi fuvarszámok simítása (célfüggvény) Az előző célkitűzéshez hasonlóan fontos a napi fuvarszámok (azaz a lerakodó berendezés terhelések) egyenletes szinten tartása, mellyel elkerülhető, hogy egy „túlzsúfolt” nap szállításainak kiesésével jelentős alapanyaghiány képződjön. |

| | | |
|-------------------------------|------------------------------------|---|
| | Speciális ütemezési szabály | <p>Speciális ütemezési szabályok (feltétel)</p> <p>Számos speciális szabályt lehet megfogalmazni, melyek a rendszer rugalmasságát javítják. Például kiköthetjük, hogy az adott napra tervezett J számú fuvar az első J lerakodási periódusban kerüljön beérkeztetésre. Ez magasabb járműflottát igényel, mintha széthúznánk azokat a teljes nap folyamán, de lehetőséget teremt arra, hogy még aznap pótoljuk a kieső fuvarokat.</p> <p>Egy másik, robusztusságot növelő ütemezési szabály szerint a páratlan periódusokban kettő, a páros periódusokban nulla fuvar fogadását tervezzük. Ezzel tudatosan tétlen időt építünk a járművek ütemezésébe (ami növelheti a szükséges járművek számát is), de rövidebb csúszások esetén elkerülhető az újraütemezés.</p> |
| Raktározás az erőműnél | Megemelt kapacitás | <p>Külső raktár megemelt kapacitása adott ABF-nek megfelelően (feltétel)</p> <p>Explicit alsó korlátot nem fogalmazok meg a külső raktár kapacitása kapcsán, viszont alapvető feltételként jelenik meg a modellekben, hogy különböző ABF-ek mellett is biztosítani kell az alapanyag-ellátást. Ez emelkedést eredményezhet a raktárkapacitás értékében a determinisztikus esethez képest.</p> |
| | Biztonsági készlet | <p>Biztonsági készlet az erőmű raktáraiban adott ABF-nek megfelelően (feltétel)</p> <p>A tüzelőanyag ellátás nem várt kimaradását az erőmű raktáraiban található biztonsági készlet segítségével hidalhatjuk át. A biztonsági készlet szint értéke napról napra dinamikusan változhat, attól függően, hogy milyen lehetősége van az erőműnek az elmaradt beszállítás pótlására.</p> |

5.11 táblázat A Rugalmasság képességét fejlesztő preaktív eszközök

A Költséghatékonyság és Méltányos ütemezés célkitűzésekhez hasonlóan megvizsgálható, hogy a Rugalmasságot növelő preaktív eszközök mely döntési fázisokban relevánsak. Ennek eredményét tartalmazza az 5.12 táblázat.

| Verseny-prioritás | Eszközök | 1. döntési fázis | 2. döntési fázis | 3. döntési fázis |
|--|--|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | Felrakodó berendezések számának alsó korlátja | Modellen kívüli feltétel | | |
| Rugalmasság (preaktív eszközök) | Többforrású beszállítás követelménye (feltétel) | -- | X | -- |
| | Járműflotta megemelt kapacitása adott ABF-nek megfelelően (feltétel) | -- | X | -- |
| | Napi szállítójármű-igény simítása (célfüggvény) | - | X | -- |
| | Napi fuvarszámok simítása (célfüggvény) | X | -- | -- |
| | Speciális ütemezési szabályok (feltétel) | -- | X | X |
| | Külső raktár megemelt kapacitása adott ABF-nek megfelelően (feltétel) | X | -- | - |
| | Biztonsági készlet az erőmű raktáraiban adott ABF-nek megfelelően (feltétel) | X | -- | -- |

5.12 táblázat Rugalmassági preaktív eszközök és döntési fázisok kapcsolata

Megjegyzem, hogy mivel az alkalmazott ABF-ek – a korábban leírt példákhoz hasonlóan – nagyobb volumenű ellátáskiesést szimulálnak (legalább 90 periódusnyi kiesés a lerakodó berendezéseknél, azaz egy napi lerakodási kapacitás), ezért ezek használata az első és második, azaz hosszabb

időhorizontot érintő döntési fázisok esetén releváns. A kieső beszállítások pótlása azok következő napokra történő átütemezésével történik. Az ezeknél kisebb hatású események (például egy-két órányi beszállítás elmaradás) kezelésére természetesen képes lesz – a magasabb bizonytalansági szintre felkészített – ellátási lánc, ilyenkor gyakran elegendő az aznapi ütemezés újratervezése (reaktív rugalmassági eszközök), azaz a 3. döntési fázis megoldása az aktualizált input paraméterek mellett.

Ahogy a fenti táblázatokból látszik, mindhárom döntési fázishoz több, gyakran „egymás ellen dolgozó” célfüggvényt rendelnek, melynek eredményeként többcélú optimalizálási modelleket nyerünk. A többcélú programozási feladatok kezelésére alkalmas eljárásokról Grossmann és Guillén-Gosálbez (2010) adnak áttekintést. Jelen dolgozatban három módszert alkalmazok:

- abszolút prioritási sorrend felállítása a versengő célok között,
- a célokhoz súlyokat rendelve és azokat összegezve egycélú modell létrehozása,
- Pareto-optimális megoldások megadása, melyek közül a döntéshozó választhatja ki a preferenciáinak megfelelő alternatívát.

Jelen fejezetben részletesen bemutattam a LBEL alapanyag-beszállítási folyamatának egy lehetséges megjelenési variánsát, valamint a szállítási ütemezési feladat kezelésére alkalmas, három döntési fázisból álló hierarchikus ütemezési folyamatot. A Költséghatékonyság versenyprioritás és a Méltányos ütemezés támogató elem kapcsán megfogalmaztam a modellekben figyelembe veendő célkitűzéseket, valamint kifejtettem a Rugalmasság képesség fejlesztésére alkalmazható preaktív eszközöket. Mindezen elemeket döntési fázishoz rendeltem (5.13 táblázat). A következő fejezetekben a hierarchikus ütemezési folyamat egyes fázisaihoz tartozó matematikai modelleket és elemzési lehetőségeket ismertetem részletesen.

| Döntési fázis | Modellelem | Eszközök |
|----------------------------|---------------|---|
| 1. Napok közötti ütemezés | Feltételek | Alapvető technológiai korlátok |
| | | Külső raktár megemelt kapacitása adott ABF-nek megfelelően |
| | | Biztonsági készlet az erőmű raktáraiban adott ABF-nek megfelelően |
| | Célfüggvények | Külső raktár kapacitásának minimalizálása |
| | | Raktárközi anyagmozgatás minimalizálása |
| | | Napi fuvarszámok simítása |
| 2. Depók közötti allokáció | Feltételek | Alapvető technológiai korlátok |
| | | Likviditási ciklus feltétel |
| | | Többforrású beszállítás követelménye |
| | | Járműflotta megemelt kapacitása adott ABF-nek megfelelően |
| | | Speciális ütemezési szabályok |
| | Célfüggvények | Depónkénti átlagos szállítási hét maximumának minimalizálása |
| | | Felrakodó berendezések számának minimalizálása |
| | | Járműflotta méretének minimalizálása |
| | | Napi szállítójármű-igény simítása |
| 3. Napon belüli ütemezés | Feltételek | Alapvető technológiai korlátok |
| | | Speciális ütemezési szabályok |
| | Célfüggvények | Járműflotta méretének minimalizálása |
| | | Kamionok tétlen idejének minimalizálása |

5.13 táblázat A LBEL versenyprioritás struktúra és a döntési fázisok kapcsolata

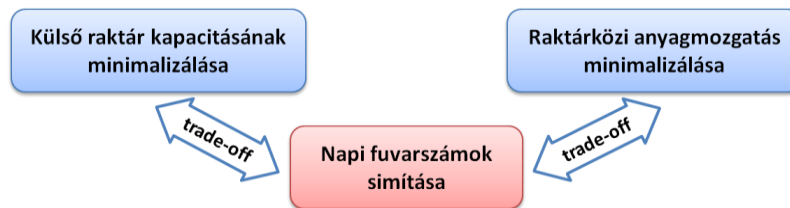
6 A hierarchikus ütemezési folyamat 1. döntési fázisa

Az 1. döntési fázis outputja egy olyan szállítási terv, melyben a tervezési időszak minden egyes napjára megadom a beszállítandó fuvarok számát, miközben elemzem a raktárkapacitás, a biztonsági készlet szint, valamint a raktárközi anyagmozgatás alakulását. Az előző fejezet eredményeként a 6.1 táblázatban felsorolt feltételeket és célfüggvényeket kell figyelembe venni az 1. döntési fázis során.

| Döntési fázis | Modellelem | Eszközök |
|---------------------------|-------------|--|
| 1. Napok közötti ütemezés | Feltétel | Alapvető technológiai korlátok |
| | | Külső raktár megemelt kapacitása adott ABF-nek megfelelően (alapanyaghiány-mentes beszállítás) |
| | | Biztonsági készlet az erőmű raktáraiban adott ABF-nek megfelelően |
| | Célfüggvény | Külső raktár kapacitásának minimalizálása |
| | | Raktárközi anyagmozgatás minimalizálása |
| | | Napi fuvarszámok simítása |

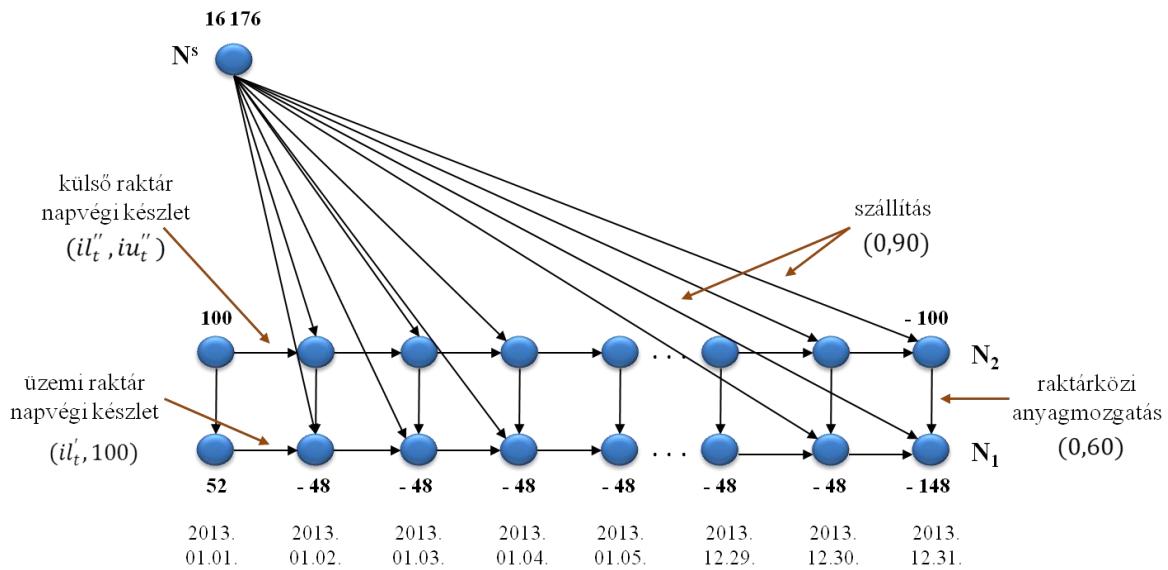
6.1 táblázat Az 1. döntési fázis modellelemei

A döntési fázis három célfüggvénye között a 6.1 ábrán bemutatott kapcsolatrendszert fedezhetjük fel: a külső raktár és így az erőmű teljes tároló kapacitásának alacsony szinten tartása azt eredményezi, hogy a gyakori beszállítási szünettel jellemezhető időszakokban – például a karácsonyi ünnepek idején – megemelkedik a napi fuvarok száma, hiszen nincs lehetőség nagy mennyiségű tüzelőanyag felhalmozására. Hasonló hatást érünk el a raktárközi anyagmozgatás minimalizálásával is, ami valójában a külső raktár „részleges kikapcsolását” jelenti.



6.1 ábra Célfüggvények kapcsolatrendszere az 1. döntési fázisban

Az 1. döntési fázishoz kapcsolódó elemzési folyamat könnyebb megértését segíti a felhasznált alapmodell bemutatása, melynek kialakításakor a hálózati folyam problémakör módszertanát, azon belül is a dinamikus sorozatnagyság (dynamic lot-sizing) modellt használtam fel (6.2 ábra) (Drexel és Kimms 1997).



6.2 ábra A dinamikus sorozatnagyság modell átrakó állomás esetén

Az ábrán látható gráf csomópontjai a következő jelentéssel bírnak: a forrás csomópont (N^s) a tervezési időszak teljes alapanyag-kínálatát reprezentálja, míg a vízszintes sorban elhelyezkedők a tervezési időszak tüzelési napjait az üzemi (N_1) és a külső raktár (N_2) esetén. A csomópontok mellett található számok a nettó tüzelőanyag keresletet (negatív szám) vagy kínálatot (pozitív szám) jelölik fuvarszámban kifejezve: az N_1 csomópontjaihoz rendelt (-48)-as érték a kazán szokásos napi keresletét mutatja, míg a külső raktárban csak átrakódás történik. Az N_1 és N_2 réteg első és utolsó csomópontjaihoz tartozó értékek a nyitó és elvárt zárókészlet nagyságával ($i'_s = i'_e = i''_s = i''_e = 100$) módosulnak. Természetesen a nettó keresletek összege megegyezik a nettó kínálatok összegével.

Anyagmozgatás (vagy tárolás) a gráf irányított élei mentén történik. Minden egyes csomópont esetén teljesülnie kell, hogy a kimenő éleken szállított mennyiségek és a bejövő éleken szállított mennyiségek különbsége egyenlő a csomópont nettó kínálati vagy keresleti értékével (mérlegegyenletek). Az N^s csomópontból induló élek a beszállítási napokat és a szállítási tevékenységet, míg az egyes raktárak csomópontjait összekötő (vízszintes) élek a napvégi készlet szintet reprezentálják. A raktárakat összekötő éleken raktárközi anyagmozgatás végezhető. A modell döntési változóihoz – az éleken áramló termékmennyiségekhez – alsó és felső korlátokat rendelünk (ld. zárójelben): a raktárak biztonsági készlet szintje és a külső raktár kapacitása a döntési folyamat során kerül meghatározásra, a többi korlát értéke adott.

A kiegészítő feltételek és a három célfüggvény modellbe építését, az 1. döntési fázis elemzését az alábbi folyamat szerint hajtom végre (6.3 ábra):



6.3 ábra Az 1. döntési fázis elemzési folyamata

Az egyes lépések végrehajtásához vegyes egészértékű programozási modelleket (MIP) írok fel a fenti hálózati folyamat alapmodell (6.2 ábra) alapján, a szokásos transzformációs szabályokat alkalmazva (Ahuja és mtsai 1993).

Az 1. döntési fázis vegyes egészértékű programozási modelljeiben (MIP) használt jelölések

Az alábbi jelölések csak jelen fejezetben érvényesek.

Indexek

- t tüzelési napok indexe, $t = 1, \dots, T$
 s, z beszállítási napok indexe, $s, z = 1, \dots, S$, ahol $\{1, \dots, S\} \subseteq \{1, \dots, T\}$
 ABF aggregált bizonytalansági forgatókönyvek indexe, $ABF \in \{\text{NincsKieses}, \text{EgyKiesoNap}, \text{KetKiesoFelnap}, \text{KetKiesoNapSzunettel}, \text{KetKiesoNap}\}$

Paraméterek

- d^{N^s} az N^s csomópont-hoz tartozó kínálati érték
 d_t' az N_1 csomópont halmaz (üzemi raktár) nettó keresleti/kínálati értékei
 d_t'' az N_2 csomópont halmaz (külső raktár) nettó keresleti/kínálati értékei
 i_s', i_e' üzemi raktár nyitó és elvárt záró készletszintje ($i_s' = i_e' = 100$)
 i_s'', i_e'' külső raktár nyitó és elvárt záró készletszintje ($i_s'' = i_e'' = 100$)
 xl_s', xu_s' s -edik beszállítási napon az üzemi raktárba érkező fuvarok számának alsó és felső korlátja ($xl_s' = 0, xu_s' = 90$)
 xl_s'', xu_s'' s -edik beszállítási napon a külső raktárba érkező fuvarok számának alsó és felső korlátja ($xl_s'' = 0, xu_s'' = 90$)
 \bar{x} átlagos napi fuvarszám ($\bar{x} = d^{N^s}/S$)
 yl_t, yu_t t -edik tüzelési napon a raktárközi anyagmozgatás alsó és felső korlátja ($yl_t = 0, yu_t = 60$)

| | |
|------------------|---|
| il'_t, iu'_t | t -edik tüzelési nap végén (éjfélnél) az üzemi raktár készlet szintjének alsó (biztonsági készlet) és felső korlátja (raktárkapacitás) ($il'_t \geq 12, iu'_t = 100$) |
| il''_t, iu''_t | t -edik tüzelési nap végén (éjfélnél) a külső raktár készlet szintjének alsó és felső korlátja ($il''_t, iu''_t \geq 0$) |
| krk_{ABF} | adott ABF mellett a külső raktár kapacitásának minimálisan szükséges nagysága |
| $bk_{ABF,t}$ | adott ABF mellett a t -edik tüzelési napon az erőmű raktáraiban minimálisan szükséges biztonsági készlet nagysága |
| px_{ABF} | adott ABF mellett a legmagasabb napi fuvarszám minimális értéke |
| sy_{ABF} | adott ABF mellett a teljes raktárközi anyagmozgatás minimális értéke |
| M | elegendően nagy szám |

Változók

| | |
|---------|---|
| X'_s | s -edik beszállítási napon az üzemi raktárba érkező fuvarok száma |
| X''_s | s -edik beszállítási napon a külső raktárba érkező fuvarok száma |
| I'_t | t -edik tüzelési nap végén (éjfélnél) az üzemi raktárban található készlet nagysága |
| I''_t | t -edik tüzelési nap végén (éjfélnél) a külső raktárban található készlet nagysága |
| Y_t | t -edik tüzelési napon a raktárközi anyagmozgatás nagysága |
| PX | maximális napi fuvarszám a teljes tervezési időhorizonton |
| PI'' | csúcskészlet értéke a külső raktárban a teljes tervezési időhorizonton |
| SI | napvégi készletek összege a teljes tervezési időhorizonton ($SI = \sum_{t=1}^T (I'_t + I''_t)$) |
| SY | raktárközi anyagmozgatás összege a teljes tervezési időhorizonton ($SY = \sum_{t=1}^T Y_t$) |
| DX | a napi átlagos fuvarszám és a napi fuvarok eltéréseinek négyzetösszege ($DX = \sum_{s=1}^S (\bar{x} - X'_s - X''_s)^2$) |

A fent bemutatott hálózati folyamat modell feltételrendszerének MIP reprezentációja a következő (F1A feladat):

$$d^{Ns} = \sum_{s=1}^S (X'_s + X''_s) \quad (6.1)$$

$$I'_{t-1} + X'_t + Y_t + d'_t = I'_t \quad \forall t \quad (6.2)$$

$$I''_{t-1} + X''_t + d''_t = Y_t + I''_t \quad \forall t \quad (6.3)$$

$$X'_s \in \{xl'_s, \dots, xu'_s\} \quad \forall s \quad (6.4)$$

$$X''_s \in \{xl''_s, \dots, xu''_s\} \quad \forall s \quad (6.5)$$

$$Y_t \in \{yl_t, \dots, yu_t\} \quad \forall t \quad (6.6)$$

$$I'_t \in [il'_t, \dots, iu'_t] \quad \forall t \quad (6.7)$$

$$I''_t \in [il''_t, \dots, iu''_t] \quad \forall t \quad (6.8)$$

(6.1) feltétel a kínálati, míg (6.2) és (6.3) feltételek rendre az üzemi és a külső raktárra vonatkozó mérlegegyenletek. (6.4)-(6.8) feltételek a változókat definiálják, ahol az anyagmozgatási változók egész értékűek, a készletezési változók pedig folytonosak.

A döntési folyamat során a következő aggregált bizonytalansági forgatókönyveket (ABF) alkalmazom. Az s -edik szállítási nap kapcsán az alábbi események következhetnek be:

- nincs kiesés a beszállításban (determinisztikus eset) (NincsKieses)
- az s -edik nap teljes lerakodási kapacitása kiesik az erőműnél (nem történhet beszállítás) (EgyKiesoNap)
- az s -edik és az $(s + 1)$ -edik szállítási napon a lerakodási kapacitás fele kiesik (KetKiesoFelnap)
- az s -edik és az $(s + 2)$ -edik szállítási napon a teljes lerakodási kapacitás kiesik (KetKiesoNapSzunettel)
- az s -edik és az $(s + 1)$ -edik szállítási napon a teljes lerakodási kapacitás kiesik (KetKiesoNap)

A lerakodási kapacitás csökkenése egyformán érinti az üzemi és külső raktárakat. A fenti nem várt események bekövetkezését szeparáltan szimulálom az egyes beszállítási napok esetén, azaz 231 darab MIP modell futtatása szükséges ABF-enként a probléma optimalizálásához. Ezen eljárás során felteszem, hogy az egyes nem várt események egymástól függetlenül fejtik ki hatásukat, azaz két esemény között „elegedően sok” idő (általában két-négy nap) telik el, hogy a logisztikai rendszer vissza tudjon térni a determinisztikus ütemezés esetén várt működéshez. Ha ennél gyakoribb a nem várt események bekövetkezése, akkor magasabb bizonytalansági szintet reprezentáló ABF-et kell választani, definiálni a modellezéshez.

6.1 Külsőraktár-kapacitás és Biztonsági készlet szint meghatározása

A hálózati folyam modell éleihez (változóikhoz) kapcsolódó korlátok közül a két raktár napvégi készlet szintjére vonatkozó alsó korlátok (il'_t és il''_t), valamint a külső raktár napvégi készlet szintjére vonatkozó felső korlát (iu''_t) nem ismertek előre. Az előbbi paraméterek a biztonsági készletek nagyságát, míg az utóbbi a raktárkapacitás értékét jelentik a gyakorlatban. A döntési folyamat első lépéseként ezen paraméterek minimálisan szükséges értékét határozom meg az ABF-ek bekövetkezése mellett. A külső raktár kapacitása konstans, míg a biztonsági készlet elvárt értéke napról-napra változhat.

Az egyes ABF-ek melletti külsőraktár-kapacitás és biztonsági készlet szint meghatározásának algoritmus a következő fő lépésekből áll:

Minden egyes ABF-re tedd a következőket!

Minden egyes s -re tedd a következőket!

Csökkentsd xu' és xu'' vektorok értékeit az aktuális ABF-nek megfelelően!

Oldd meg a külsőraktár-kapacitás (PI'') feladatot: $\min PI''$!

Aktualizáld a külsőraktár-kapacitás értékét: ha $\min PI'' > krk_{ABF}$, akkor

$$krk_{ABF} := \min PI''$$

Rögzítsd a külső raktár kapacitásának értékét: $iu''_t := \min PI''$

Oldd meg a biztonsági készlet szint (SI) feladatot: $\min SI$!

Aktualizáld a biztonsági készlet szint értékét, azaz

Minden egyes t -re tedd a következőt!

$$\text{ha } I'_t + I''_t > bk_{ABF,t}, \text{ akkor } bk_{ABF,t} := I'_t + I''_t$$

Ciklus vége (t)

Állítsd vissza xu' és xu'' vektorok eredeti értékeit!

Ciklus vége (s)

Ciklus vége (ABF)

A PI'' feladatot az F1A alapmodellből ((6.1)-(6.8) feltételek) származtatom. Egyrészt a változókra vonatkozó korlátok közül értéket kap il'_t, il''_t, iu''_t : $il'_t = 12, il''_t = 0, iu''_t = M$, ahol például $M = d^{N^s}$ (az üzemi raktár napvégi (éjféli) készletszintje legalább 12 fuvarnyi kell, hogy legyen, ugyanis ezzel biztosítható a kazán tüzelőanyag-ellátása a következő nap első fuvarjának beérkezéséig). Másrészt a következő célfüggvénnyel és feltétellel bővül a modell:

$$\min PI'' \quad (6.9)$$

$$I''_t \leq PI'' \quad \forall t \quad (6.10)$$

(6.9) célfüggvénnyel a külső raktár kapacitását minimalizálom. (6.10) feltételek garantálják, hogy a külsőraktár-kapacitás nem kisebb, mint a külső raktár napvégi készletszintjei.

Az SI feladat megoldása előtt a külső raktár napvégi készletszintjének felső korlátja felveszi a minimálisan szükséges raktárkapacitás értéket ($iu''_t = \min PI''$), az F1A alapmodellt pedig a következő elemekkel egészítem ki.

$$\min SI \quad (6.11)$$

$$SI = \sum_{t=1}^T (I'_t + I''_t) \quad (6.12)$$

(6.11) célfüggvény az összegzett napvégi készletek értékét minimalizálja. (6.12) feltétellel kalkulálom SI változó értékét. Az így nyert napvégi készletértékek mindenképpen szükségesek a zavartalan tüzelőanyag-ellátás biztosításához a nem várt események bekövetkezése esetén. Mivel a biztonsági készlet raktárak közötti allokációja indifferens a biztonságos működés szempontjából, ezért annak érdekében, hogy a további lépések mozgásterét ne szűkítsem feleslegesen, csak il'_t és il''_t összegére (azaz nem szeparáltan) fogalmazok meg korlátozó feltételeket. Megjegyzem, hogy az SI feladat egy olyan minimális költségű hálózati folyam probléma, ahol a napvégi készletszinteket reprezentáló élekhez rendelünk egységnyi költségértékeket.

A 6.2 és 6.3 táblázatokban illusztrálom a fenti algoritmus futtatása során nyert eredményeket: egyrészt a különböző ABF-ek mellett minimálisan szükséges külsőraktár-kapacitás értékeket (krk_{ABF}), másrészt az EgyKiesoNap ABF esetén egy kritikus időszak biztonsági készlet nagyságait ($bk_{ABF,t}$). A megoldó szoftverre és a futási időkre vonatkozó információkat a fejezet végén foglalom össze.

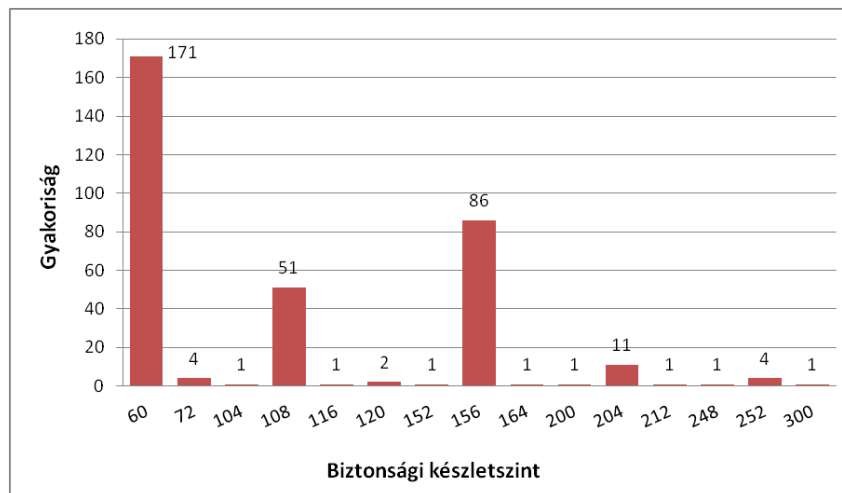
| Aggregált bizonytalansági forgatókönyvek | Külső raktár kapacitása (krk_{ABF}) |
|--|---|
| NincsKieses | 104 |
| EgyKiesoNap | 200 |
| KetKiesoFelnap | 124 |
| KetKiesoNapSzunettel | 304 |
| KetKiesoNap | 304 |

6.2 táblázat Külső raktár kapacitása különböző ABF-ek mellett

| Tüzelési nap | Biztonsági készletszint ($bk_{EgyKiesoNap,t}$) | Tüzelési nap | Biztonsági készletszint ($bk_{EgyKiesoNap,t}$) |
|---------------------------|--|---------------------------|--|
| 2013. 12. 18. (szerda) | 60 | 2013. 12. 25. (szerda) | 204 |
| 2013. 12. 19. (csütörtök) | 60 | 2013. 12. 26. (csütörtök) | 156 |
| 2013. 12. 20. (péntek) | 120 | 2013. 12. 27. (péntek) | 212 |
| 2013. 12. 21. (szombat) | 252 | 2013. 12. 28. (szombat) | 164 |
| 2013. 12. 22. (vasárnap) | 204 | 2013. 12. 29. (vasárnap) | 116 |
| 2013. 12. 23. (hétfő) | 300 | 2013. 12. 30. (hétfő) | 248 |
| 2013. 12. 24. (kedd) | 252 | 2013. 12. 31. (kedd) | 200 |

6.3 táblázat Biztonsági készlet nagysága EgyKiesoNap ABF mellett egy kritikus időszakban

A napvégi biztonsági készletszintek viszonylag ritkán közelítik meg a két raktár együttes kapacitását. Az 6.4 ábra az EgyKiesoNap ABF esetén mutatja a különböző biztonsági készletszintek előfordulásának gyakoriságát.



6.4 ábra Biztonsági készlet értékek gyakorisága EgyKiesoNap ABF mellett

Az ábrán látható, hogy csak egyetlen alkalommal (december 23-án) van szükség a teljes raktárkapacitás kihasználására, a tüzelési napok közel felében (általában hétfőtől csütörtökig) 60 fuvarnyi biztonsági készlet tartása is elegendő. Természetesen a fenti ábra a minimálisan szükséges készletszint nagyságokat mutatja, a végső ütemezés eredményeként ennél magasabb értékeket is nyerhetünk.

6.2 Maximális napi fuvarszám minimalizálása

A napi fuvarszámok egyenletességének mérésére különböző mutatószámokat alkalmazhatunk. A raktárkapacitás–fuvarszám egyenletesség trade-off plasztikus vizsgálatához a maximális napi fuvarszám (csúcscsállítás) értékét használom. Általánosságban igaz, hogy ezen mérőszám minimalizálása (napi fuvarszámok terjedelmének minimalizálása) más, komplexebb szóródás mutatók (például szórás) értékét is az elvárt irányba tolja. Emellett a csúcscsállítás nagysága információt szolgáltat az erőmű lerakodó kapacitásának megfeleléséről is. Először a külső raktár kapacitásra megfogalmazott korlátok nélkül, különböző ABF-ek mellett minimalizálom a csúcscsállítás értékét. Ehhez az alábbi algoritmust alkalmazom:

Minden egyes ABF -re tedd a következőket!

Minden egyes s -re tedd a következőket!

Csökkentsd xu' és xu'' vektorok értékeit az aktuális ABF -nek megfelelően!

Oldd meg a maximális napi fuvarszám (PX) feladatot: $\min PX$!

Aktualizáld a napi csúcscsállítás értékét: ha $\min PX > px_{ABF}$, akkor $px_{ABF} := \min PX$

Állítsd vissza xu' és xu'' vektorok eredeti értékeit!

Ciklus vége (s)

Ciklus vége (ABF)

A PX feladatot az F1A modellből származtatom. Egyrészt a változókra vonatkozó korlátok közül értéket kap il'_t, il''_t, iu'_t : $il'_t = 12, il''_t = 0, iu'_t = M$, ahol például $M = d^{Ns}$. Másrészt a következő célfüggvénnyel és feltételekkel bővül a modell:

$$\min PX \quad (6.13)$$

$$X'_s + X''_s \leq PX \quad \forall s \quad (6.14)$$

(6.13) célfüggvény a csúcscsállítás értékét minimalizálja, míg (6.14) feltételek garantálják, hogy a csúcscsállítás változó értéke nem kisebb a napi fuvarszámoknál.

A futási eredményeket (px_{ABF}) a 6.4 táblázat foglalja össze, ahol már feltüntettem az adott csúcscsállítási érték rögzítése mellett minimálisan szükséges külsőraktár-kapacitás nagyságát is (ez utóbbi értékek meghatározásához az előző alfejezet algoritmusát alkalmaztam).

| Aggregált bizonytalansági forgatókönyvek | Maximális napi fuvarszám minimuma (px_{ABF}) | Minimális külsőraktár-kapacitás |
|--|--|---------------------------------|
| NincsKieses | 71 | 296 |
| EgyKiesoNap | 71 | 367 |
| KetKiesoFelnap | 71 | 296 |
| KetKiesoNapSzunettel | 100 | 384 |
| KetKiesoNap | 100 | 384 |

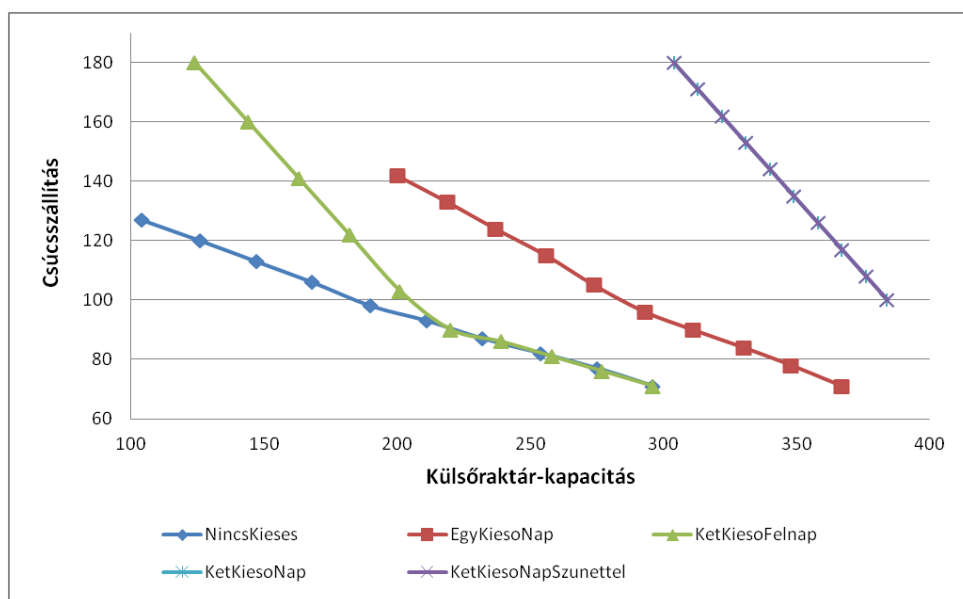
6.4 táblázat Csúcscsállítás értékek különböző ABF-ek mellett

Látható, hogy a csúcscsállítás korlátozása megköveteli a külső raktár kapacitásának jelentős emelését (ld. 6.2 táblázat), főként az első három ABF esetén. Ezen három esetben a csúcscsállítás az elérhető legkisebb értéket veszi fel, hiszen az átlagos fuvarszám $\bar{x} = 70,03$.

6.3 Külsőraktár-kapacitás és csúcsszállítás trade-off

Az előzőekben minden egyes ABF esetén megkaptuk a külsőraktár-kapacitás két olyan értékét, melyek a külsőraktár-kapacitás – csúcsszállítás Pareto-optimális megoldáshalmazon az első dimenzió szélsőértékeit jelentik. Ezen intervallumokat kilenc egyenlő hosszúságú szakaszra osztottam minden ABF esetén, és a külsőraktár-kapacitás osztópontokat rögzítve minimalizáltam a csúcsszállítás értékét a fenti algoritmust alkalmazva (iu_t'' tehát nem M , hanem az aktuális raktárkapacitás értékét vette fel).

A Pareto-optimális megoldások célfüggvényértékeinek becült görbéit jeleníti meg a 6.5 ábra, melyeket az ABF-enként elvégzett tíz futtatás alapján nyertem (a fentiek alapján meghatározott 2+8 osztópontra). A vízszintes tengely a külsőraktár-kapacitás, a függőleges pedig a csúcsszállítás értékét mutatja. (A KetKiesoNap és a KetKiesoNapSzunettel ABF-ek görbéi egybeesnek.)



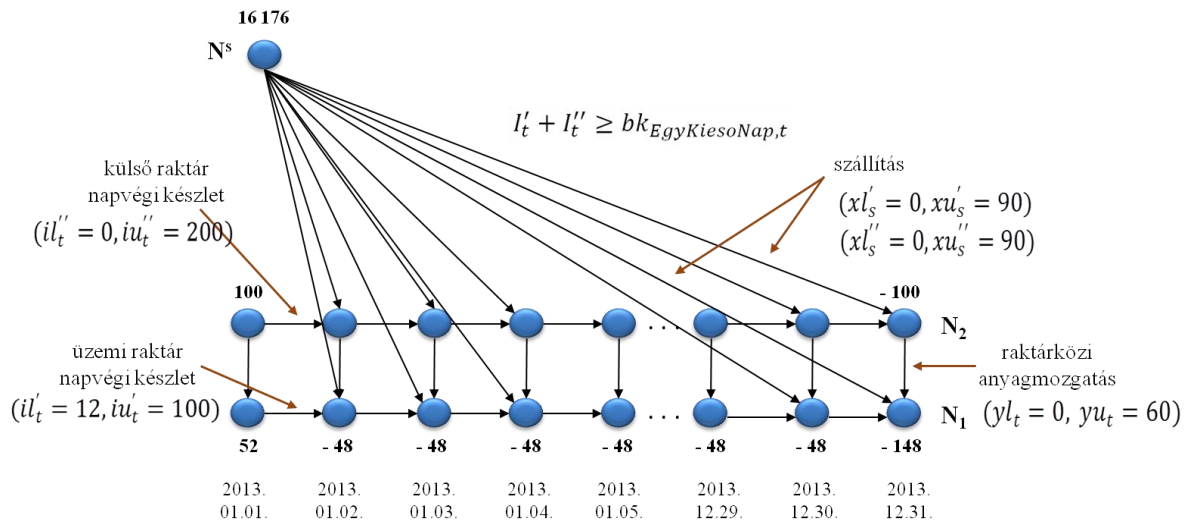
6.5 ábra Külsőraktár-kapacitás és Csúcsszállítás trade-off különböző ABF-ek mellett

Az ábra segítségével a döntéshozók minden külsőraktár-kapacitás mellett megkapják, hogy – adott ABF-et feltételezve – mekkora csúcsszállítás értékkel kell számolniuk. 250 fuvarnyi külsőraktár-kapacitás rögzítése például kb. 80 fuvarnyi csúcsszállítást jelent a NincsKieses és KetKiesoFelnap ABF-ek, és kb. 115 fuvarnyit az EgyKiesoNap ABF esetén. A többi ABF kapcsán ez a raktárkapacitás nem zárja ki az alapanyaghiány bekövetkezését (bár ennek valószínűsége viszonylag alacsonynak tekinthető).

Látható, hogy három ABF esetén a külső raktár kapacitása azért nem csökkenthető a korábban megadott minimális érték alá, mert a maximális napi fuvarszámra vonatkozó 180-as korlát ezt nem teszi lehetővé (a görbék elérik a 180-as csúcsszállítás szintet). Ennek feloldásával (harmadik lerakodó daru alkalmazása) csökkenthető a raktárkapacitás nagysága. A NincsKieses és EgyKiesoNap ABF-ek esetén a lerakodók kapacitása nem befolyásolja az eredményeket.

A további elemzések során felteszem, hogy a beszállítás bizonytalansági szintje az EgyKiesoNap ABF-nek megfelelő, a külső raktár kapacitását 200 fuvarban rögzítem (142 fuvarnyi csúcsszállítás), valamint a napvégi készletek alsó korlátjaként alkalmazom a korábban nyert dinamikus biztonsági

készlet szint értékeit. A további lépések teljesen megegyező módon végezhető el ettől eltérő feltételezések mellett is. A fentiek eredményeként megkaptam a hálózati folyamat modell változóira vonatkozó alsó és felső korlátokat, melyek mellett nem léphet fel alapanyaghiány (6.6 ábra). A következő lépésben – az 1. döntési fázis lezárásaként – induló ütemezést adok a raktárközi anyagmozgatás minimalizálás és a napi fuvarszám simítás célfüggvények szerint.



6.6 ábra F1A feladat hálózati folyamat reprezentációja a változókra megfogalmazott korlátokkal

6.4 Raktárközi anyagmozgatás és napi fuvarszám simítás trade-off

A teljes raktárközi anyagmozgatás nagysága egyszerűen megadható a napi anyagmozgatások összegeként ($SY = \sum_{t=1}^T Y_t$). A szállításimítás során a naponta beszállított mennyiségek referenciaértéktől mért eltérését minimalizálom. A referenciaérték lehet az éves, vagy az adott nap hónapjának, hetének átlagos szállítási mennyisége, célfüggvényként pedig az eltérések egyszerű összegzését vagy négyzetösszegét alkalmazhatjuk. Jelen dolgozatban az éves időtartamra számolt átlagos napi fuvarszámtól való eltérések négyzetösszegét minimalizálom: $DX = \sum_{s=1}^S (\bar{x} - X'_s - X''_s)^2$.

A teljes raktárközi anyagmozgatás értékét minimalizáló MIP modell (SY feladat) a következő, melyet a 6.6 ábrán bemutatott hálózati folyamat reprezentáció alapján írok fel:

$$\min SY \tag{6.15}$$

$$d^{N^s} = \sum_{s=1}^S (X'_s + X''_s) \tag{6.16}$$

$$I'_{t-1} + X'_t + Y_t + d'_t = I'_t \quad \forall t \tag{6.17}$$

$$I''_{t-1} + X''_t + d''_t = Y_t + I''_t \quad \forall t \tag{6.18}$$

$$I'_t + I''_t \geq bk_{ABF,t} \quad \forall t \tag{6.19}$$

$$SY = \sum_{t=1}^T Y_t \tag{6.20}$$

$$X'_s \in \{xl'_s, \dots, xu'_s\} \quad \forall s \tag{6.21}$$

$$X''_s \in \{xl''_s, \dots, xu''_s\} \quad \forall s \tag{6.22}$$

$$Y_t \in \{y_l, \dots, y_u\} \quad \forall t \quad (6.23)$$

$$I_t' \in [il_t', \dots, iu_t'] \quad \forall t \quad (6.24)$$

$$I_t'' \in [il_t'', \dots, iu_t''] \quad \forall t \quad (6.25)$$

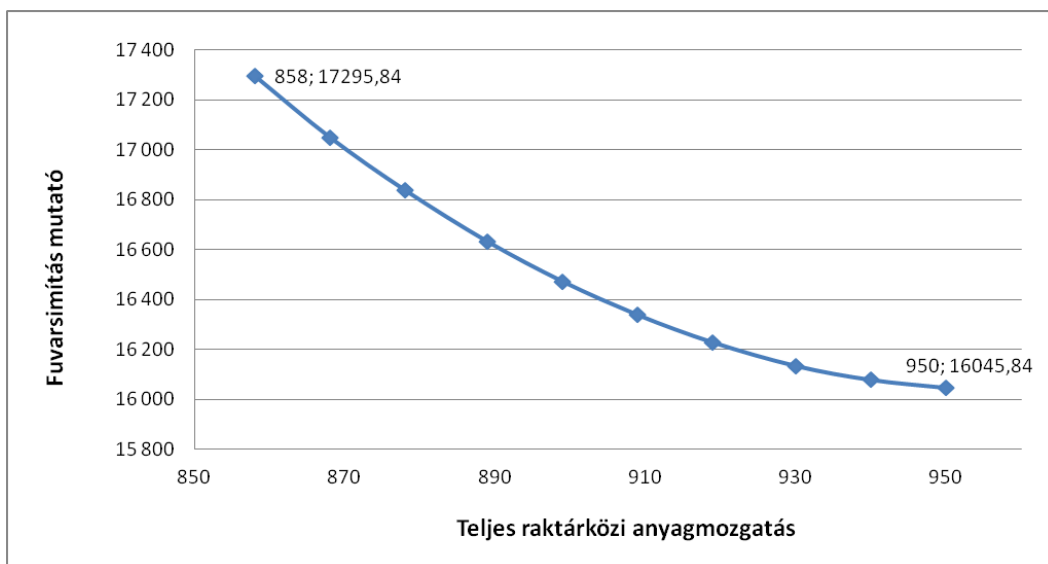
(6.15) célfüggvénnyel a teljes raktárközi anyagmozgatás értékét minimalizálom. (6.16) feltétel a kínálati, míg (6.17) és (6.18) feltételek rendre az üzemi és a külső raktárra vonatkozó mérlegegyenletek. (6.19) feltételek garantálják, hogy a biztonsági készlet szintjének megfelelő tüzelőanyag legyen az erőmű raktáraiban. (6.20) feltétellel határozom meg a teljes raktárközi anyagmozgatás értékét. (6.21)-(6.25) feltételek a változókat definiálják, ahol az anyagmozgatási változók egész értékűek, a készletezési változók pedig folytonosak.

A fuvarsimítás MIP modell (DX feladat) annyiban tér el az előző, SY feladattól, hogy célfüggvényét és (6.20) feltételt az alábbiakra cserélem, ahol $\bar{x} = 70,03$ (a megoldó szolver számára a kvadratikus kifejezést a célfüggvénybe emelve):

$$\min DX \quad (6.26)$$

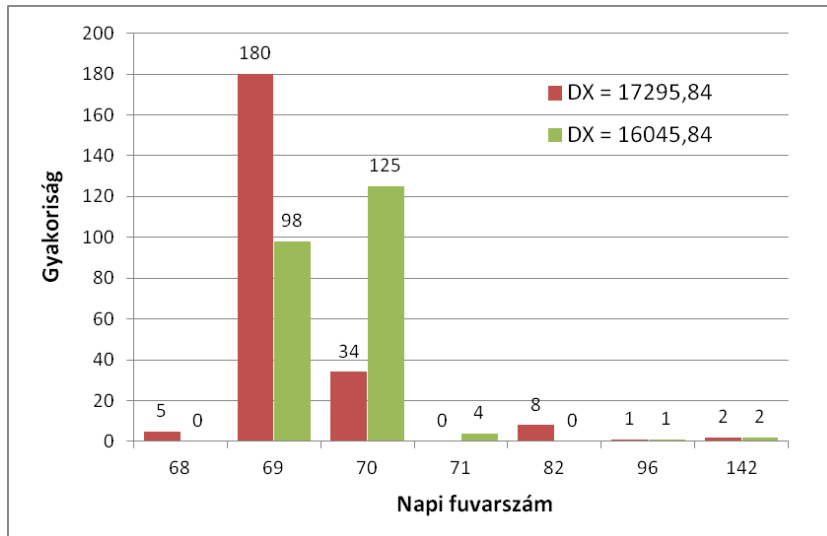
$$DX = \sum_{s=1}^S (\bar{x} - X_s' - X_s'')^2 \quad (6.27)$$

Az esettanulmány adatait használva – a két feladatot egymástól függetlenül megoldva – az alábbi eredményeket nyerjük. A teljes raktárközi anyagmozgatás minimális értéke 858 fuvar (átlagosan heti kb. 18 fuvar), míg a napi fuvarok simítását mérő mutató értéke 16045,84. Mivel a két célfüggvény között trade-off kapcsolat jelentkezik, ezért a már korábban alkalmazott módszerhez hasonlóan elemeztem ennek jellegét. A 6.7 ábra mutatja a Pareto-optimális célfüggvényértékek becsült görbáját.



6.7 ábra Teljes raktárközi anyagmozgatás és fuvarsimítás trade-off EgyKiesoNap ABF mellett

A görbe által reprezentált megoldások gyakorlati szempontból nem térnek el egymástól jelentős mértékben. A teljes raktárközi anyagmozgatás 100 fuvarnyi intervallumon belül mozog, a fuvarsimítás két szélső értékéhez tartozó napi fuvarok megoszlását pedig a 6.8 ábra mutatja be.

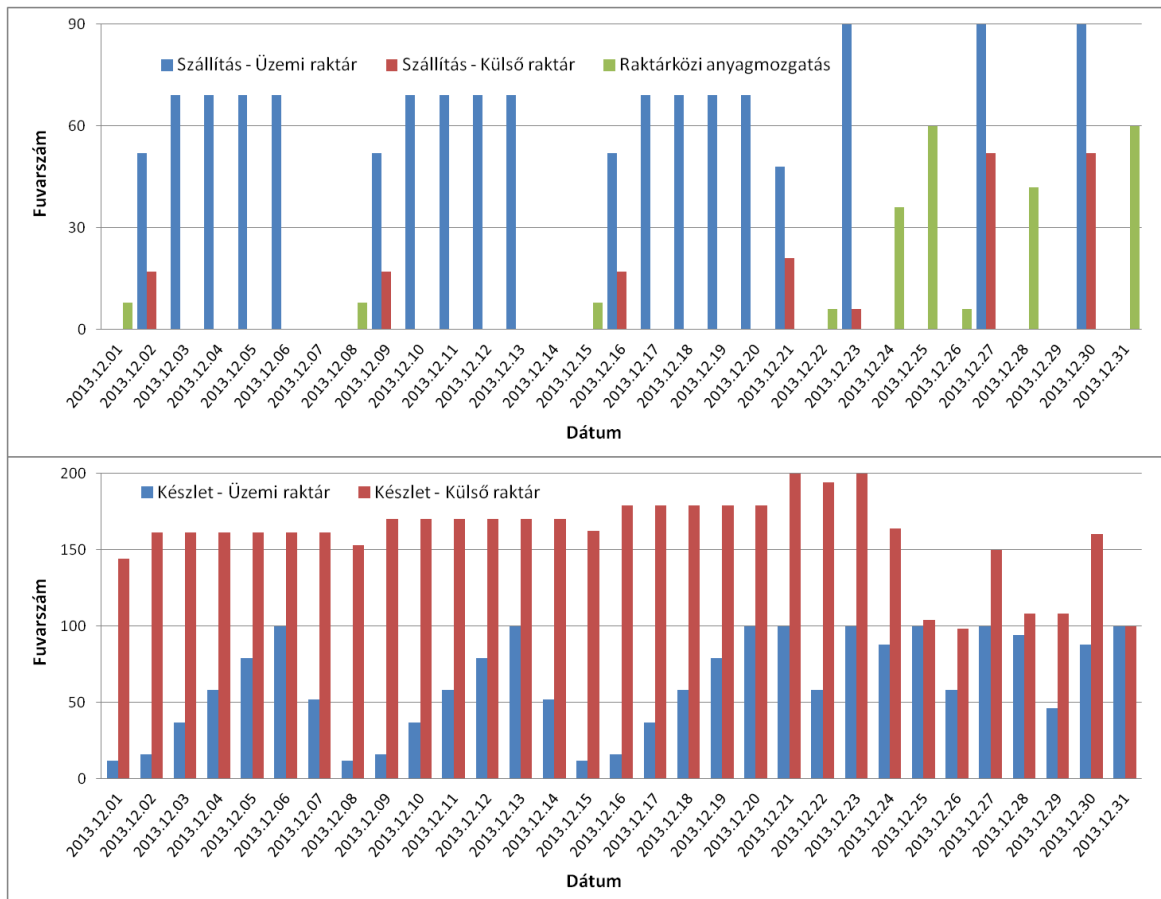


6.8 ábra Napi fuvarszámok hisztogramja két szélsőséges megoldás esetén

Az elemzések azt mutatják, hogy bár létezik trade-off kapcsolat a két cél között, azonban a Pareto-optimális megoldások hasonló szinten elégítik ki a döntéshozói igényeket. A korábbi döntéseknek megfelelően a csúcsszállítás értéke 142 fuvar. Bár a külső raktár kapacitásának (200 fuvar) magasabb szinten történő rögzítésével ez csökkenthető lenne, azonban ez nem eredményezne számottevő javulást a napi fuvarok simítása kapcsán, hiszen azok már most is a 70-es érték körül tömörülnek.

6.5 Az 1. döntési fázis outputja: fuvarok napok közötti ütemezése

Az 1. döntési fázisból egyetlen lépés maradt hátra: rögzíteni kell egy olyan ütemezést, ami inputként szolgál a további döntési fázisok számára. Ehhez a 858 fuvarnyi raktárközi anyagmozgatást eredményező ütemezést használom fel. A 6.9 ábrán a decemberre vonatkozó szállítási és készletezési adatokat mutatom be. A felső diagramon az anyagmozgatási tevékenységek napi volumene látható, míg az alsó a napvégi készletek értékét mutatja a két raktár bontásában.



6.9 ábra Az 1. döntési fázis outputja (2013. december)

A 6.8 és 6.9 ábrák alapján elmondható, hogy két beszállítási nap kivételével (december 23. és 27.) minden kieső napot teljes egészében lehet pótolni a rákövetkező szállítási napon, kihasználva a 180 fuvarnyi lerakodó kapacitást. A december 23-án esedékes 96 fuvar leggyorsabb pótlása csak három napra széthúzva lehetséges, ugyanis 27-én és 30-án csupán 38-38 fuvarnyi szabad lerakodó kapacitás áll rendelkezésre, azaz 20 járműnyi tüzelőanyag érkeztetése december 31-re marad. Ugyanezen okból kifolyólag, ha december 27-én nem lehet beszállítani az erőműbe, akkor a kieső 142 fuvar 30-án és 31-én kell pótolni.

Ahogy azonban a következő döntési fázis elemzése során látni fogjuk, a kieső fuvarok azonnali pótlása általában nem jelent hatékony megoldást, ugyanis a pótló szállítási napon jelentősen megemelkedhet az igényelt járműflotta mérete. A kieső fuvarok pótlásának különböző lehetséges megoldásait (például azok egy, kettő vagy három napra történő szétosztását) a következő fejezetben elemzem. A különböző pótlási módszerek során azonban egy feltételnek mindenképpen teljesülnie kell: a napvégi készlet szinteknek a fuvarok kiesése után is el kell érnie az előírt biztonsági készlet szint értékeit. Mivel az egyes ABF-ek alkalmazása kapcsán feltettem, hogy újabb kiesés nem következik be 2-4 napon belül, ezért elegendő a pótló időszak végére elérni a NincsKiesés ABF biztonsági készlet szint értékeit ($bk_{NincsKiesés,t}$ – determinisztikus eset). A fent bemutatott végső ütemezés kapcsán elmondható, hogy bármely szállítási nap kiesése esetén igaz, hogy a rákövetkező három szállítási nap napvégi készlet szintje a fuvarok pótlása nélkül is meghaladja az elvárt $bk_{NincsKiesés,t}$ biztonsági készlet szintet.

A fenti modelleket az AIMMS 3.13-as verziójában implementáltam, az optimalizáláshoz pedig Gurobi 5.1 szolvert használtam (előzetes tesztek során a legalacsonyabb futási időket szolgáltatva az elérhető MIP szolverek között (Baron 11, Cplex 12.5, Mosek 6.0, XA 15)). A MIP modellek esetén a szolver minden esetben optimális megoldást talált, és a futási idő egyetlen esetben sem haladta meg az egy másodpercet. Ennek megfelelően az egyes ABF-ek kapcsán végrehajtott futtatás-sorozat is tolerálható időtávon belül véget ért. A kvadratikus programozási feladat esetén (DX feladat) meghívott szolver futását 1 perc után megállítottam. Ezen időkorlát mellett talált legjobb megoldások legfeljebb 0,25%-nyira voltak a legjobb alsó korlát értékétől, melyek így gyakorlati szempontból elfogadhatóak.

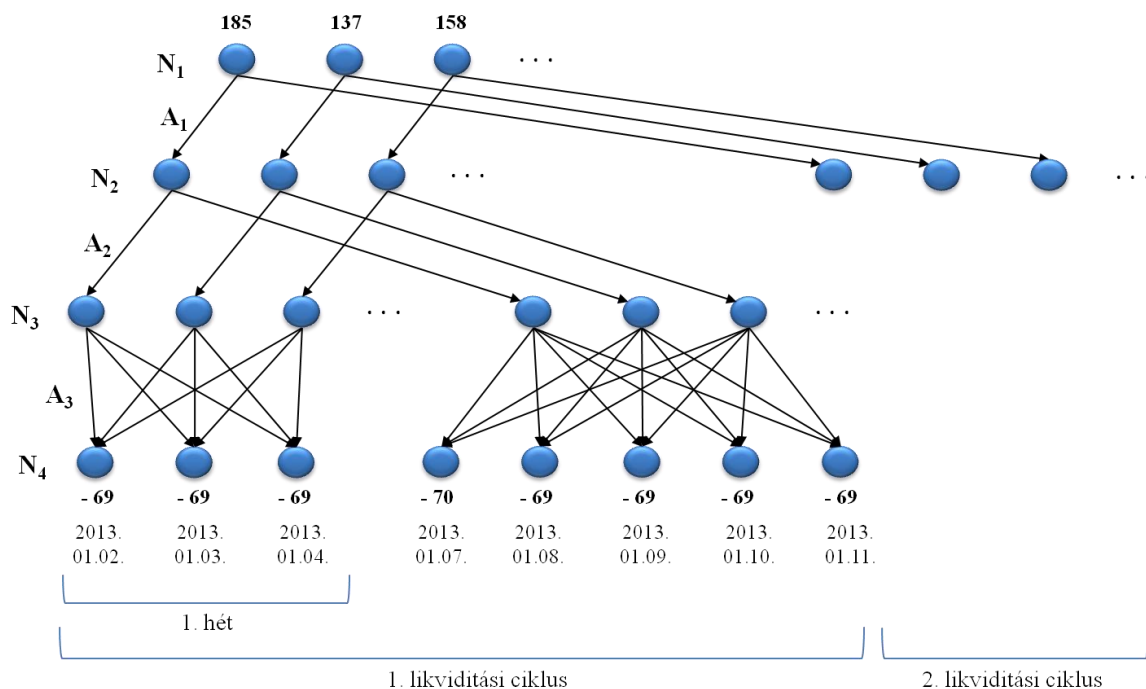
7 A hierarchikus ütemezési folyamat 2. döntési fázisa

Az 1. döntési fázis outputjaként egy olyan szállítási tervet nyertünk, melyben a tervezési időszak minden egyes napjára ismert a beszállítandó fuvarok száma. A 2. döntési fázisban a napi fuvarszámok depók közötti allokációja történik meg. A figyelembe veendő modellelemeket a 7.1 táblázat foglalja össze.

| Döntési fázis | Modellelem | Eszközök |
|----------------------------|---------------|---|
| 2. Depók közötti allokáció | Feltételek | Alapvető technológiai korlátok |
| | | Likviditási ciklus feltétel |
| | | Többforrású beszállítás követelménye |
| | | Járműflotta megemelt kapacitása adott ABF-nek megfelelően (alapanyaghiány-mentes beszállítás) |
| | | Speciális ütemezési szabályok |
| | Célfüggvények | Depónkénti átlagos szállítási hét maximumának minimalizálása |
| | | Felrakodó berendezések számának minimalizálása |
| | | Járműflotta méretének minimalizálása |
| | | Napi szállítójármű-igény simítása |

7.1 táblázat A 2. döntési fázis modellelemei

Ezen döntési fázis során is egy hálózati folyam modellt használunk fel kiindulásként, melyet a 7.1 ábra illusztrál.



7.1 ábra Szállítási feladat átrakodó pontokkal

Az illusztrációs példa csomópontjai négy rétegbe sorolhatók.

1. Az első halmazban (N_1) a depók kínálati pontjai találhatók fuvarszámban megadott kínálati értékekkel.

2. A második csoportot (\mathbf{N}_2) a depó-likviditási ciklus párok alkotják. Ezen csomópontokon átfolyó áramok nagysága megadja, hogy az adott depóból az adott likviditási ciklusban mennyi fuvar kerül beszállításra.
3. A harmadik rétegben (\mathbf{N}_3) a depó-hét párok láthatók. Ezen csomópontokon átfolyó áramok nagysága megadja, hogy az adott depóból az adott héten mennyi fuvar kerül beszállításra.
4. Végül, a negyedik csomópont halmaz (\mathbf{N}_4) elemei a szállítási napok. A feltüntetett keresleti értékek az előző döntési szituáció megoldásából származnak.

Látható, hogy az egyes csomópont rétegek a tervezési időhorizont egyre finomabb beosztását jelentik. A csomópontokat összekötő élek – a kidolgozott MIP modellek változói – a következő halmazokba sorolhatók.

1. Az első csoportba (\mathbf{A}_1) a depókból induló és a depó-likviditási ciklus csomópontokban végződő élek tartoznak. Az élekhez kapcsolódó változók (X_{dl}) megadják a d -edik depóból az l -edik likviditási ciklusban beszállítandó fuvarok számát.
2. Az élek második halmaza (\mathbf{A}_2) az \mathbf{N}_2 és \mathbf{N}_3 csomópontrétegek elemeit kötik össze. Ezen élekhez tartozó változók (Y_{dh}) megadják a d -edik depóból az h -edik héten beszállítandó fuvarok számát.
3. A harmadik halmazba (\mathbf{A}_3) a napi beszállítási mennyiségeket jelentő élek (Z_{ds}) tartoznak minden depó-szállítási nap pár esetére.

A teljes tervezési időhorizont többlépéses felbontásának oka az, hogy ebben a struktúrában egyszerűen adhatók alsó és felső korlátok a különböző rétegeket összekötő élekre, így a likviditási ciklus és a többforrású beszállítás feltételek kifejezésére, másrészt könnyen megfogalmazhatók az alkalmazott célfüggvények is.

Az 2. döntési fázis vegyes egészértékű programozási modelljeiben (MIP) használt jelölések

Az alábbi jelölések csak jelen fejezetben érvényesek.

Indexek

| | |
|---------|--|
| l | likviditási ciklusok indexe, $l = 1, \dots, L$ |
| h | beszállítási hetek indexe, $h = 1, \dots, H$ |
| h_l^f | l -edik likviditási ciklus első hete |
| h_l^e | l -edik likviditási ciklus utolsó hete |
| s, z | beszállítási napok indexe, $s, z = 1, \dots, S$ |
| s_h^f | h -edik hét első szállítási napja |
| s_h^e | h -edik hét utolsó szállítási napja |
| d | depók indexe, $d = 1, \dots, D$ |
| p | felrakodó berendezés-szám esetek indexe, $p = 1, \dots, P$ |
| o | járműflotta-méret esetek indexe, $o = 1, \dots, O$ |

Paraméterek

| | |
|-------|--|
| s_d | d -edik depó biomassa kínálata fuvarszámban kifejezve, \mathbf{N}_1 halmaz elemeihez tartozó értékek |
|-------|--|

| | |
|---------------------|---|
| p_d | d -edik depóból származó fuvar teljes hossza periódusszámban kifejezve (fel- és lerakodás időigényét is beleértve) |
| d_s | s -edik szállítási nap keresleti értéke fuvarszámban kifejezve, \mathbf{N}_4 halmaz elemeihez tartozó értékek |
| \bar{p} | a fuvarok átlagos hossza ($\bar{p} = \frac{\sum_{d=1}^D s_d p_d}{\sum_{d=1}^D s_d}$) |
| lc | likviditási ciklus paraméter, az egyes depókból kínálatuk legalább ekkora hányadát szállítani kell minden likviditási ciklusban |
| ms | többirányú szállítás paraméter, az egyes szállítási napok keresletének legfeljebb ekkora hányadát lehet egy depóból szállítani |
| \hat{n}_s | s -edik szállítási nap kiesése esetén a kieső fuvarokat pótló napok száma |
| M_{dh} | elegendően nagy szám |
| pu_p | felrakodó berendezés-szám esetek |
| pj_{po} | járműflotta-méret esetek |
| \hat{u}_{dh} | ha 0, akkor a d -edik depóból nem történhet beszállítás a h -edik héten és a h -edik hetet megelőző két szállítási napon |
| $\alpha_{P\bar{H}}$ | a depónkénti átlagos szállítási hét maximuma ($P\bar{H}$) kritérium súlya a Pareto-optimális megoldásokat kereső modell célfüggvényében |
| α_{DJ} | a napi szállítójármű-igény simítás (DJ) kritérium súlya a Pareto-optimális megoldásokat kereső modell célfüggvényében |

Változók

| | |
|----------------|---|
| DJ | napi szállítójármű-igény simaság mértéke, az átlagos fuvarhossz (\bar{p}) és a napi becsült járműflotta méretek (napi átlagos fuvarhosszok) eltéréseinek négyzetösszege |
| J_s | s -edik napon a járműigény becsült nagysága |
| \hat{J}_s | s -edik nap kieső fuvarjait pótló napok járműigényének becsült nagysága |
| $P\bar{H}$ | depónkénti átlagos szállítási hét maximuma |
| PJ | járműflotta mérete |
| PU | felrakodó berendezések száma |
| U_{dh} | 1, ha d -edik depóból történik beszállítás a h -edik héten |
| \hat{U}_{dh} | 1, ha d -edik depóból történik beszállítás a h -edik héten vagy a h -edik hetet megelőző két szállítási nap valamelyikén |
| X_{dl} | d -edik depóból az l -edik likviditási ciklusban szállítandó fuvarok száma |
| Y_{dh} | d -edik depóból a h -edik héten szállítandó fuvarok száma |
| Z_{ds} | d -edik depóból az s -edik napon szállítandó fuvarok száma |

A fent bemutatott hálózati folyam modell feltételrendszerének MIP reprezentációja a következő (F2A feladat):

$$s_d = \sum_{l=1}^L X_{dl} \quad \forall d \quad (7.1)$$

$$X_{dl} = \sum_{h=h_f^l}^{h_e^l} Y_{dh} \quad \forall d, l \quad (7.2)$$

$$Y_{dh} = \sum_{s=s_f^h}^{s_e^h} Z_{ds} \quad \forall d, h \quad (7.3)$$

$$\sum_{d=1}^D Z_{ds} = d_s \quad \forall s \quad (7.4)$$

$$X_{dl} \geq 0 \quad \forall d, l \quad (7.5)$$

$$Y_{dh} \geq 0 \quad \forall d, h \quad (7.6)$$

$$Z_{ds} \in \mathbb{N} \quad \forall d, s \quad (7.7)$$

(7.1) feltételek a kínálat, (7.2) és (7.3) feltételek a közbenső rétegek, míg (7.4) feltételek a kereslet mérlegegyenleteit írják le. (7.5)-(7.7) feltételek a változókat definiálják.

A MIP modellek gyorsabb megoldása érdekében általában két lépésben futtatom azokat. Az első lépésben a Z_{ds} változók esetén feloldom az egészértékű feltevést, csupán a nem-negativitási kikötést tartom meg. A második lépésben ezen lazított eredményeket felhasználva adok egészértékű megoldást. Az eljárás pontos leírása és célfüggvényértékekre gyakorolt hatása az egyes modellelemek bemutatása után olvasható.

7.1 A modellelemek leírása determinisztikus esetben

Az alábbiakban kifejtem, hogy a fejezet elején bemutatott modellelemek miként építhetők be az F2A feladatba (az alapvető technológiai korlátok az anyagáramlás mérlegegyenleteit jelentik). Az egyszerűség kedvéért most még felteszem, hogy nem következnek be nem várt események, azaz az alábbiak a NincsKieses ABF mellett érvényesek. Ezt a korlátozást a következő alfejezetben oldom majd fel.

7.1.1 Likviditási ciklus feltétel

A likviditási ciklus feltétel alkalmazásával arra törekszem, hogy a tervezési időhorizonton belül minél egyenletesebben induljon beszállítás az egyes depókból, ami a kifizetések egyenletességét is biztosítja. Az esettanulmányban három likviditási ciklust jelöltem ki: 1-16. hét, 17-36. hét (27-30 hetek során történik a kazán tervezett karbantartása), 37-53. hét ($L = 3$). Az egyes depók éves kínálatának legalább 20%-át be kell szállítani mindegyik likviditási ciklusban ($lc = 0,2$). A likviditási ciklus feltétel a következő alakot ölti:

$$x_{dl} \geq \text{ceil}(lc \cdot s_d) \quad \forall d, l, \quad (7.8)$$

ahol $\text{ceil}()$ függvény egy kifejezés felső egészrészét adja vissza.

7.1.2 Többforrású beszállítás követelménye

A többforrású beszállítás feltétellel azt biztosítom minden egyes szállítási nap esetén, hogy egy depóból legfeljebb a tüzelőanyag-kereslet 50%-át (+0,5 fuvart) lehessen érkeztetni ($ms = 0,5$). A többforrású beszállítás korlát a következőképpen írható fel:

$$z_{ds} \leq \text{ceil}(ms \cdot d_s) \quad \forall d, s, \quad (7.9)$$

ahol a felső egészrész függvény alkalmazásával elkerülöm, hogy páratlan fuvarkereslet esetén mindenképpen három depóból kelljen beszállítást indítani.

7.1.3 Járműflotta megemelt kapacitása és Speciális ütemezési szabályok

A maradék kettő feltétel közül a járműflotta megemelt kapacitása nem jelenik meg explicit módon a modellekben: a vizsgált ABF-ek mellett minden beszállítási nap kapcsán becslést adok a szükséges kamion-flotta méretére. Az alapanyaghiány-mentes beszállításhoz biztosítani kell ezt a

járműszámot. A speciális ütemezési szabályok a napon belüli lerakódás ütemezésére vonatkoznak, és jelen döntési fázisban csak a járműigény becslésében játszanak szerepet. Két ütemezési szabályt vizsgálók: az első szerint a napi keresletet (d_s számú fuvar) az első d_s lerakódási periódusban kell érkeztetni az erőműnél, periódusonként pontosan egyet, míg a második szabály esetén a fuvarok lerakódása széthúzható a 90 periódus hosszú lerakódási intervallumon. Az első szabály általában több jármű alkalmazását teszi szükségessé (a járműigény becslésére a kapcsolódó célfüggvény kapcsán térek ki részletesebben), azonban csúszások esetén megkönnyíti annak lehetőségét, hogy még aznap pótolni lehessen a kimaradást.

7.1.4 Depónkénti átlagos szállítási hét maximumának minimalizálása

A célfüggvények közül a depónkénti átlagos szállítási hét maximumának minimalizálása méltányos ütemezés előállítását célozza.

$$\min P\bar{H} \quad (7.10)$$

$$\frac{1}{s_d} \sum_{h=1}^H h \cdot Y_{dh} \leq P\bar{H} \quad \forall d \quad (7.11)$$

(7.10) célfüggvénnyel minimalizálom a depónkénti átlagos szállítási hét maximális értékét. (7.11) feltételek bal oldala minden depó esetén megadja annak átlagos szállítási hetét a szállított mennyiséggel súlyozva.

7.1.5 Felrakodó berendezések számának minimalizálása

A felrakodó berendezések számának minimalizálása ekvivalens az egy héten meglátogatott depók maximális értékének minimalizálásával (a felrakodó berendezések csak hétvégén mozgathatók a depók között). Ennek meghatározásához bevezetem U_{dh} bináris változókat, melyek értéke 1, ha a d -edik depóból történik beszállítás a h -edik héten.

$$\min PU \quad (7.12)$$

$$M_{dh} U_{dh} \geq Y_{dh} \quad \forall d, h \quad (7.13)$$

$$\sum_{d=1}^D U_{dh} \leq PU \quad \forall h \quad (7.14)$$

$$U_{dh} \in \{0,1\} \quad \forall d, h \quad (7.15)$$

(7.12) célfüggvénnyel minimalizálom a felrakodó berendezések számát. (7.13) feltételek garantálják, hogy U_{dh} bináris változó értéke 1, ha a d -edik depóból történik beszállítás a h -edik héten. M_{dh} vegye fel Y_{dh} lehetséges maximumát, azaz a d -edik depó kínálatának adott héten maximálisan szállítható része ($s_d - 2 \cdot \text{ceil}(lc \cdot s_d)$) és a h -edik hét keresletének egy depóból kielégíthető része ($\sum_{s=s_h}^{s_h^e} \text{ceil}(ms \cdot d_s)$) közül a kisebbik értéket. (7.14) feltételek bal oldala hetenként összegzi a meglátogatott depók számát. (7.15) feltételek definiálják a bináris változókat.

Érdemes megjegyezni, hogy ebben a feladatban valójában megengedett megoldásokat keresek az eredeti hálózat szűkített változatain, ahol a szűkítés élek kizárását jelenti ($U_{dh} = 0$). Mivel a hálózati folyam modell összes paramétere egész (keresleti és kínálati értékek, élekre megfogalmazott felső korlátok), ezért Z_{ds} változók lazítása ellenére is egészértékű optimális megoldást nyerünk.

7.1.6 Járőrflotta méretének minimalizálása

A kamionok számának, azaz a járőrflotta méretének minimalizálásához először meg kell becsülni a naponta használt járőrvek számát. Ennek pontos értéke csak a 3. döntési fázisban, a napon belüli ütemezés során adható meg. Ahogy korábban említettem, az erőrű raktáraiban alkalmazott lerakodási ütemezési szabály számottevő módon befolyásolja a napi járőrígyényt.

Általában felteszem (a 3. döntési fázis során is), hogy ha d_s számú fuvar kell beszállítani egy nap, akkor azt az első d_s lerakodási periódusban kell beérkeztetni, periódusonként pontosan egyet (függetlenül attól, hogy az üzemi vagy a külső raktárba történik-e a beszállítás). Ennek egyik előnye, hogy kisebb mértékű csúszások mellett lehetőséget ad arra, hogy még aznap megtörténjen az elmaradás pótlása, másrészt a lerakodás sűrítésének (periódusonként 2 lerakodás) elkerülésével a járőrígyény nagysága sem növekszik túlságosan. Ezen szabály alól két esetben tesztek kivételt. Egyrészt, ha a beszállítandó fuvarok száma meghaladja a 90-et, másrészt, ha fuvar kiesést kell pótolni (ami általában azt is jelenti, hogy a beszállítandó fuvarok száma átlépi a 90-et). Mindkét esetben magas fuvarszámmal kalkulálhatunk, ami az első ütemezési szabályt alkalmazva számottevő flottaméret növekedést eredményezhet. Ezen esetekben megengedem, hogy a fuvarok beérkeztetése a lerakodási intervallumon széthúzva történjen meg.

Az első lerakodási szabály esetén a járőrígyény nagyságát a napi átlagos fuvarhossz értékével becslem:

$$J'_s = \frac{1}{\max(1, d_s)} \sum_{d=1}^D p_d Z_{ds}, \quad (7.16)$$

ahol p_d a d -edik depóból származó fuvarok hossza periódusszámban kifejezve (a nevező jelen felírásának célja a nullával való osztás elkerülése). A 3. döntési fázis elemzése során látni fogjuk, hogy az átlagos fuvarszám rendkívül jó becslést szolgáltat a járőrígyény nagyságára.

A második lerakodási szabály kapcsán a napi járőrígyény az alábbi módon becsülhető:

$$J''_s = \frac{1}{90} \sum_{d=1}^D p_d Z_{ds}. \quad (7.17)$$

Tekintsünk példaként két olyan beszállítási napot, ahol rendre 70 és 142 fuvar kell beérkeztetni. A fuvarok depók közötti megoszlása, valamint a becsült járőrígyény a 7.2 táblázatban látható.

| Fuvarhossz | Darabszám | Fuvarhossz | Darabszám |
|----------------------------|---------------|----------------------------|-----------------|
| 7 | 25 | 6 | 46 |
| 9 | 25 | 9 | 59 |
| 11 | 20 | 10 | 37 |
| Összesen | 70 | Összesen | 142 |
| Becsült járőrígyény | | Becsült járőrígyény | |
| 1. ütemezési szabály | 620/70 = 8,86 | 2. ütemezési szabály | 1177/90 = 13,08 |

7.2 táblázat Példák a napi járőrígyény becslésére

A flottaméret minimalizálásához tehát az alábbi modellelemeket használom:

$$\min P_j \quad (7.18)$$

$$J_s = \frac{1}{\min(90, \max(1, d_s))} \sum_{d=1}^D p_d Z_{ds} \quad \forall s \quad (7.19)$$

$$J_s \leq PJ \quad \forall s \quad (7.20)$$

(7.18) célfüggvény a járműflotta méretét minimalizálja. (7.19) feltételek a napi járműigény nagyságát becslik, (7.20) feltételek pedig biztosítják, hogy a flottaméret nem kisebb a napi járműigényeknél.

7.1.7 Napi szállítójármű-igény simítása

Végül, utolsó célkitűzésként a napi járműigény simítását fogalmaztam meg. Az előző döntési fázishoz hasonlóan itt is kvadratikus célfüggvényt alkalmazok. A napi járműigények átlagos fuvarhossztól való eltéréseinek négyzetösszegét minimalizálom:

$$\min DJ \quad (7.21)$$

$$J_s = \frac{1}{\min(90, \max(1, d_s))} \sum_{d=1}^D p_d Z_{ds} \quad \forall s \quad (7.22)$$

$$DJ = \sum_{s=1}^S (\bar{p} - J_s)^2 \quad (7.23)$$

(7.21) célfüggvény a napi járműigények szóródását minimalizálja. (7.22) feltételekkel a napi járműigényeket becslem. (7.23) feltétel a napi járműigények szóródását adja meg, ahol $\bar{p} = \frac{\sum_{d=1}^D s_d p_d}{\sum_{d=1}^D s_d}$ az átlagos fuvarhossz (az esettanulmány adatai alapján $\bar{p} = 13,44$).

7.1.8 A 2. döntési fázis megoldása determinisztikus esetben

A determinisztikus eset vizsgálatának célja, hogy az egyes célfüggvényekre szeparáltan nyert eredményeket referenciaértékként használhassam a bizonytalanságot is figyelembe vevő modellekben. Az optimalizálandó feladat megoldása az alábbi két fő lépésen keresztül valósul meg:

1. Az F2A feladatot kiegészítem (7.8) és (7.9) feltételekkel (F2B feladat), feloldom a Z_{ds} változók egészértékűségére vonatkozó kikötést (relF2B feladat), valamint csatolom a modellhez az aktuális célkitűzéshez kapcsolódó célfüggvényt és kiegészítő feltételeket (relF2BO feladatok). A nyert optimális megoldást jelölje $relZ_{ds}^*$ (ezen változók alapján a többi döntési változó értéke egyértelműen meghatározható).
2. A $relZ_{ds}^*$ optimális megoldásból kiindulva állítok elő egészértékű megoldást. Általánosságban elmondható, hogy érdekes kutatási feladatként jelentkezik egy olyan hatékony kerekítési eljárás kidolgozása, ami gyorsan képes megadni az aktuális egészértékű programozási feladat optimális (vagy legalábbis egy elegendően jó) megoldását $relZ_{ds}^*$ -ből kiindulva. Most két módszert ismertetek, melyek mindegyikében a programozási feladat egy módosított változatát oldom meg újra:
 - a) Az F2B feladatot kiegészítem az aktuális célfüggvényhez kapcsolódó elemekkel (F2BO feladatok), Z_{ds} változókra pedig alsó és felső korlátokat fogalmazok meg: $floor(relZ_{ds}^*) \leq Z_{ds} \leq ceil(relZ_{ds}^*)$. $floor()$ függvény egy kifejezés alsó egészrészét adja vissza.
 - b) A F2B feladatot kiegészítem egy „dummy” célfüggvénnyel (például $\min \sum_{d,l} X_{dl}$), Z_{ds} változók kapcsán pedig egyrészt feloldom az egészértékű kikötést (relF2B feladat), másrészt alkalmazom az előbbi alsó és felső korlátokat: $floor(relZ_{ds}^*) \leq Z_{ds} \leq ceil(relZ_{ds}^*)$.

Az első változatban – az eredeti célfüggvény és az egészértékű kikötések alkalmazása miatt – hosszabb futásidejű, de jobb eredményeket szolgáltató modelleket nyerünk. A második

változatban egy minimális költségű hálózati folyam probléma egy lehetséges megoldását keresem csupán, ahol kihasználom a feladattípus azon előnyös tulajdonságát, miszerint egészértékű paraméterek mellett az optimális megoldás is egészértékű lesz. Ennek megfelelően, egy rendkívül gyorsan megoldható „kerekítő” modellhez jutunk.

Megjegyzem, hogy az első változatban a Z_{ds} változókra megfogalmazott korlátozó intervallum tágabbra vételével javítható a célfüggvény értéke, de nyilvánvalóan a szolver futási ideje is növekedni fog.

A 7.3 táblázat a relF2BO feladatok (egycélú programozási feladatok), valamint a két egészértékű megoldást biztosító kerekítési változat kapcsán nyert célfüggvényértékeket tartalmazza. Mivel december 31-én nem történik beszállítás, ezért a napi szállítójármű-igény simítás célkitűzés kapcsán ez a nap egy konstans ($\bar{p}^2 = 180,74$) értékkel növeli a célfüggvényt. A zárójelben látható eredményeket ezen konstans levonása után nyertem. Látható, hogy az egészértékű megoldások elegendően közel esnek a lazított eredményekhez. Bár a lenti elemzés semmiképpen sem szolgáltat teljes képet a kerekítési változatok jóságáról, de jelen esettanulmány során elfogadhatónak tartom alkalmazásukat. (DJ' cél esetén 60 másodperc után megállítottam a szolver (Gurobi 5.1) futását, a többi feladat során rövidebb idő alatt is optimális megoldást nyertem).

| Célfüggvény | 1. lépés relDABEO | 2. lépés a) változat | 2. lépés b) változat |
|--|---------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Depónkénti átlagos szállítási hét maximumának minimalizálása | $P\bar{H}^* = 26,73$ | $P\bar{H}^i = 26,81$ | $P\bar{H}^{ii} = 26,94$ |
| Felrakodó berendezések számának minimalizálása | $PU^* = 4$ | | |
| Járműflotta méretének minimalizálása | $PJ^* = 13,54$ | $PJ' = 13,62$ | $PJ'' = 13,71$ |
| Napi szállítójármű-igény simítása | $DJ^* = 182,68$ (1,94) | $DJ' = 183,26$ (2,52) | $DJ'' = 192,65$ (11,91) |

7.3 táblázat Az egycélú optimalizálás eredményei determinisztikus esetben

Összefoglalásként áttekintem, hogy a fent kifejtett modellelemeket miként alkalmazom a továbbiakban:

- A likviditási ciklus és a többforrású beszállítás kapcsán megfogalmazott (7.8) és (7.9) feltételeket hozzáfűzöm F2A feladathoz.
- A járműflotta megemelt kapacitása rugalmassági eszköz nem jelenik meg explicit módon a modellekben, a speciális ütemezési szabályok pedig – a leírtaknak megfelelően – a napi járműigény becslésében játszanak szerepet.
- A négy célfüggvény között különböző jellegű trade-off kapcsolat állhat fenn. A következő alfejezetben arra törekszem, hogy Pareto-optimális megoldásokat keressek ezen kritériumok alapján. Mindezt EgyKiesoNap ABF feltételezése mellett teszem.

7.2 A 2. döntési fázis elemzése EgyKiesoNap ABF mellett

Jelen alfejezetben a fent kifejtett négy célfüggvény alapján, valamint EgyKiesoNap ABF-nek megfelelő bizonytalansági szintet feltételezve keresem a fuvarok depók közötti optimális allokációját és az abból származtatott optimális beruházási döntéseket (járműflotta mérete, felrakodó berendezések száma). A lehetséges nem várt események a négy célfüggvény közül a beszállításhoz szükséges felrakodó berendezések és kamionok számát befolyásolhatják számottevő

mértékben, valamint üzleti szempontból is ezen beruházási döntések bírnak nagyobb relevanciával. Ennek megfelelően ezen két kritériumhoz kapcsolódó modellelemeket módosítani szükséges.

A módosítás pontos metódusát a kieső fuvarok pótlásának módszere határozza meg. A pótlás ugyanis végrehajtható egy, kettő vagy akár három nap alatt, de rögzíteni kell azt is, hogy csak a kieső fuvarok újraütemezése történjen meg vagy a pótló napok eredeti fuvarjainak újbóli allokációja is. Jelen dolgozatban felteszem, hogy a kieső nap és a lehetséges pótló napok fuvarportfólióját teljes mértékben újraütemezik. A következőkben bemutatom, hogy ehhez miként kell kibővíteni a fent bemutatott modellelemeket, valamint tesztfuttatások alapján meghatározom a pótló napok számát is.

7.2.1 Járműflotta méretének minimalizálása EgyKiesoNap ABF mellett

A flottaméret bizonytalanság melletti minimalizálásához az alábbi modellelemeket használom:

$$\min PJ \quad (7.24)$$

$$J_s = \frac{1}{\min(90, \max(1, d_s))} \sum_{d=1}^D p_d Z_{ds} \quad \forall s \quad (7.25)$$

$$J_s \leq PJ \quad \forall s \quad (7.26)$$

$$\hat{J}_s = \frac{1}{\hat{n}_s \cdot 90} \sum_{d=1}^D \sum_{z=s}^{s+\hat{n}_s} p_d Z_{dz} \quad \forall s \quad (7.27)$$

$$\hat{J}_s \leq PJ \quad \forall s \quad (7.28)$$

(7.24) célfüggvény a járműflotta méretét minimalizálja. (7.25) feltételek a napi járműigényt becslik a kiesés nélküli esetben (itt csak akkor engedem meg a fuvarok széthúzását a teljes lerakodási intervallumon, ha azok száma meghaladja a 90-et). (7.26) feltételek biztosítják, hogy a flottaméret nem kisebb a napi járműigényeknél. (7.27) feltételekkel becslem a kiesés utáni napok átlagos járműigényét. Itt s a kieső napot jelöli, a pótlásra pedig az $\{s+1, \dots, s+\hat{n}_s\}$ napokon kerül sor. Ahogy látható, az \hat{n}_s számú pótló nap esetén nem határozom meg pontosan a fuvarok napok közötti ütemezését, valamint megengedem azok beérkeztetésének széthúzását a napok teljes lerakodási intervallumán. Az előző fejezet végén leírtakkal összhangban \hat{n}_s minimális értéke december 23-a és 27-e kivételével 1, míg ezen két nap esetén rendre 2 és 3 nap (természetesen a kieső fuvarokat még a tervezési időszakban pótolni szükséges, ezért a következőkben – további hivatkozás nélkül – igaz lesz, hogy \hat{n}_s nem lehet nagyobb a hátralévő szállítási napok számánál). (7.28) feltételek garantálják, hogy a járműflotta mérete nem kisebb a pótló napok átlagos járműigényénél.

A fenti MIP felírás előnye, hogy szimultán módon figyelembe veszi az összes szállítási nap kiesésének lehetőségét. Egy olyan szimulációs eljárás ugyanis, ahol egy determinisztikus induló ütemezést aktualizálnánk a nem várt események bekövetkezése után, a rövidebb fuvarokat allokálná a pótló napokra: ezen napokon alacsonyabb becsült járműigény értékeket nyernénk, azonban a tervezési időszak végére „elfogynának” a rövidebb fuvarok és jelentősen megugrana a szükséges járműflotta-méret.

Három változatban futtattam a fenti célfüggvénnyel és feltételekkel kiegészített relF2BO feladatot, melyek a pótló napok számában (\hat{n}_s) tértek el (a kerekítési lépéstől most eltekintek).

- Az első változatban a kieső fuvarokat a lehető leghamarabb szükséges pótolni, azaz \hat{n}_s értéke december 27-e esetén 3, december 23-a esetén 2, míg a többi szállítási nap esetén 1. PJ^* értéke ebben az esetben 20,87, azaz jelentős járműigény növekedéssel számolhatunk a determinisztikus esethez képest (ld. 7.3 táblázat).
- A második változatban \hat{n}_s értéke december 27-én 3, minden más esetben pedig 2. Itt már tolerálható mértékű PJ^* értékének növekedése: $PJ^* = 15,72$.
- Végül, a harmadik változatban minden szállítási nap esetén 3 pótló nappal számolok. Itt PJ^* értéke 14,01. Ezen változat alkalmazásának hátránya azonban, hogy minden szállítási nap esetén fel kell tételeznem, hogy annak kiesése után három napon belül nem következik be újabb nem várt esemény.

A három pótlási változat előnyeit és hátrányait figyelembe véve a továbbiakban a másodikat alkalmazom. A következő szakaszban a felrakodó berendezésekre vonatkozó beruházási döntést elemzem EgyKiesoNap ABF mellett.

7.2.2 Felrakodó berendezések számának minimalizálása EgyKiesoNap ABF mellett

A felrakodók számának bizonytalanság melletti minimalizálásához az alábbi modellelemeket használom. A korábbiaknak megfelelően a kieső fuvarok pótlása a követő két szállítási napon történik meg. Ez egyben azt is jelenti, hogy egy szállítási héten – az eredetileg tervezett depókon kívül – az azt megelőző két szállítási napon érintett depókból is érkezhets fuvar (azok pótlása során). Az alábbi modellben – főként a könnyebb megoldhatóság érdekében – a legrosszabb esettel kalkulálok, azaz felteszem, hogy a kieső napokra tervezett összes depóból kerül át fuvar a második pótló napra.

$$\min PU \quad (7.29)$$

$$M_{dh} \hat{U}_{dh} \geq Y_{dh} + \sum_{s=s_h^f-2}^{s_h^f-1} Z_{ds} \quad \forall d, h \quad (7.30)$$

$$\sum_{d=1}^D \hat{U}_{dh} \leq PU \quad \forall h \quad (7.31)$$

$$\hat{U}_{dh} \in \{0,1\} \quad \forall d, h \quad (7.32)$$

(7.29) célfüggvénnyel minimalizálok a felrakodó berendezések számát. (7.30) feltételek garantálják, hogy \hat{U}_{dh} bináris változó értéke 1, ha a d -edik depóból történik beszállítás a h -edik héten vagy a h -edik hetet megelőző két szállítási nap valamelyikén. M_{dh} vegye fel $Y_{dh} + \sum_{s=s_h^f-2}^{s_h^f-1} Z_{ds}$ lehetséges maximumát, azaz a d -edik depó kínálatának az adott intervallumban maximálisan szállítható része (a második és a harmadik likviditási ciklus első hetében $s_d - \text{ceil}(lc \cdot s_d)$, míg a többi héten $s_d - 2 \cdot \text{ceil}(lc \cdot s_d)$) és az érintett napok keresletének egy depóból kielégíthető része ($\sum_{s=s_h^f-2}^{s_h^f-1} \text{ceil}(ms \cdot d_s)$) közül a kisebbik értéket. (7.31) feltételek bal oldala összegzi minden hétre a meglátogatott depók számát. (7.32) feltételek definiálják a bináris változókat.

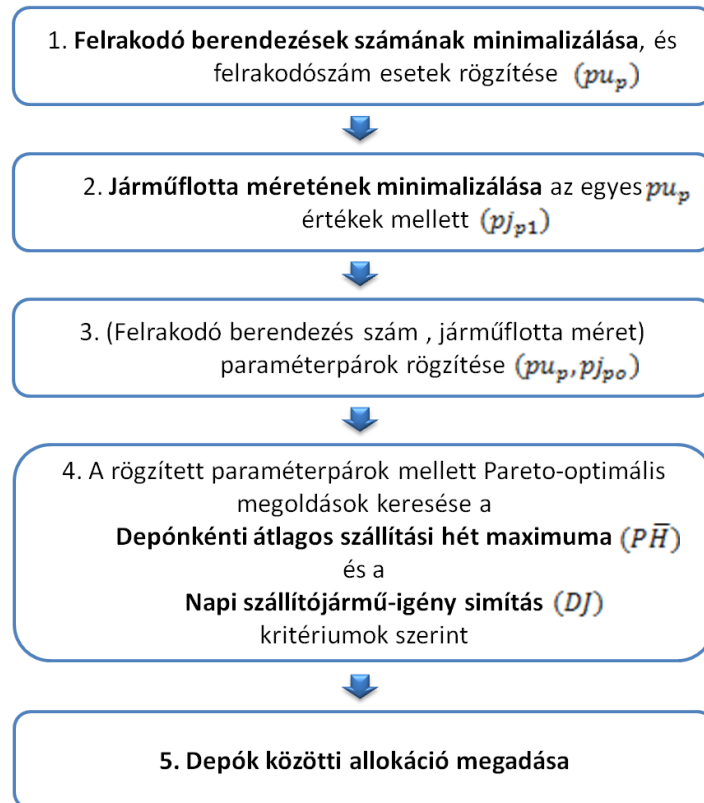
A fenti célfüggvénnyel és feltételekkel bővített feladat nehéznek tekinthető, tolerálható időn belül (72 óra) az alkalmazott solver (Gurobi 5.1) nem talált optimális megoldást. A legjobb egészértékű megoldás célfüggvényértéke 6 ($PU = 6$), azaz EgyKiesoNap ABF feltételezése mellett előfordulhat

olyan hét, ahol a kieső fuvarok pótlása miatt hat depóból szükséges tüzelőanyagot beszállítani (12 felrakodó eszköz szükséges).

Az előző két alfejezetben egyetlen célfüggvény szerint kerestem az aktuális feladat optimális megoldását. Természetesen a fenti kritériumok közötti trade-off kapcsolat miatt nem érhető el feltétlenül az így nyert eredmények. Az egyes célok kölcsönhatását a következő alfejezetben elemzem.

7.2.3 Pareto-optimális megoldások keresése a négy célfüggvény szerint

A négy cél szerinti Pareto-optimális megoldások keresési folyamatát a 7.2 ábra mutatja be:



7.2 ábra A 2. döntési fázis elemzési folyamata

A folyamat első lépéseként az előző alfejezetben bemutatott modellt oldom meg, azaz keresem a felrakodó berendezések számának minimumát EgyKiesoNap ABF mellett. Láttuk, hogy az alkalmazott solver 72 óra alatt olyan egészértékű megoldást talált csak, ahol PU értéke 6. Ezt az eredményt felhasználva három esetet jelölök ki a felrakodó berendezések számára vonatkozóan: $pu_1 = 6$, $pu_2 = 7$, $pu_3 = 8$.

Második lépésben ezen értékek rögzítése mellett minimalizálom a járműflotta méretét. A korábban már bemutatott elemekből építkező teljes MIP modell a következő:

$$\min PJ \tag{7.33}$$

$$s_d = \sum_{l=1}^L X_{dl} \quad \forall d \tag{7.34}$$

$$X_{dl} = \sum_{h=h_f^e}^{h_i^e} Y_{dh} \quad \forall d, l \tag{7.35}$$

$$Y_{dh} = \sum_{s=s_h^e}^{s_h^e} Z_{ds} \quad \forall d, h \quad (7.36)$$

$$\sum_{d=1}^D Z_{ds} = d_s \quad \forall s \quad (7.37)$$

$$x_{dl} \geq \text{ceil}(lc \cdot s_d) \quad \forall d, l, \quad (7.38)$$

$$z_{ds} \leq \text{ceil}(ms \cdot d_s) \quad \forall d, s, \quad (7.39)$$

$$M_{dh} \hat{U}_{dh} \geq Y_{dh} + \sum_{s=s_h^f-2}^{s_h^f-1} Z_{ds} \quad \forall d, h \quad (7.40)$$

$$\sum_{d=1}^D \hat{U}_{dh} \leq pu_p \quad \forall h \quad (7.41)$$

$$J_s = \frac{1}{\min(90, \max(1, d_s))} \sum_{d=1}^D p_d Z_{ds} \quad \forall s \quad (7.42)$$

$$J_s \leq PJ \quad \forall s \quad (7.43)$$

$$\hat{J}_s = \frac{1}{\hat{n}_s \cdot 90} \sum_{d=1}^D \sum_{z=s}^{s+\hat{n}_s} p_d Z_{dz} \quad \forall s \quad (7.44)$$

$$\hat{J}_s \leq PJ \quad \forall s \quad (7.45)$$

$$X_{dl} \geq 0 \quad \forall d, l \quad (7.46)$$

$$Y_{dh} \geq 0 \quad \forall d, h \quad (7.47)$$

$$Z_{ds} \in \mathbb{N} \quad \forall d, s \quad (7.48)$$

$$\hat{U}_{dh} \in \{0,1\} \quad \forall d, h \quad (7.49)$$

(7.33) célfüggvény a járműflotta méretét minimalizálja. (7.34) feltételek a kínálat, (7.35) és (7.36) feltételek a közbelső rétegek, míg (7.37) feltételek a kereslet mérlegegyenleteit írják le a fejezet elején bemutatott hálózati folyam ábrának megfelelően (7.1 ábra). (7.38) feltételek a likviditási ciklus korlátokat, míg (7.39) feltételek a többforrású beszállítás követelményét írják le.

A következő feltételcsoporttal érem el, hogy a nyert megoldásokban a lerakódó berendezések száma ne haladja meg az előre rögzített értéket. (7.40) feltételek garantálják, hogy \hat{U}_{dh} bináris változó értéke 1, ha a d -edik depóból történik beszállítás a h -edik héten vagy a h -edik hetet megelőző két szállítási nap valamelyikén. M_{dh} vegye fel $Y_{dh} + \sum_{s=s_h^f-2}^{s_h^f-1} Z_{ds}$ lehetséges maximumát. (7.41) feltételek bal oldala összegzi minden hétre a meglátogatott depók számát.

A következő feltételhalmaz a napi fuvarszámok becslésében játszik szerepet. (7.42) feltételek a napi járműigényt becslik a fuvarkiesés nélküli esetben. (7.43) feltételek biztosítják, hogy a flottaméret nem kisebb a napi járműigényeknél. (7.44) feltételekkel becslem a kiesés utáni napok átlagos járműigényét. Itt s a kieső napot jelöli, a pótlásra pedig az $\{s+1, \dots, s+\hat{n}_s\}$ napokon kerül sor. A korábban leírtaknak megfelelően \hat{n}_s értéke december 27-e kivételével 2, míg ezen a napon 3. (7.45) feltételek garantálják, hogy a járműflotta mérete nem kisebb a pótló napok átlagos járműigényénél.

(7.46)-(7.49) feltételek a változókat definiálják. A MIP modell gyorsabb megoldása érdekében a Z_{ds} változókra vonatkozó egészértékű feltevést feloldom, csupán a nem-negativitási kikötést tartom meg. Ezen ponton eltekintek a korábban bemutatott kerekítési eljárások alkalmazásától.

Ahogy várni lehetett, ezen feladat esetén is jelentős futási idővel kell számolnunk. Olyannyira igaz ez, hogy a solver csak a $pu_3 = 8$ esetben talált megengedett megoldást 72 órán belül, ahol a legjobb célfüggvényérték 15,72 (ez csak a harmadik tizedes jegy értékében tér el attól a célfüggvényértéktől, amit a járműflotta méret szeparált minimalizálása során nyertem). Ezt az eredményt felhasználva jelölök ki járműflotta-méret eseteket a további elemzésekhez: $pj_{31} = 15,72$, $pj_{32} = 15,73$, $pj_{33} = 15,74$ stb. Fontos megjegyezni, hogy a következő lépésben használt MIP modell futásidejének csökkentése érdekében rögzítem jelen megoldás \hat{U}_{dh} értékeit (\hat{u}_{dh} paraméterek). Természetesen ezen egyszerűsítés hátránya, hogy az eredeti feladatnak csak egy lokális optimumát találhatom meg, de amennyiben az így nyert célfüggvényértékek gyakorlati szempontból kielégítőek, úgy elfogadom az eljárást. A 7.4 táblázat szemlélteti a Pareto-optimális megoldások keresésének terét.

| Felrakodó berendezés-szám esetek | Járműflotta-méret esetek | $(P\bar{H}, DJ)$ súlyozás 1 | $(P\bar{H}, DJ)$ súlyozás 2 | ... |
|----------------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----|
| $pu_3 = 8$ | $pj_{31} = 15,72$ | $P\bar{H}_{311}, DJ_{311}$ | $P\bar{H}_{312}, DJ_{312}$ | ... |
| | $pj_{32} = 15,73$ | $P\bar{H}_{321}, DJ_{321}$ | $P\bar{H}_{322}, DJ_{322}$ | ... |
| | $pj_{33} = 15,74$ | $P\bar{H}_{331}, DJ_{331}$ | $P\bar{H}_{332}, DJ_{332}$ | ... |
| | ... | ... | ... | ... |
| $pu_3 = 7$ | - | - | - | - |

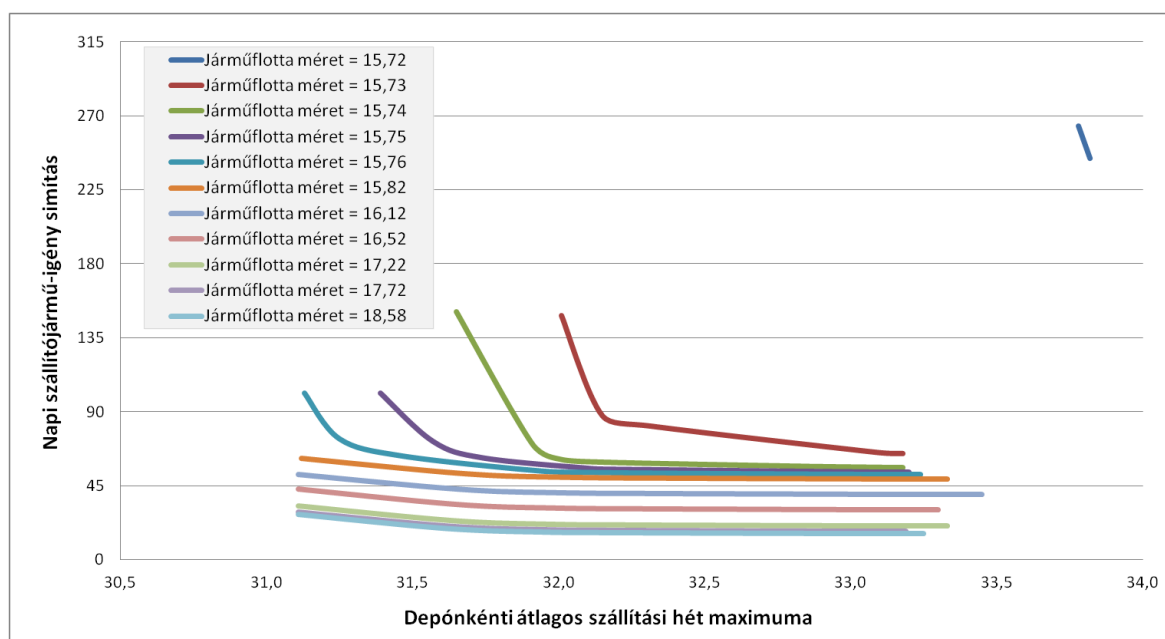
7.4 táblázat Pareto-optimális megoldások keresésének tere

A felrakodó berendezések száma és a járműflotta mérete mentén kijelölt esetekben – ahol a rögzített paraméterekkel PU és PJ változókat helyettesítem – keresem a másik két célfüggvény szerint optimális megoldásokat. A MIP modellben a depónkénti átlagos szállítási hét maximuma ($P\bar{H}$) és a napi szállítójármű-igény simítás (DJ) kritériumok súlyozott összege adja a célfüggvényt ($\min \alpha_{P\bar{H}} \cdot P\bar{H} + \alpha_{DJ} \cdot DJ$), ahol a Pareto-optimális célfüggvényértékek becsült görbét a súlyozás változtatásával rajzolom meg. A modell feltételrendszerét az előző MIP felírásból származtatom:

- \hat{U}_{dh} változókat \hat{u}_{dh} paraméterekkel helyettesítem, azaz rögzítem azon időszakokat, amikor az egyes depók szállíthatnak az erőműbe. Ezzel egyrészt eliminálom a modell egészértékű változóit, másrészt számottevően csökkentem a lehetséges megoldások terét, aminek következtében a feladat tolerálható időn belül megoldható lesz.
- PJ változókat pj_{p_0} paraméterekkel helyettesítem.
- A célfüggvény kalkulálásához szükséges (7.11) és (7.23) korlátokkal bővítem a feltételrendszert (a megoldó solver számára a kvadratikus kifejezést a célfüggvénybe emelve).

A különböző járműflotta méret értékek (pj_{p_0}) mellett nyert eredményeket foglalja össze a 7.3 ábra (a napi szállítójármű-igény simítás kritérium kapcsán már levontam a korábban említett 180,74 értékű konstans). Látható, hogy $pj_{31} = 15,72$ érték mellett a modellnek viszonylag kis mozgástere marad a két aktuális célfüggvény minimalizálására. A járműflotta méret 0,01-dal való növelése azonban lehetővé teszi, hogy a napi szállítójármű-igény simítás kritérium értéke közel felére essen,

valamint a depónkénti átlagos szállítási hét maximuma is számottevően csökken. Az egyre magasabb értékű $p_{j_{p0}}$ paraméterek esetén egyre kisebb arányú javulást tapasztalhatunk, és $p_{j_{p0}} = 18,58$ felett a célfüggvényértékek már nem változnak.



7.3 ábra Hatékonysági határgörbék különböző járműflotta méret és EgyKiesoNap ABF mellett

A döntéshozók kiválaszthatják azon célfüggvényérték kombinációt, ami saját preferenciáik szerint a legnagyobb haszonnal bír.

7.3 Az 2. döntési fázis outputja: fuvarok depók közötti allokációja

Jelen dolgozatban egy olyan allokációt mutatok be, ahol az egy héten meglátogatott depók száma legfeljebb 8 ($p_u = 8$), a járműflotta mérete legfeljebb 16 ($p_j = 16$), és a maradék két kritérium közül a méltányos szállításütemezés ($P\bar{H}$) prioritást élvez a napi járműigény simítással (DJ) szemben. A lazított modell futtatása után a kerekítési lépést is elvégzem az a) változat szerint.

A 2. döntési fázis végső allokációjából mutat részletet a 7.5 táblázat, az 1. és 2. számú depók beszállítási napjainak listájával.

| Szállítási nap | Fuvarszám – Depó 1 | Szállítási nap | Fuvarszám – Depó 2 |
|-----------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|
| 2013. 04. 15 (hétfő) | 13 | 2013. 03. 11 (hétfő) | 9 |
| 2013. 04. 16 (kedd) | 14 | 2013. 03. 12 (kedd) | 9 |
| 2013. 04. 17 (szerda) | 13 | 2013. 03. 13 (szerda) | 19 |
| 2013. 05. 21 (kedd) | 20 | 2013. 03. 14 (csütörtök) | 19 |
| 2013. 05. 22 (szerda) | 19 | 2013. 06. 06 (csütörtök) | 27 |
| 2013. 06. 17 (hétfő) | 8 | 2013. 06. 07 (péntek) | 26 |
| 2013. 06. 18 (kedd) | 9 | 2013. 09. 16 (hétfő) | 9 |
| 2013.06.19 (szerda) | 8 | 2013. 09. 17 (kedd) | 10 |
| 2013.10.21 (hétfő) | 41 | 2013. 09. 18 (szerda) | 9 |
| 2013.10.22 (kedd) | 40 | | |
| Összesen | 185 | Összesen | 137 |

7.5 táblázat A 2. döntési fázis outputja (1. és 2. depó)

A 7.6 táblázatban hasonlítom össze az egyes célkitűzések szerinti szeparált optimalizálás és a kiválasztott Pareto-optimális megoldás eredményeit.

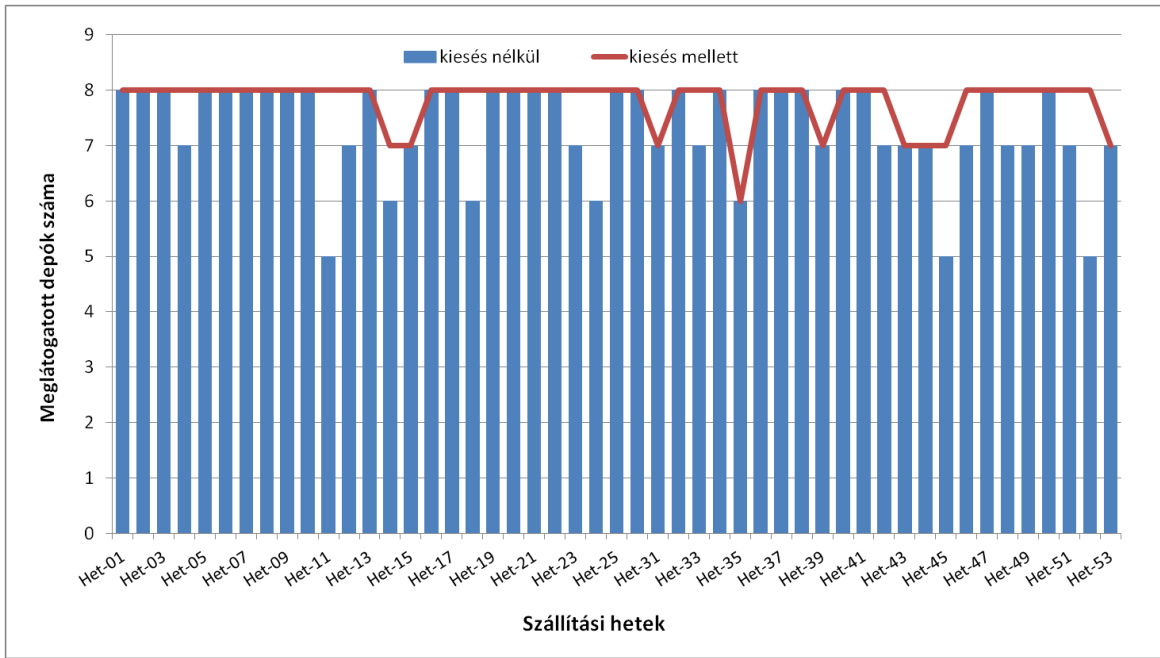
| Célfüggvény | Célkitűzések szeparált kezelése | | Pareto-optimális ütemezés |
|--|---------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| | Determinisztikus eset | EgyKiesoNap ABF mellett | EgyKiesoNap ABF mellett |
| Depónkénti átlagos szállítási hét maximumának minimalizálása | $P\bar{H}^i = 26,81$ | - | $P\bar{H}^i = 31,11$ |
| Felrakódó berendezések számának minimalizálása | $PU^* = 4$ | $PU = 6$ | $PU = 8$ |
| Járműflotta méretének minimalizálása | $PJ^i = 13,62$ | $PJ^i = 15,75$ | $PJ^i = 16$ |
| Napi szállítójármű-igény simítása | $DJ^i = 183,26$ (2,52) | - | $DJ^i = 236,74$ (56) |

7.6 táblázat Célfüggvények értékei egy- és többcélú optimalizálás esetén

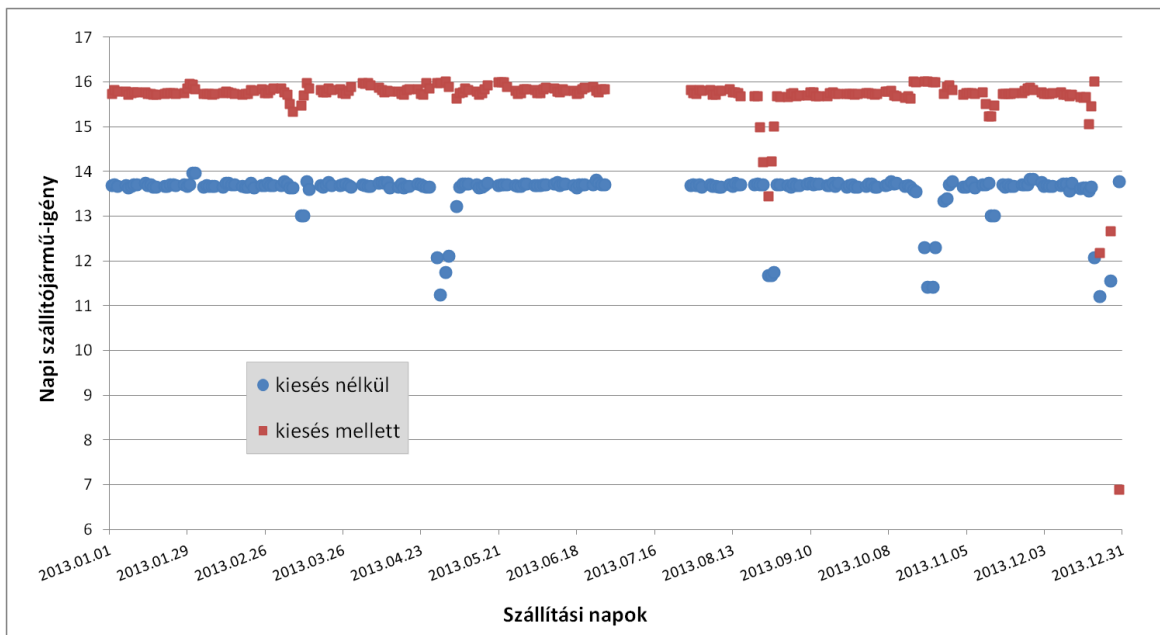
A hetente meglátogatott depók számában és a napi szállítójármű-igény simítás nagyságában tapasztalható jelentősebb növekedés a determinisztikus esethez képest. Utóbbi kapcsán kijelenthetem, hogy a $DJ^i = 236,74$ (56) célfüggvényérték elegendően jó, azaz kiegyensúlyozott megoldást tükröz, amit a további ábrák is bizonyítanak majd. A felrakódó berendezések számának jelentős növekedése ($2 \cdot PU = 16$ darab felrakódó berendezés) azonban már felkelti az igényt a további módszertani fejlesztésre. Emlékezzünk vissza, hogy csak a megnövekedett számítási igény miatt nem tudtam vizsgálni a $pu_2 = 7$ és $pu_1 = 6$ eseteket, valamint azt sem zárhatjuk ki, hogy EgyKiesoNap ABF mellett létezik olyan ütemezés, ahol hatnál kevesebb depót látogatunk meg az összes héten. Gyorsabb egzakt vagy heurisztikus algoritmus kidolgozásával adható válasz ezen kérdésekre.

A kiválasztott Pareto-optimális ütemezésben hetente meglátogatott depók számát mutatja a 7.4 ábra egyrészt kiesések nélkül (azaz, ha a feltételezések ellenére nem esnek ki szállítási napok), másrészt a lehetséges nem várt események bekövetkezése mellett.

Köszönhetően a flottaméret minimalizálása, valamint a napi járműigények simítása kritériumoknak, a napi szállítójármű-igények szűk intervallumban koncentrálnak mind a kiesés nélküli, mind a pótlást feltételező esetben (7.5 ábra). Amennyiben az induló ütemezést tartani lehet a teljes tervezési időhorizont folyamán, úgy a 230 szállítási napból 200 esetén az átlagos fuvarhossz 13,6 és 13,8 között marad, míg a többi érték 11,2 és 13,96 közötti zárt intervallumon oszlik el. Amennyiben pótolni szükséges a kieső napok fuvarjait, úgy 213 kieső nap esetén a pótló napok átlagos fuvarszáma 15,5 és 16 közötti lesz.



7.4 ábra Hetente meglátogatott depók száma a 2. döntési fázis outputjában

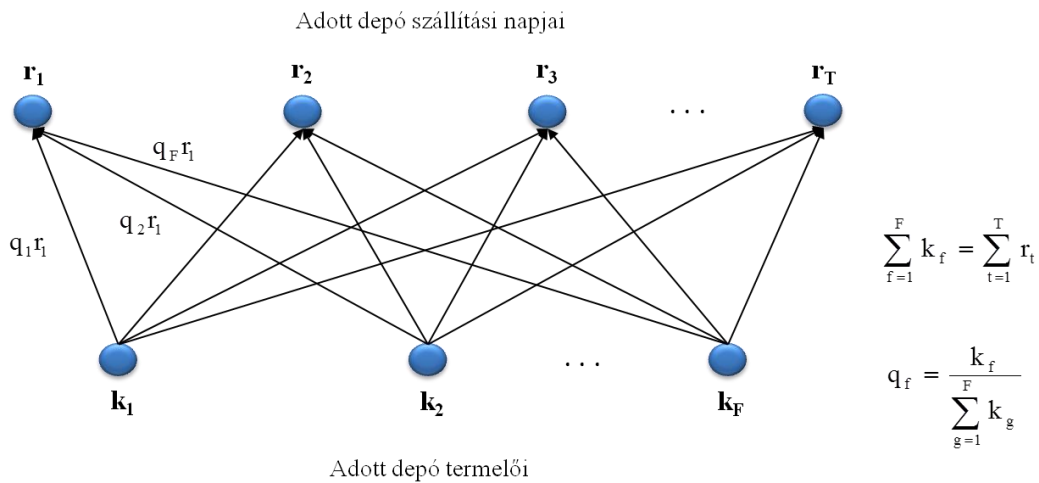


7.5 ábra Napi szállítójármű-igények a 2. döntési fázis outputjában

7.4 A depók feltöltésének szabálya

Az 5.3.1 alfejezetben bemutatott két célkitűzést, melyek a depók szintjén támogatják a Méltányos ütemezés versenyprioritás elem megvalósulását. Ezen célok az előbbiekben elemzett döntési fázisban játszottak szerepet, melynek eredményeként előállt a depókból történő alapanyag-beszállítás napi részletességű ütemterve. Jelen dolgozatban a depók feltöltési szabályával szemben támasztott legfontosabb követelmény – természetesen az elvárt mennyiségű tüzelőanyag biztosításán túl – az, hogy a termelők szintjén is teljesüljön a méltányos ütemezés követelménye.

Amennyiben a termelők és a depók közötti szállítási mennyiségek megadása során nem vesszük figyelembe a kamionok kapacitását, azaz folytonos változókkal reprezentáljuk ezen nagyságokat, úgy a 7.6 ábrán megadott kifejezésekkel határozhatjuk meg a szállítási tervet.



7.6 ábra Depók méltányos feltöltési szabálya

r_t az adott depó szállítási napjainak keresletét (az erőműbe való szállítás viszonylatában kínálatát), míg k_f az egyes termelők kínálatát mutatja (tonnában megadva). Felteszem, hogy a depó teljes kereslete megegyezik a kapcsolódó termelők összes kínálatával, valamint, hogy rendelkezésre áll a megfelelő nagyságú szállítási kapacitás (akár a termelők, akár harmadik fél végzi az alapanyag mozgatását). A depó t -edik szállítási napján az f -edik termelőtől $q_f \cdot r_t$ mennyiségű alapanyagot kell rendelkezésre állnia, ahol $q_f = \frac{k_f}{\sum_{g=1}^F k_g}$. Természetesen a tüzelőanyag depókba szállítása megelőzheti a depókból történő kiszállítás dátumát.

A szállítási költségek minimális szinten tartása érdekében törekedni kell arra, hogy teljes fuvarok induljanak a termelőktől (a járműparkról most nem teszem fel, hogy homogén). Ebben az esetben a fenti gráf éleihez tartozó szállítási mennyiségekre az alábbi alsó korlát adható:

$$m_{tf} \geq q_f \sum_{s=1}^t r_s - \sum_{s=1}^{t-1} m_{sf},$$

ahol m_{tf} a depó t -edik szállítási napján az f -edik termelőtől származó alapanyag mennyisége.

Amennyiben a Méltányos ütemezésen túl további feltételeket és célokat is figyelembe kívánunk venni, úgy a klasszikus szállítási feladat feltételrendszerét idéző optimalizálási problémához jutunk.

8 A hierarchikus ütemezési folyamat 3. döntési fázisa

A 3. döntési fázisban – adott fuvarszám és depók közötti allokáció mellett – végzem el a fuvarok napon belüli ütemezését. Itt kapjuk meg a kamionok, valamint a fel- és lerakodó berendezések részletes ütemezését, a szükséges járműflotta pontos nagyságát. A korábbi vizsgálatok eredményeként a 8.1 táblázatban felsorolt feltételeket és célfüggvényeket kell figyelembe venni a 3. döntési fázis során.

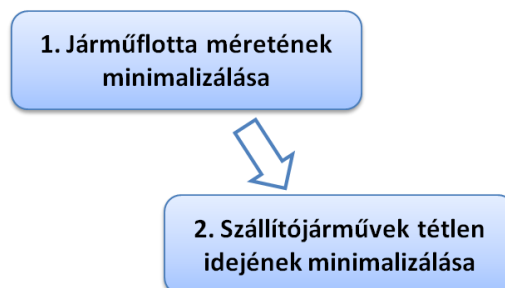
| Döntési fázis | Modellelem | Eszközök |
|--------------------------|---------------|---|
| 3. Napon belüli ütemezés | Feltételek | Alapvető technológiai korlátok |
| | | Speciális ütemezési szabályok |
| | Célfüggvények | Járműflotta méretének minimalizálása |
| | | Kamionok tétlen idejének minimalizálása |

8.1 táblázat A 3. döntési fázis modellelemei

A táblázatban látható modellelemek kapcsán az alábbi megjegyzéseket teszem. A bemutatandó alapmodellben a 'periódusonként pontosan egy lerakodás' ütemezési szabályt alkalmazom, de a fejezet végén példákat hozok arra, hogy ez miként terjeszthető ki más ütemezési szabályok esetére. A kamionok tétlen idejét a következőképpen definiálom: egy fuvar teljesítése után a kamion mindaddig tétlen marad, míg el nem kezd egy új fuvar, azonban a kamion első fuvarja előtti és utolsó fuvarja utáni időszak nem számít tétlen időnek. Az ütemezési szabály alapvetően befolyásolja a járműflotta méretét, hiszen minél hosszabb időtávra húzzuk szét adott számú fuvar beszállítását és lerakodását, annál kevesebb járműre van szükségünk. A két célfüggvény kapcsán már nem tehetők ilyen egyértelmű kijelentések, a fenti ütemezési szabály mellett például azt találtam, hogy a minimális méretű járműflotta tétlen idő nélkül ütemezhető, azaz nincs trade-off kapcsolat a célok között.

A napi fuvarszám alapján két csoportba sorolhatók az ütemezendő napok (a 2. döntési fázisban már látott módon):

1. A részletesen elemzendő alapmodellben (továbbiakban Biomass Truck Scheduling – BTS) legfeljebb 90 fuvar beérkeztetésére van szükség. Itt kikötöm, hogy a J darab fuvar az első J lerakodási periódusban kell érkeztetni, periódusonként pontosan egyet. Az állásidő nélkül működő lerakodó mellett keresem a járműflotta minimális méretét, majd ennek rögzítése után minimalizálom a járművek tétlen idejét (lexikografikus optimalizálás) (8.1 ábra).



8.1 ábra A célfüggvények fontossági sorrendje a 3. döntési fázisban

2. A módosított modellben feloldom a fenti kikötéseket, azaz – a lerakodási kapacitást nem sértve – tetszőleges számú fuvar fogadható az erőmű raktáraiban, és azok széthúzhatók a

teljes lerakodási intervallumon (a 2. döntési fázisban a napi 90-nél több fuvar vagy a fuvarok pótlásának esete). A járműpark méretének minimalizálása ebben az esetben is prioritást élvez a járművek tétlen idejének minimalizálásával szemben.

A BTS alapmodellre fordított kitüntetett figyelem oka, hogy az feltételrendszerében megegyezik a párhuzamos gépes egyszerveres ütemezési problémával (parallel machine scheduling with a single server problem – PMSSP), ami az irodalomban önálló kutatási irányvonallal és számos alkalmazási területtel rendelkezik. A BTS esetén a szerver szerepét a lerakódó daru látja el, melyre így is hivatkozom a probléma és a modellek leírása során. Emellett a feladat speciális erőforrás-korlátos projektütemezési problémának (Resource-Constrained Project Scheduling Problem - RCPSP) is tekinthető.

A korábbi döntési fázisoktól eltérően a napon belüli ütemezés (és újraütemezés) megköveteli, hogy elegendően hatékony, azaz rövid idő alatt megoldható MIP modellel rendelkezzen az ellátási lánc központi tervező egysége. Ezen követelmény kielégítése érdekében mélyebb irodalomkutatást végeztem a PMSSP és az RCPSP kapcsán, és erre támaszkodva négy különböző MIP modellt fogalmaztam meg. A modellek hatékonyságának értékelését nagyszámú tesztet segítségével végeztem el.

A 3. döntési fázis vegyes egészértékű programozási modelljeiben (MIP) használt jelölések

Az alábbi jelölések csak jelen fejezetben érvényesek.

Indexek

t, u periódusok indexei, $t, u = 1, \dots, t_l + 1$

j fuvarok indexe, $j = 1, \dots, J$

i fuvartípusok indexe, $i = 1, \dots, I$

Paraméterek

t_f első lerakodási periódus; első periódus, amikor a szerver elérhető ($t_f = \max p_j$)

t_l utolsó lerakodási periódus; utolsó periódus, amikor a szerver elérhető ($t_l = t_f + J - 1$)

p_j fuvarhossz, ami magában foglalja a szerveridőt is (s_j)

s_j lerakodás időtartama, szerveridő ($s_j = 1$)

p_i fuvartípusok hossza, ami magában foglalja a szerveridőt is

c_i i -edik fuvartípusba tartozó fuvarok száma, a p_i hosszúságú fuvarok száma ($\sum_i c_i = J$)

c' adott napon az üzemi raktárba szállítandó fuvarok száma az 1. döntési fázis outputja

alapján

c'' adott napon a külsőraktárba szállítandó fuvarok száma az 1. döntési fázis outputja alapján

M^* adott ütemezési feladathoz tartozó minimális kamionszám

IT^* adott ütemezési feladathoz tartozó minimális összes kamion tétlen idő

Változók

M adott ütemezéshez tartozó járműszám

IT adott ütemezéshez tartozó összes kamion tétlen idő

X_{it} 1, ha a t -edik periódusban i -edik fuvartípus kerül lerakodásra, egyébként 0

U_t t -edik periódusban használt kamionok száma

| | |
|----------|--|
| HL_t | monoton növekvő felső korlát az erőforrás-hasznosítási diagram burkológörbéjének értékeire |
| HR_t | monoton csökkenő felső korlát az erőforrás-hasznosítási diagram burkológörbéjének értékeire |
| V_t | 1, ha bármely kamion első fuvarja a t -edik periódusban kerül lerakódásra, egyébként 0 |
| V_{it} | 1, ha bármely kamion első fuvarjaként a t -edik periódusban i -edik fuvartípus kerül lerakódásra, egyébként 0 |
| W_{it} | 1, ha bármely kamion nem első fuvarjaként a t -edik periódusban i -edik fuvartípus kerül lerakódásra, egyébként 0 |
| E_t | 1, ha bármely kamionnak a t -edik periódus az utolsó lerakodási periódusa, egyébként 0 (megjegyzem, hogy a felírt modellek lehetővé teszik, hogy ne bináris, hanem $[0,1]$ intervallumon folytonos változóként kezeljük) |
| IT_t | t -edik periódusban tétlen járművek száma |
| R'_t | 1, ha a t -edik periódusban történik lerakodás az üzemi raktárban, egyébként 0 |
| R''_t | 1, ha a t -edik periódusban történik lerakodás a külső raktárban, egyébként 0 |

8.1 A Biomass Truck Scheduling probléma formális leírása

Jelen döntési fázis matematikai modelljeinek megfogalmazása során több egyszerűsítési lehetőséggel is élek:

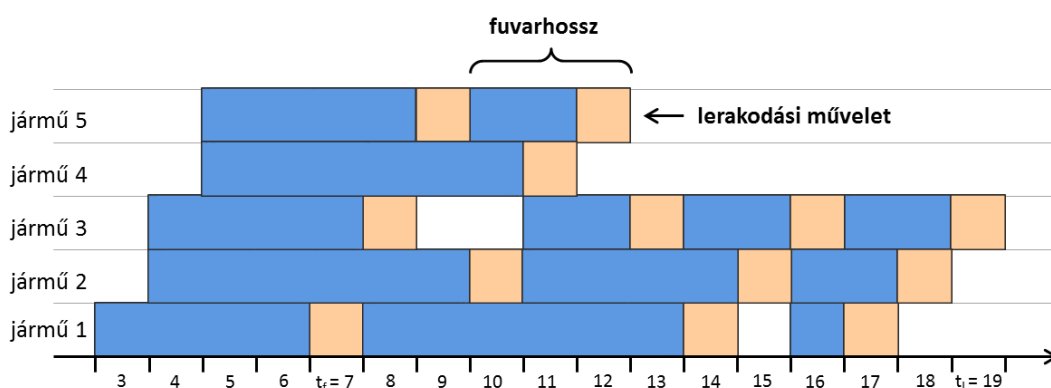
- Az egyedi fuvarok helyett fuvartípusokat alkalmazok a modellekben. A fuvartípusok az azonos hosszúságú fuvarok halmazai. Az egyedi fuvarok depók közötti, utólagos allokációja nem befolyásolja a nyert eredményeket.
- A MIP felírásokban nem történik meg explicit módon a járművek fuvarokhoz rendelése, ez ugyanis – az optimális ütemezés ismeretében – utólag is elvégezhető. A hozzárendelés módszerét a modellek leírásánál mutatom be.
- Mivel az üzemi és a külső raktárak azonos távolságra találhatók a depóktól, ezért azokban a modellekben, ahol periódusonként legfeljebb egy fuvart lehet lerakodni, nem szükséges ezek megkülönböztetése. Az adott napra előírt fuvarok egy „absztrakt” lerakodóban kerülnek fogadásra, amik aztán utólag allokálhatók a két raktár között.

Az alábbi felsorolás tartalmazza a BTS formális leírását:

- Az időhorizont egységnyi hosszú diszkrét periódusokból áll, $t = 1, \dots, t_l + 1$.
- Egy fuvar hossza (p_j) magában foglalja a kamionok által történő anyagmozgatás és a lerakodás (szerveridő) időigényét (s_j) is.
- Egyetlen szerver áll rendelkezésre a lerakodáshoz, a szerveridő pedig egységnyi hosszúságú ($s_j = 1$).
- A fuvarok nem megszakíthatók.
- A kamionok azonosak, és az egyes fuvarok teljesítéséhez pontosan egy kamionra van szükség.
- A kamionokra és a szerverre is igaz, hogy egy időben csak egy fuvar teljesítésén dolgozhatnak.
- A szerver a $[t_f, t_l]$ időintervallumon érhető el, ahol $t_f = \max p_j$ és $t_l = t_f + J - 1$, míg a kamionok az $[1, t_l]$ időintervallumon teljesíthetnek fuvarokat.
- A szervernek folyamatosan dolgoznia kell (szerver no-idle feltétel).

Első feladatként a kamionok számát minimalizálom, majd ennek optimális értéket rögzítve minimalizálom az összes kamion tétlen időt.

A BTS alapmodell – melyet legjobb tudomásom szerint még nem vizsgáltak az irodalomban – a 8.2 ábra illusztrálja, ahol tizenhárom fuvart rendeltem hozzá a t_f és t_l periódusok által határolt, tizenhárom periódusnyi hosszú lerakodási intervallumhoz (periódusonként pontosan egy fuvar). Jelen – nem optimális – ütemezés végrehajtásához öt járműre van szükség, miközben az első kamion egy, a harmadik pedig két periódus tétlen idővel rendelkezik. Megjegyzem, hogy az első fuvar nem feltétlenül az első periódusban kezdődik, valamint az ábrán nem tüntettem fel a fuvar nélküli periódusokat.



8.2 ábra A BTS illusztrációja

8.2 Releváns tanulmányok a PMSSP és RCPSP irodalmából

A párhuzamos gépes egyszerveres ütemezés (PMSSP) alapmodelljében adott M gép (jármű), melyeken J munkát (fuvar) kell végrehajtani. A probléma jellegzetessége, hogy minden egyes munka végrehajtása előtt vagy után bizonyos előkészítő vagy lezáró műveletre van szükség, aminek elvégzésére egyetlen szerver (lerakodó daru) áll rendelkezésre. A párhuzamos gépes egyszerveres problémák a termelési rendszerekben jelentek meg elsőként (például Koulamas 1996). Számos publikáció született acélipari, gépipari, elektronikai összeszerelő, textilipari, húsipari stb. alkalmazások kezelésére. Tipikus példának tekinthető a „termelés és tesztelés” tevékenységpár, ahol a párhuzamos gépsorokon összeszerelt termékegységek egy közös tesztelő berendezésen kerülnek ellenőrzésre. Az információs technológia nagyiramú fejlődése eredményeként az elmúlt években már informatikai alkalmazásokat is találunk az irodalomban (például Carпов és mtsai 2012, valamint Guirchoun és mtsai 2005). A logisztika területén Ou és mtsai (2010) vizsgálták egy autópári gyártó vállalat beszállítási rendszerét, ahol az elvégzendő munkákat az egyes fuvarok, a szerver műveletet pedig a telephelyen történő lerakodás jelentették (a BTS-sel összehasonlítva, a szerzők több szervert, más célfüggvényeket és kiegészítő feltételeket alkalmaztak).

Áttérve az elméleti eredményekre, Hall és mtsai (2000) rendszerezték a PMSSP változatok ezredforduló előtti irodalmát, majd Brucker (2002) folytatta ezek számítási komplexitásának elemzését. A makespan vagy a munkák befejezési ideje összegének (sum of job completion times) minimalizálására fókuszálva Kravchenko és Werner (1997, 1998), Abdekhodae és Wirth (2002), Abdekhodae és mtsai (2004), Guirchoun és mtsai (2005), Gan és mtsai (2012) valamint Kim és Lee (2012) szolgáltatott új eredményeket, egzakt és heurisztikus algoritmusokat kidolgozva, azok bonyolultságát vizsgálva. Kevés tanulmány született erőforrás-alapú célfüggvények kapcsán:

Koulamas (1996) valamint Kravchenko és Werner (1997) elemezték a kétgépes egyszerveres rendszert az állásidőket minimalizálva.

A BTS újdonságát a PMSSP modellcsaládon belül a szerverre megfogalmazott no-idle feltétel, valamint a járműszám minimalizálás célfüggvény jelentik. A Hall és mtsai (2000) által bevezetett jelölésrendszert alkalmazva az első feladat a $P, S1 | s = 1, S: no-idle | \mathcal{M}$ hármassal írható le, ahol P az azonos párhuzamos járműveket, $S1$ az egyetlen szervert (no-idle feltétellel), s az egységnyi szerveridőt, míg \mathcal{M} a járműszám minimalizálásának kritériumát jelöli. A nyert célfüggvényértéket jelölje M^* . A második feladatban M^* számú kamion mellett keresem az összes kamion tétlen idő minimumát ($PM^*, S1 | s = 1, S: no-idle | IT$), ahol IT jelöli ezen célfüggvényt.

A BTS egy speciális erőforrás-korlátos projektütemezési feladatnak (RCPSp) is tekinthető, ahol a két erőforrástípus (járművek, lerakodó szerver) időfüggő rendelkezésre állással jellemezhető. A RCPSp modell variánsok között több is foglalkozik az erőforrások optimális hasznosításával. Ezek közül az első, a Möhring (1984) által publikált erőforrás beruházási probléma (Resource Investment Problem), amelyre újabban inkább erőforrás rendelkezésre állási költség problémaként (Resource Availability Cost Problem – RACP) hivatkoznak az irodalomban. Ezen modell célja a beruházási költségek minimalizálása volt, melyről Möhring (1984) bizonyította, hogy NP-nehéz. A probléma megoldására, többek közt, Demeulemeester (1995), Yamashita és mtsai (2007), Ranjbar és mtsai (2008) valamint Rodrigues és Yamashita (2010) ajánlottak egzakt algoritmusokat és (meta)heurisztikákat. Mindazonáltal, ezen megoldó algoritmusok alkalmazása nem tűnik hatékonynak a BTS esetén, annak speciális jellemzői folytán. Két eredményt említek meg a releváns RCPSp irodalomból, melyeket érdemes adaptálni. Egyrészt, Rieck és mtsai (2012) azt találták, hogy a leghatékonyabb RCPSp MIP felírások, melyek az erőforrások hasznosításával foglalkoznak, időindexált döntési változókat alkalmaznak. Másrészt, az Artigues és mtsai (2003) által bevezetett erőforrás hálózati folyam (resource network flow) koncepciót kell még kiemelnem, melyben a szerzők az erőforrások áramlását modellezték az elvégzendő tevékenységek között. Ehhez AoN (tevékenység a csomóponton) hálózaton reprezentálták a problémát.

Az utolsó releváns modellcsalád az úgynevezett beton kiszállítási probléma (Concrete Delivery Problem – CDP; Durbin és Hoffman 2008, Yan és mtsai 2008, Kinable és mtsai 2014). Noha alkalmazási területük alapján mind a CDP, mind a BTS rokonságot mutat a járatszerkesztési problémával (Vehicle Routing Problem), azonban rendelkeznek egy olyan egyedi sajátossággal, amely eltérő megközelítésmódot kíván meg: a szállítási folyamatban található szűk keresztmetszet miatt (BTS-ben az egyetlen lerakodó szerver) a kamionok mozgását össze kell hangolni. A CDP esetén ezt általában az úgynevezett dinamikus idő-tér hálózat (dynamic time-space network) segítségével teszik meg, melynek alapötlete analóg az Artigues és mtsai (2003) által alkalmazott AON hálózatéval.

8.3 MIP modellek a BTS megoldására

Összesen négy MIP felírást mutatok be, melyek közül az első kettő a Pritsker és mtsai (1969) által bevezetett „hagyományos” időindexált változókra (TiInNail modellek), míg az utolsó kettő az Artigues és mtsai (2003) által inspirált erőforrás hálózati folyam koncepcióra épül (RNFAoA modellek).

8.3.1 TiInNail modellek

Az első megközelítésben a modellek a Pritsker és mtsai (1969) által bevezetett X_{it} bináris változókra épülnek. A változók értéke 1, ha i -edik fuvartípus kerül lerakódásra a t -edik periódusban. Thörnblad (2011) ezen típusú változókra 'nail variables'-ként hivatkozik, megkülönböztetve őket más időindexált bináris változóktól. Ezt az elnevezést felhasználva a két bemutatandó MIP modellt TiInNailA és TiInNailB (**T**ime-**I**ndexed **N**ail variables) nevekkel láttam el.

TiInNailA | \mathcal{M} modell

$$\min M \quad (8.1)$$

$$\sum_{i=1}^I X_{it} = 1 \quad \forall t: t_f \leq t \leq t_l \quad (8.2)$$

$$\sum_{t=t_f}^{t_l} X_{it} = c_i \quad \forall i \quad (8.3)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{u=t}^{t+p_i-1} X_{iu} = U_t \quad \forall t: t \leq t_l \quad (8.4)$$

$$U_t \leq M \quad \forall t: t_f \leq t \leq t_l \quad (8.5)$$

$$X_{it} \in \{0,1\} \quad \forall (i,t): t_f \leq t \leq t_l \quad (8.6)$$

Ebben a felírásban (8.1) jelenti a célfüggvényt, ami a kamionok számát minimalizálja. (8.2) feltételek biztosítják azt, hogy minden lerakodó periódusban pontosan egy fuvartípus kerüljön lezárásra, azaz a szerver állásidő nélkül dolgozzon. (8.3) korlátok garantálják, hogy minden fuvartípus halmazból az elemszámának megfelelő lerakodás történik meg. (8.4) feltételekben határozom meg minden periódusra a használt kamionok számát: az i -edik fuvartípus egy fuvarja akkor tart – és igényel egy kamiont – a t -edik periódusban, ha lerakódása a $\{t, \dots, t + p_i - 1\}$ intervallumba esik. (8.5) feltételek biztosítják, hogy a használt kamionok száma egyetlen periódusban sem haladja meg a rendelkezésre álló kamionok számát. Mivel a $t < t_f$ periódusokban csak olyan fuvarok végrehajtása történhet, melyek t_f periódusban is tartanak (ebben a periódusban lehet először fuvart lerakodni), ezért igaz lesz, hogy $U_t \leq U_{t_f}$, ha $t < t_f$. (8.6) korlátok definiálják a bináris döntési változókat. M és U_t értékei a feltételek és a minimalizáló célfüggvény eredményeként mindenképpen pozitív egészek lesznek.

A fenti feladat megoldása nem nyújt közvetlen információt a fuvar(típus)-kamion hozzárendelésről. Valójában több alternatív hozzárendelés is létezik, melyek kielégítik a fenti ütemezést. Az alábbi algoritmussal megadható egy lehetséges fuvar-kamion hozzárendelés:

1. A modell (3) feltételeinek megfelelően minden egyes fuvartípus ($i = 1, \dots, I$) c_i darab periódushoz került hozzárendelésre. Minden egyes fuvartípus esetén rendeljük hozzá tetszőlegesen a halmaz c_i számú fuvarját a fenti c_i számú periódushoz! Ennek eredményeként minden periódus rendelkezik pontosan egy lezárandó fuvarral.
2. A fuvar-kamion hozzárendelések előtt a kamionok a teljes tervezési időhorizonton elérhetők.
3. Tekintsük azt a legkésőbbi periódust (t'), aminek kapcsán az ott lezárandó fuvarhoz még nem rendeltük kamiont.

4. A korábbi hozzárendelések eredményeként kell lennie olyan kamionnak, ami nem teljesít fuvar (azaz elérhető) a $t \leq t'$ periódusokban. Rendeljük a t' periódusban lezárandó fuvar ehhez a kamionhoz!
5. Ez a kamion már nem elérhető többé a hozzárendelt fuvar időtartama alatt.
6. Ismételjük a 3-5. pontokban leírt lépéseket mindaddig, míg az összes fuvar kamionhoz nem rendeltük!

TilnNailB|M modell

A TilnNailB|M modell annyiban különbözik a TilnNailA|M modelltől, hogy a használt kamionok számát csak a t_f periódus esetén adom meg közvetlenül a bináris döntési változók segítségével. (8.4) feltételeket törölöm az előző felírásból, és helyette az alábbi három feltételcsoportot vezetem be.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{u=t_f}^{t_f+p_i-1} X_{iu} = U_{t_f} \quad (8.7)$$

$$U_{t-1} - 1 + \sum_{i=1}^I X_{i,t+p_i-1} = U_t \quad \forall t: t > t_f \quad (8.8)$$

$$U_{t+1} - \sum_{i=1}^I X_{i,t+p_i} = U_t \quad \forall t: t < t_f \quad (8.9)$$

(8.7) feltételek segítségével határozom meg a használt kamionok számát a t_f periódusban. (8.8) feltételekkel a t_f -et követő periódusok kamionszámát kalkulálom: az aktuális periódust közvetlenül megelőző periódusban pontosan egy fuvar kerül lerakódásra, és $\sum_{i=1}^I X_{i,t+p_i-1}$ számú kerül elindításra. (8.9) feltételek a t_f -et megelőző periódusok kamionszámát adják meg. Mind TilnNailA|M, mind TilnNailB|M esetén igaz, hogy a t_f periódust megelőző időszakra nem szükséges U_t értékeinek meghatározása, azonban a kamionok tétlen idejének minimalizálásában már ezek a változók is szerepet játszanak. A fenti modell megadásakor ezen feltételek a könnyebb áttekinthetőség miatt jelennek meg, de törlésük nem jelent nagyságrendi javulást a számítási idők tekintetében.

TilnNailA|IT és TilnNailB|IT modellek

Azonos módon kell módosítani mindkét fenti modellt, ha a kamionok összes tétlen idejét akarjuk minimalizálni. Egyrészt (8.10) jelenti az új célfüggvényt, M változót pedig M^* paraméterre cserélem. Másrészt mindkét modellt ki kell egészíteni (8.11)-(8.15) feltételekkel.

$$\min IT \quad (8.10)$$

$$HL_t \geq U_t \quad \forall t: t \leq t_l \quad (8.11)$$

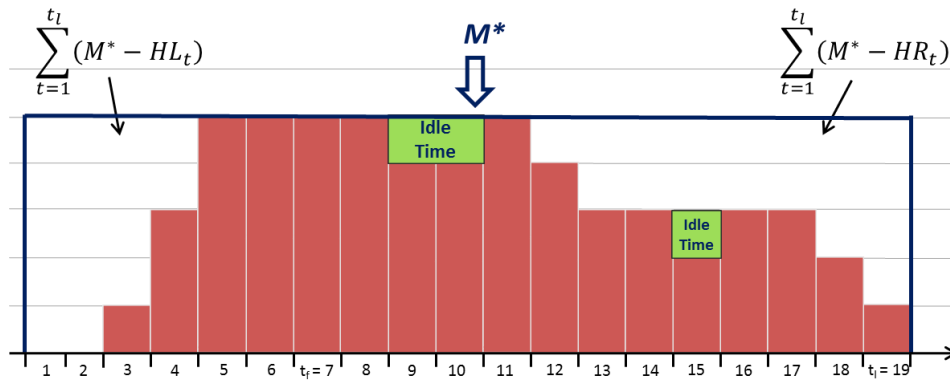
$$HL_t \geq HL_{t-1} \quad \forall t: 2 \leq t \leq t_l \quad (8.12)$$

$$HR_t \geq U_t \quad \forall t: t \leq t_l \quad (8.13)$$

$$HR_t \geq HR_{t+1} \quad \forall t: t \leq t_l - 1 \quad (8.14)$$

$$\sum_{t=1}^{t_l} (HL_t + HR_t) - (t_l M^* + \sum_{i=1}^I c_i p_i) = IT \quad (8.15)$$

Az U_t értékek által kirajzolódó diagramot a projektütemezésben erőforrás-hasznosítási diagramnak is nevezik (8.3 ábra). A tétlen idők számának minimalizálása ezen diagram kvázi-konkáv burkológörbéje alatti terület minimalizálását jelenti. A kamionok összes tétlen ideje nulla, ha a görbe alatti terület nagysága megegyezik a fuvarok hosszának összegével. Ezzel ekvivalens, ha a burkoló görbe és a kamion rendelkezésre állási szint (M^*) közötti terület nagyságát maximalizáljuk az $(1, t_l)$ intervallumon. Ehhez bevezetem HL_t és HR_t változókat, melyek rendre az erőforrás-hasznosítási diagram nem csökkenő és nem növekvő burkológörbéire vonatkozó felső korlátok ((8.11)-(8.14) feltételek). A minimalizáló célfüggvény biztosítja, hogy $\sum_{t=1}^{t_l} (M^* - HL_t)$ összeg a diagramtól "balra", míg $\sum_{t=1}^{t_l} (M^* - HR_t)$ az attól "jobbra" található burkoló görbe feletti részt összegzi. Ezen kifejezések felhasználásával egyszerűen kalkulálható az összes kamion tétlen idő nagysága ((15) feltétel): $IT = t_l M^* - \sum_{t=1}^{t_l} (M^* - HL_t) - \sum_{t=1}^{t_l} (M^* - HR_t) - \sum_{i=1}^I c_i p_i = \sum_{t=1}^{t_l} (HL_t + HR_t) - (t_l M^* + \sum_{i=1}^I c_i p_i)$. HL_t és HR_t értékei a feltételek és a minimalizáló célfüggvény eredményeként pozitív egészek.



8.3 ábra Célfüggvények kalkulációja az erőforrás-hasznosítási diagram segítségével

8.3.2 RNFAoA modellek

Az erőforrás hálózati folyam – tevékenység az élen (**R**esource **N**etwork **F**low – **A**ctivity **o**n **A**rc) modellek kidolgozását két konstrukció motiválta. Egyrészt az Artigues és mtsai (2003) által bevezetett, projektütemezésben alkalmazott erőforrás hálózati folyam koncepció (tevékenység a csomóponton hálózattal), másrészt a beton kiszállítási probléma (CDP) kapcsán használt idő-tér dinamikus hálózat (time-space dynamic network). A BTS esetére kidolgozott idő-tér hálózati reprezentációból kiindulva – a szokásos hálózati folyam definíciókat és értelmezéseket alkalmazva (Ahuja és mtsai, 1993) – mellékfeltételes hálózati folyam MIP modellek (network flow problem with side-constraints) írhatók fel. Mindkét fenti konstrukció lényege, hogy az erőforrások (járművek) áramlását adják meg az elvégzendő tevékenységek (fuvarok) között, térben és időben.

RNFAoAA | és RNFAoAA | IT modellek

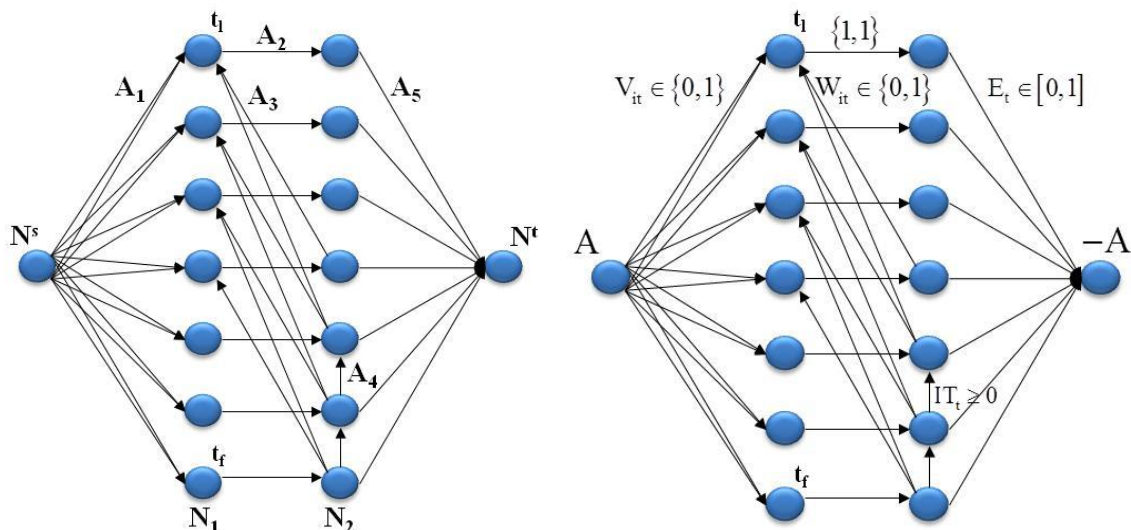
A feladatot reprezentáló hálózat alapja egy olyan irányított gráf, ahol a forrásban (N^s) és nyelőn (N^t) kívüli csomópontok két rétegbe sorolhatók. Az első réteg csomópontjai (N_1) a fuvarok lerakodási periódusait (t_f, \dots, t_l) , míg a második réteg elemei (N_2) a lerakodásokat követő periódusokat jelképezik $(t_f + 1, \dots, t_l + 1)$. A gráf éleit öt halmazba sorolhatjuk.

1. Az első halmazba (A_1) a forrásból induló és N_1 csomópontjaiba tartó élek tartoznak. Rájuk a V_{it} bináris változókkal hivatkozom a MIP modellben, melyek értéke 1, ha bármely kamion

első fuvarjaként a t -edik periódusban i -edik fuvertípus kerül lerakodásra, egyébként 0 (tehát minden \mathbf{N}_1 -beli csomóponthoz i számú él indul a forrásból). Ezek az élek a kamionok első fuvarjának lerakodás nélküli részét reprezentálják (kamionok használatba vonása).

2. A második halmaz élei (\mathbf{A}_2) az \mathbf{N}_1 és \mathbf{N}_2 rétegek elemeit kötik össze, méghozzá oly módon, hogy az \mathbf{N}_1 -beli t -edik periódust szimbolizáló csomópontból az \mathbf{N}_2 -beli $(t + 1)$ -edik periódust képviselő csomópontba fut él. Ezen élek jelentik a szerverműveletet (lerakodás), és igaz rájuk, hogy mindegyiken pontosan egy erőforrásnak kell áthaladnia (periódusonként pontosan egy kamion fuvarja fejeződik be). Ezek a korlátok biztosítja azt, hogy a szerver megszakítás nélkül dolgozzon és az összes fuvar teljesítésre kerüljön.
3. A harmadik halmazba (\mathbf{A}_3) az \mathbf{N}_2 halmazból az \mathbf{N}_1 halmazba futó élek tartoznak. Minden \mathbf{N}_2 -beli, t -edik periódust jelképező csomópontból élt húzok a $(t + p_i - 1)$ -edik periódust szimbolizáló \mathbf{N}_1 -beli elemhez az összes fuvertípust figyelembe véve. Ezek az élek jelentik azon fuvarok (lerakodás nélküli) végrehajtását, melyeket a kamionok már egy másik fuvar elvégzése után kezdenek meg (és amit egy \mathbf{A}_2 -beli lerakodás él követ). A MIP modellben a W_{it} bináris változókat használom ennek kifejezésére.
4. Az élek negyedik halmaza (\mathbf{A}_4) reprezentálja a kamionok tétlen idejét. \mathbf{N}_2 t -edik periódust szimbolizáló eleméből indul él a $(t + 1)$ -es csomópontba, ha $t \leq t_l - \min p_i - 1$. A MIP modellben IT_t változó mutatja a tétlen kamionok számát periódusonként.
5. Az élek utolsó halmaza (\mathbf{A}_5) \mathbf{N}_2 csomópontjait köti össze a nyelővel. Minden \mathbf{N}_2 -beli csomópontból egy él indul ki (MIP modellben E_t változók), melyek a kamionok visszahívását jelképezik.

Ahogy a fenti leírásból is kitűnik, az élek reprezentálják a kamionok lehetséges tevékenységeit (használatba vonás – első fuvar végrehajtása, lerakodás, további fuvarok végrehajtása, várakozás, visszavonás). A nyelőből induló kamionok – az időbeli és egyéb korlátokat betartva – ezen éleken áramolnak a nyelő csomópontba. A fent leírt gráfot és hálózati folyamatot illusztrálja a 8.4 ábra ($J = 7$, $p_i = 3, 4$).



8.4 ábra Az RNFAoAA modell gráf és hálózati folyamat reprezentációja

Az idő-tér hálózati modell egy feltételcsoport kezelésére nem alkalmas: a hálózati folyamat modellből nyert MIP feladatot ki kell egészíteni a fuvertípus halmazok elemszámára vonatkozó korlátozással

(általános esetben azon feltétellel, hogy minden fuvar pontosan egyszer hajtunk végre). A fenti koncepcióra épülő MIP modellek a következők:

$$\min M \quad (8.16)$$

$$\sum_{i=1}^I (V_{it} + W_{it}) = 1 \quad \forall t: t_f \leq t \leq t_l \quad (8.17)$$

$$1 + IT_{t-1} = \sum_{i=1}^I W_{i,t+p_i-1} + IT_t + E_t \quad \forall t: t_f + 1 \leq t \quad (8.18)$$

$$\sum_{t=t_f}^{t_l} (V_{it} + W_{it}) = c_i \quad \forall i \quad (8.19)$$

$$\sum_{t=t_f+1}^{t_l+1} E_t = M \quad (8.20)$$

$$V_{it} \in \{0,1\} \quad \forall (i,t): t_f \leq t \leq t_l \quad (8.21)$$

$$W_{it} \in \{0,1\} \quad \forall (i,t): t_f + p_i \leq t \leq t_l \quad (8.22)$$

$$E_t \in [0,1] \quad \forall t: t_f + 1 \leq t \leq t_l; E_{t_l+1} = 1 \quad (8.23)$$

$$IT_t \geq 0 \quad \forall t: t_f + 1 \leq t \leq t_l - \min(p_i) - 1 \quad (8.24)$$

(8.16) célfüggvényben a kamionszámot minimalizálom. (8.17) feltételek biztosítják, hogy minden lerakodó periódusban pontosan egy fuvart fejezzünk be, ami az \mathbf{N}_1 csomópontjaira felírt mérlegegyenleteket jelenti. Fontos megjegyezni, hogy mind V_{it} , mind W_{it} esetén a t index a lerakodás periódusára utal. (8.18) feltételek az \mathbf{N}_2 elemekre felírt mérlegegyenletek. Egy adott periódusban a felszabaduló kamionnal (pontosan 1 kamion szabadul fel minden lerakodási periódus után) és az előző periódusban tétlen kamionokkal három esemény történhet: új fuvar végrehajtását kezdi meg, tétlenül várnak egy későbbi fuvarkezdésre, vagy visszahívásra kerülnek a rendszerből. (8.19) mellékfeltételek biztosítják, hogy minden fuvertípusból pontosan c_i darab kerül végrehajtásra. (8.20) feltételben a szükséges kamionszám értékét határozom meg. Ez megtehető a forrásból induló erőforrások számának (V_{it} változók) összegzésével, vagy a fenti módon, a nyelőbe áramló kamionok számának összeadásával. (8.21)-(8.24) korlátok a változókat definiálják. A hálózati folyam fogalmi szerint, keresem azt a legkisebb M értéket, ami mellett létezik megengedett hálózati folyam (természetesen a mellékfeltételek figyelembe vétele mellett). Ahogy a későbbiekben látni fogjuk (RNFAoAB), a kamionok első fuvarjának kezelése kapcsán feleslegesen használok dupla indexű változót (V_{it}), azonban a TiInNail modellekkel vonandó párhuzam érdekében itt ezzel a megoldással élek.

A minimális kamionszám rögzítése után (a fenti modellben M változót M^* paraméterrel helyettesítem), a kamionok tétlen idejének minimalizálásához a fenti célfüggvény helyett a (8.25) kritériumot használom, melynek értékét (8.26) feltételben határozom meg.

$$\min IT \quad (8.25)$$

$$\sum_{t=t_f+1}^{t_l-\min(p_i)-1} IT_t = IT \quad (8.26)$$

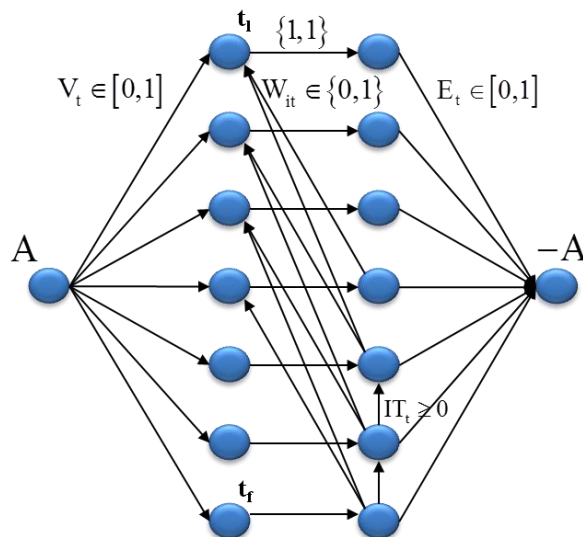
A minimális költségű hálózati folyam fogalmi szerint az \mathbf{A}_4 halmaz éleihez egységnyi, míg a többi élhez zérus fajlagos költséget rendelek, majd az összes költséget minimalizálom.

Bár születtek algoritmusok mellékfeltételes hálózati folyam problémák hatékony kezelésére (például Glover és Klingman, 1981; Belling-Seib és mtsai, 1988; Mathies és Mevert, 1998), jelen disszertációban nem használom ki ezt a lehetőséget: egy adott szolverrel tesztelem a különböző struktúrájú MIP modellek megoldhatóságát.

A továbbiakban a fenti modell azon módosítását mutatom be, ahol egyszerűsíttem a kamionok első fuvarjának kezelését.

RNFAoAB| \mathcal{M} és RNFAoAB|IT modellek

Az RNFAoAB modellek csak annyiban térnek el az RNFAoAA feladatokról, hogy az egyes kamionok első fuvarja kapcsán csak azok lerakodási periódusát választom ki a modellben, a fuvar típusát nem (V_{it} helyett V_t változókat használok): vegyük észre, hogy egyrészt a kamionok első fuvarjai egymással tetszőlegesen felcserélhetők, másrészt ezek típusát az határozza meg, hogy mely fuvarokra „nincs szükség” az ütemezés másik részében (W_{it}). Az RNFAoAB modellek hálózati folyam reprezentációja a 8.5 ábrán látható (ez természetesen továbbra sem tartalmazza a kiegészítő mellékfeltételeket).



8.5 ábra Az RNFAoAB modell hálózati folyam reprezentációja

Az RNFAoAB| \mathcal{M} modellt megkaphatjuk RNFAoAA| \mathcal{M} -t módosítva: (8.17), (8.19) és (8.21) feltételeket rendre (8.27), (8.28) és (8.29) feltételekkel helyettesítem.

$$V_t + \sum_{i=1}^I W_{it} = 1 \quad \forall t: t_f \leq t \leq t_l \quad (8.27)$$

$$\sum_{t=t_f+p_i}^{t_l} W_{it} \leq c_i \quad \forall i \quad (8.28)$$

$$V_t \in \{0, 1\} \quad \forall t: t_f \leq t \leq t_l \quad (8.29)$$

(8.27) feltételek biztosítják, hogy minden lerakodó periódusban pontosan egy fuvart fejezzünk be. (8.28) feltételekkel biztosítom, hogy a kamionok nem első fuvarjai teljesítik a fuvar típus halmazok elemszámára vonatkozó korlátokat. Igaz lesz, hogy $\sum_{i=1}^I c_i - \sum_{i=1}^I \sum_{t=t_f}^{t_l} W_{it} = \sum_{t=t_f}^{t_l} V_t =$

$\sum_{t=t_f+1}^{t_l+1} E_t = M$. (8.29) korlátok V_t változót definiálják, melyek kapcsán feloldható az egészértékű kikötés.

Az összes kamion tétlen idő minimalizálásához ugyanazokat a lépéseket kell elvégezni, mint RNFAOAA esetén: a minimális fuvarszám rögzítése után (M változót M^* paraméterrel helyettesítem) (8.16) célfüggvényt (8.25) kritériumra cserélem, melynek értékét (8.26) feltételben határozom meg.

8.3.3 A BTS MIP modellek futási eredményei

A kidolgozott MIP modellek hatékonyságának értékelését nagyszámú tesztet segítségével végeztem el. Ennek során a gyakorlati problémánál számottevően nagyobb méretű eseteket is vizsgáltam. Ezek generálásához két kontrollparamétert használtam: mind a fuvarok számát ($J = 120, 180, 300, 600$), mind a fuvar típusok számát ($I = 4, 8, 12, 16, 20$) változtattam. A fuvarok hossza (a szerveridőt is beleértve) 2 és 21 közötti egész szám ($p_j = \{2, \dots, 21\}$). A két kontrollparaméter összes lehetséges kombinációjához 50 tesztet generáltam véletlenszerűen. Egy adott kontrollparaméter-pár (például 120 fuvar és 4 különböző fuvar típus) esetén azonos valószínűséggel került a tesztalmazba minden lehetséges fuvar lista. Az egyes modellek futását maximálisan 5 percre engedtem. Amennyiben a solver ennyi idő alatt nem talált optimális megoldást, úgy felfüggesztettem azt. Ennek megfelelően a modellek hatékonyságának értékelésére két mutatót használok. Egyrészt az időkorlát miatt megállított esetek számát, másrészt a futási idők átlagát. Meg kell jegyezni, hogy itt torzított értékeket nyerünk, mivel a felfüggesztett eseteket sem hagyhatjuk figyelmen kívül: azok futási idejét egységesen 300 másodpercnek vettem. Ez a módszer azonban nem befolyásolja lényegesen a nyert eredményeket. A modelleket az AIMMS 3.13-as verziójában implementáltam, az optimalizáláshoz pedig CPLEX 12.5 solvert használtam. A tesztek futtatása egy kétféle, 2,53 GHz órajelű Intel Core i5 processzorral és 4GB RAM-mal rendelkező számítógépen történt Windows 7 alatt.

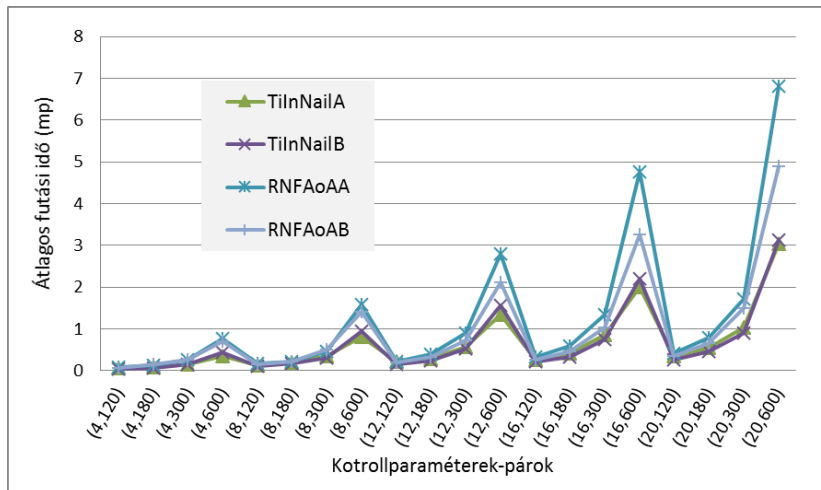
A kamionok számát minimalizáló modelleket ($P, S1 | s = 1, S: no-idle | \mathcal{M}$) vizsgálva azt láthatjuk, hogy a solver minden esetben talált optimális megoldást 5 percen belül. A különböző modellek átlagos futási idejét a 8.2 táblázat tartalmazza. A 'nail' típusú változókat használó felírások körülbelül együtt mozognak, és kissé jobb eredményeket adnak, mint a hálózati folyam koncepcióra épülők. A legjobb eredmények (kiemelve) egy szembejövő mintát követnek: a 600 fuvarral rendelkező esetek kapcsán a TiInNailA szolgáltatta leggyorsabban az optimális eredményeket, míg a többinél a TiInNailB modell bizonyult a leghatékonyabbnak. A legrosszabb futási eredményeket a RNFAoAA felírás esetében regisztráltam (kivéve két paraméter-párt), de gyakorlati szempontból mind a négy modell teljes mértékben kielégítőnek tekinthető.

| Kontrol paraméterek | TiInNailA | TiInNailB | RNFAoAA | RNFAoAB |
|------------------------|-----------|-----------|---------|---------|
| (4,120) | 0,06 | 0,04 | 0,08 | 0,07 |
| (4,180) | 0,08 | 0,07 | 0,13 | 0,14 |
| (4,300) | 0,14 | 0,14 | 0,26 | 0,26 |
| (4,600) | 0,34 | 0,44 | 0,78 | 0,70 |
| (8,120) | 0,13 | 0,10 | 0,17 | 0,14 |
| (8,180) | 0,19 | 0,16 | 0,22 | 0,21 |
| (8,300) | 0,34 | 0,31 | 0,47 | 0,51 |
| (8,600) | 0,82 | 0,93 | 1,59 | 1,40 |

| | | | | |
|----------|------|------|------|------|
| (12,120) | 0,21 | 0,16 | 0,22 | 0,20 |
| (12,180) | 0,27 | 0,23 | 0,39 | 0,33 |
| (12,300) | 0,56 | 0,52 | 0,91 | 0,72 |
| (12,600) | 1,34 | 1,55 | 2,80 | 2,11 |
| (16,120) | 0,26 | 0,21 | 0,33 | 0,27 |
| (16,180) | 0,42 | 0,33 | 0,60 | 0,47 |
| (16,300) | 0,85 | 0,74 | 1,33 | 1,04 |
| (16,600) | 2,01 | 2,20 | 4,75 | 3,27 |
| (20,120) | 0,35 | 0,26 | 0,42 | 0,35 |
| (20,180) | 0,56 | 0,45 | 0,79 | 0,65 |
| (20,300) | 1,03 | 0,91 | 1,73 | 1,51 |
| (20,600) | 3,05 | 3,14 | 6,80 | 4,90 |

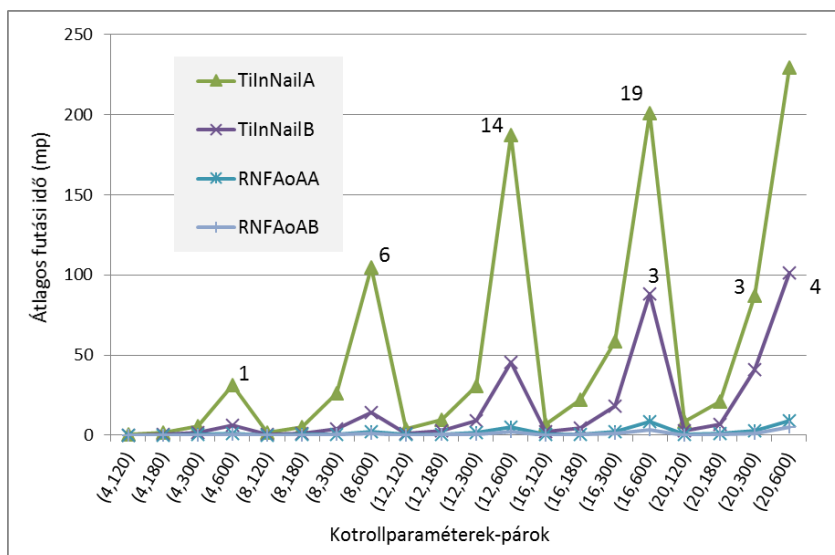
8.2 táblázat Átlagos futási idők (másodperc) a $P, S1|s = 1, S: no-idle|\mathcal{M}$ probléma esetén

A futási idők változását a kontrollparaméterek függvényében jól szemlélteti a 8.6 ábra. Mind a fuvarok, mind a fuvartípusok számának emelése növeli a futási időket.



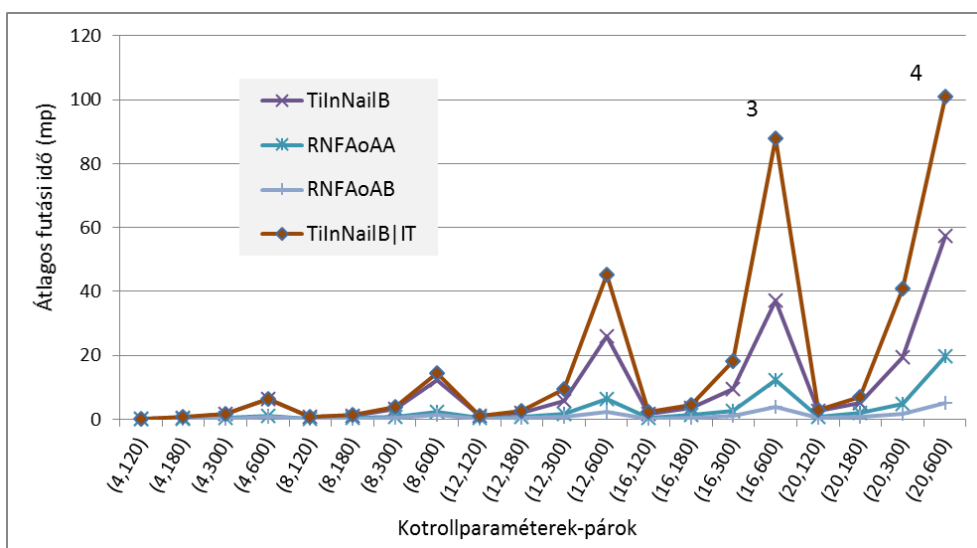
8.6 ábra Átlagos futási idők tendenciája a $P, S1|s = 1, S: no-idle|\mathcal{M}$ probléma kapcsán

A kamionok tétlen idejét minimalizáló modellek ($PM^*, S1|s = 1, S: no-idle|\mathcal{IT}$) teszteredményei már sokkal színesebb képet mutatnak. Itt gyakorlati szempontból is különbséget tehetünk az egyes felírások hatékonysága között. Az ide vonatkozó eredményeket a 8.7 ábra tartalmazza. Az átlagos futási idők mellett feltüntettem azt is, hogy az 50 tesztesetből a szolver hány alkalommal nem jutott el optimális megoldásig 300 másodperc alatt. Látható, hogy a 'nail' változókra épülő modellek már messze nem teljesítenek olyan jól, mint a kamionszám minimalizálása kapcsán. A legnagyobb méretű tesztfeladatok esetén a TilnNailA modell a futtatások kevesebb, mint felében talált optimális megoldást (29 esetben függesztettem fel a modell futását). Ennek megfelelően az így kalkulált átlagos futási idők is alulbecslik a tényleges értékeket. A hálózati modellek rendkívül jól teljesítenek ezen kritérium esetén is, átlagos futásidejük a legnagyobb méretű tesztfeladatok esetén sem lépik túl a 9 (RNFAoAA), illetve az 5 (RNFAoAB) másodpercet. Mindezt alacsony szórás mellett érik el, ami rendre 4,95 és 2,31 másodperc.



8.7 ábra Átlagos futási idők tendenciája a $PM^*, S1|s = 1, S: no-idle|JT$ probléma kapcsán

Azon feltételezéssel élve, hogy a két célfüggvény között nincs trade-off kapcsolat, azaz nem csak egymás rovására javíthatók, futtattam a modelleket a két kritérium összegét minimalizálva (a feltevés magyarázatát lásd később). Ahogy várható volt, általános eredményként a modellek átlagos futási ideje romlott, főként a nagyobb méretű feladatok esetén (bár nagyságrendje nem változott). Egyetlen kivételként, a TilnNailB modell hatékonyabbá vált: egyrészt minden tesztet kapcsán találtam optimális megoldást az 5 perces időkorláton belül, másrészt a nagyobb méretű feladatok esetén közel a felére csökkent az átlagos futási idő (8.8 ábra, ahol referenciaként feltüntettem RNFAoAB | JT futási eredményeit is).



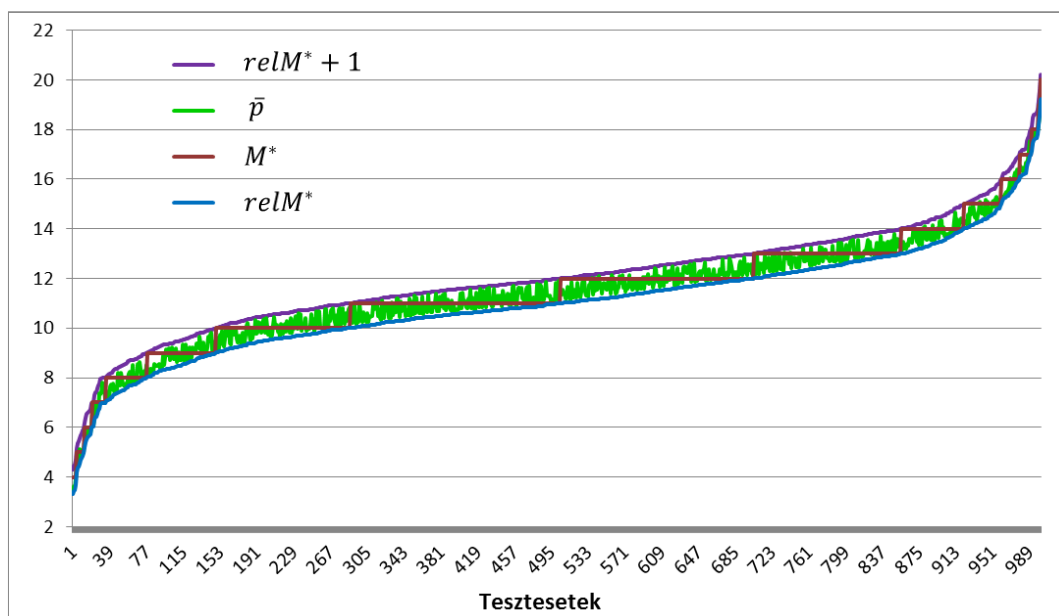
8.8 ábra Átlagos futási idők tendenciái a $P, S1|s = 1, S: no-idle|M + JT$ probléma kapcsán

A négy különböző MIP modell számítási komplexitásának kísérleti elemzésén túl két olyan általános jellemzőt vizsgáltam, melyek a célfüggvények optimális értékére vonatkoznak. Ezek kapcsán nyitott kérdéseket fogalmaztam meg, melyek egyben további kutatási irányokat is kijelölnek. Elsőként az optimális kamionszám, a fuvarok hossza, valamint az RNFAoAB | \mathcal{M} modell lazításának optimális

megoldása közötti összefüggést vizsgáltam. A modell lazítása során a bináris változókat $[0,1]$ intervallumon folytonos változókkal helyettesítettem. Az így nyert optimális kamionszámot jelölje $relM^*$. Az 1000 darab tesztet kapcsán a következő összefüggéseket találtam:

- Az átlagos fuvarhossz jól becsli az ütemezés végrehajtásához szükséges kamionok minimális számát. Pontosabban, ahol a fuvarok száma jelentősen meghaladja azok hosszát (például az elemzett esettanulmányban), ott igaz, hogy $|M^* - \bar{p}| < 1$, ahol $\bar{p} = \frac{\sum_{j=1}^J p_j}{J}$.
- A lazított modell optimális megoldása éles alsó korlátja az eredeti feladatnak, ugyanis $relM^*$ felső egészrésze M^* .
- Ezeken túl, a lazított célfüggvény és az átlagos fuvarhossz kapcsolatára a következő igaz: $relM^* \leq \bar{p} \leq relM^* + 1$.

A fenti eredményeket plasztikusan szemlélteti a 8.9 ábra, ahol a teszteteket először a minimális kamionszám, majd a lazított minimális kamionszám értéke szerint rendeztem növekvő sorrendbe.



8.9 ábra Az átlagos fuvarhossz, a bináris és a lazított modell optimális megoldásainak kapcsolata

A BTS probléma kapcsán megfogalmazott utolsó nyitott kérdés a kamionok tétlen idejére vonatkozik. A teszteteket futtatása során azt tapasztaltam, hogy a minimális kamionszám rögzítése mellett is található olyan ütemezés, ahol az összes kamion tétlen idő zérus. Azaz, a két kritérium között nincs trade-off kapcsolat a megfogalmazott feltételrendszer mellett. Gyakorlati szempontból azt mondhatjuk, hogy a szűk keresztmetszetet jelentő szerver nem csökkenti szignifikáns mértékben a kamionok működtetésének hatékonyságát. Amennyiben sikerül igazolni ezen nyitott kérdést, úgy az felhasználható lesz erőteljesebb megoldó algoritmusok kidolgozására is: a kamionok számát minimalizáló feladatban a lehetséges ütemezések terét jelentős mértékben szűkíthetjük, hiszen csak a tétlen idő nélküli megoldásokat kell figyelembe vennünk.

8.3.4 Konklúzió a BTS MIP modellek kapcsán

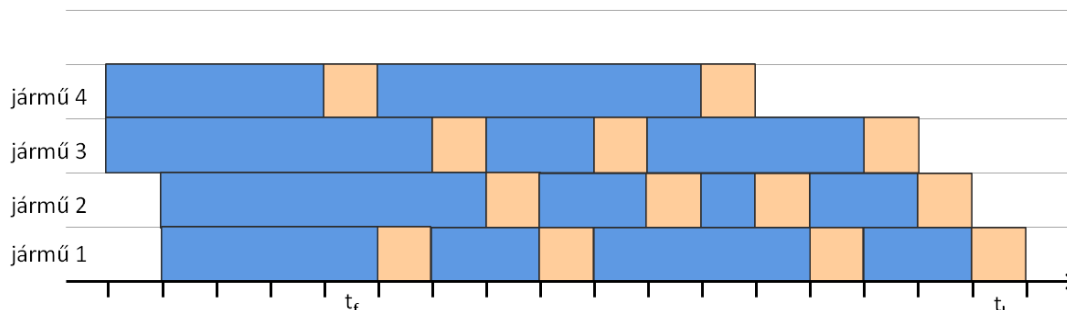
A modellek sajátossága, hogy azokban nem történik meg explicit módon a fuvarok kamionokhoz rendelése. Ez teszi lehetővé, hogy jellemzően alacsony futási időket nyerjünk a modellek megoldása

során. A MIP felírások közötti – a futási időkben is észlelhető – eltérés a két célfüggvény értékének meghatározásában rejlik. A TilnNail megközelítésben nem léteznek egyedi kamionok: a betartandó feltétel csupán az, hogy egyetlen periódusban se lépjük túl a rendelkezésre álló flottaméretet (az ehhez szükséges információt az erőforrás-hasznosítási diagram hordozza magában). A probléma ezen egyszerűsítése teszi lehetővé azt, hogy a kamionszám minimalizálási feladatban a legjobb futási időket kapjuk. A minimális összes kamion tétlen idő számítása azonban – a kiegészítő feltételek látszólagos egyszerűsége ellenére – már elrontja ezt a hatékony struktúrát, és gyakorlati szempontból lassan megoldható modellhez vezet. Az RNFAoA modellekben a tétlen idők explicit megjelenése a hálózati struktúrában lehetővé teszi, hogy a felírások rendkívül alacsony futási időket produkáljanak a második kritérium szerint is.

Az 1000 esetből álló tesztalmaz megoldása a probléma több érdekes jellemzőjére hívta fel a figyelmet. Egyrészt, a fuvarok átlagos hossza, valamint az első feladat bináris változóinak lazításával nyert megoldás jó becslését adja a minimális kamionszámnak, másrészt a minimális kamionszám rögzítése mellett is található tétlen idő nélküli ütemezés. Ezen eredmények alapján megfogalmazott nyitott kérdések bizonyítása vagy éppen elvetése jövőbeni kutatások tárgyát képezik.

8.4 A BTS és kiterjesztéseinek alkalmazása a 3. döntési fázisban

A biomassza tüzelőanyag-beszállítás 3. döntési fázisát, azaz a napon belüli ütemezést a tervezési időhorizont minden egyes napjára el kell végezni. Ehhez – a teszteredmények alapján – az RNFAoAB modell használatát javaslom. Illusztrációs példaként tekintünk a korábban már felhozott, 13 fuvarral rendelkező esetet ($\bar{p}_j = 4,46$, $relM^* = 3,64$). Az optimalizálás eredményeként négy járművet használó, tétlen idő nélküli ütemezést nyerünk (8.10 ábra).



8.10 ábra A BTS illusztrációs példa egy optimális megoldása

Tekintsünk most egy olyan beszállítási napot, ahol 70 fuvart kell beérkeztetni, 50-et az üzemi, míg 20-at a külső raktárba. A fuvarok megoszlása a 8.3 táblázatban látható ($\bar{p}_j = 8,86$).

| Fuvarhossz (p_i) | Darabszám (c_i) |
|----------------------|---------------------|
| 7 | 25 |
| 9 | 25 |
| 11 | 20 |

8.3 táblázat 70 fuvarból álló példa fuvarmegoszlása

Az RNFAoAB modell alapján 9 kamionra van szükségünk ($relM^* = 8,56$), természetesen egy tétlenidő-mentes ütemezésben. Az eredményként nyert ütemezés a 8.13 ábrán látható, ahol a különböző hosszúságú fuvarok lerakodási periódusait eltérő színnel jelöltem. Látható, hogy a 11.

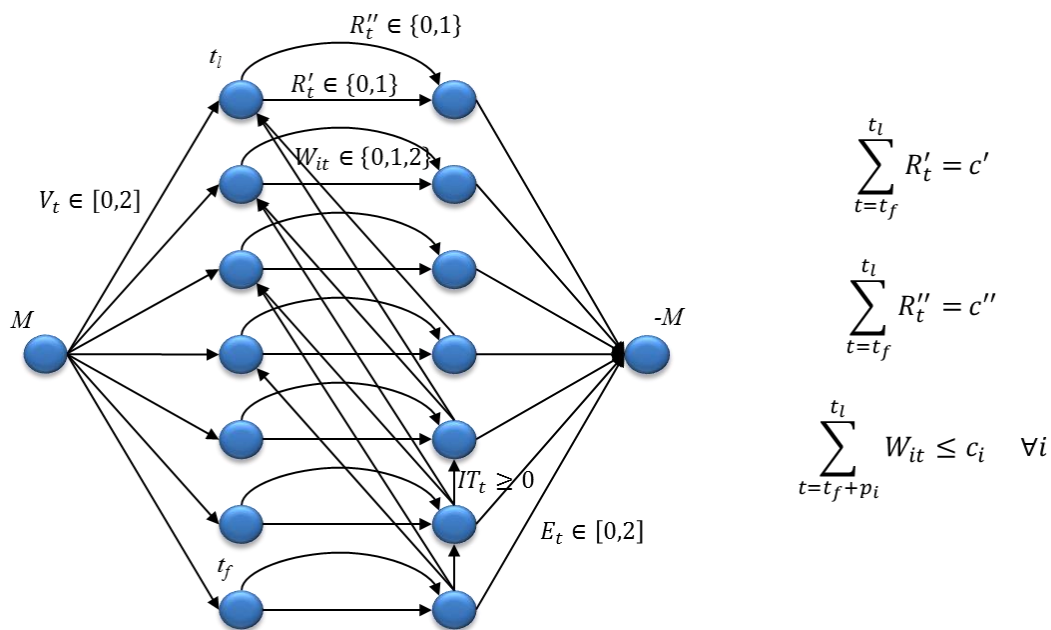
periódustól a 80.-ig minden periódusban pontosan egy „absztrakt” lerakodás történik. Ezeket az erőmű két raktára között úgy osztom szét, hogy az első 50 fuvar az üzemi, míg a maradék 20 a külső raktárba fusson be.

8.4.1 A BTS kiterjesztései

Az alábbiakban azt mutatom be, hogy az RNFAoAB hálózati folyam modellt miként kell módosítani, ha elhagyjuk a legfeljebb 90 fuvar és a periódusonként pontosan egy érkeztetés kikötéseket (8.11 ábra):

- $[t_f, t_l]$ most jelölje a teljes lerakodási intervallumot.
- Megduplázom \mathbf{A}_2 élhalmaz elemeit: R'_t változók az üzemi, míg R''_t változók a külső raktár lerakodási tevékenységét reprezentálják.
- Mivel biztosítani kell az üzemi és a külső raktárba érkező fuvarok 1. döntési fázisban meghatározott számát, ezért mellékfeltételeket fogalmazok meg mind R'_t , mind R''_t változók összegére. c' és c'' jelölik az üzemi és a külső raktárba szállítandó fuvarok számát.
- Bővítem a tétlen tevékenységet modellező élek halmazát (\mathbf{A}_4): \mathbf{N}_2 t -edik periódust szimbolizáló eleméből indul él a $(t + 1)$ -es csomópontba, ha $t \leq t_l - \min p_i$.
- A változók eredeti definícióját módosítani szükséges a 8.11 ábra szerint.

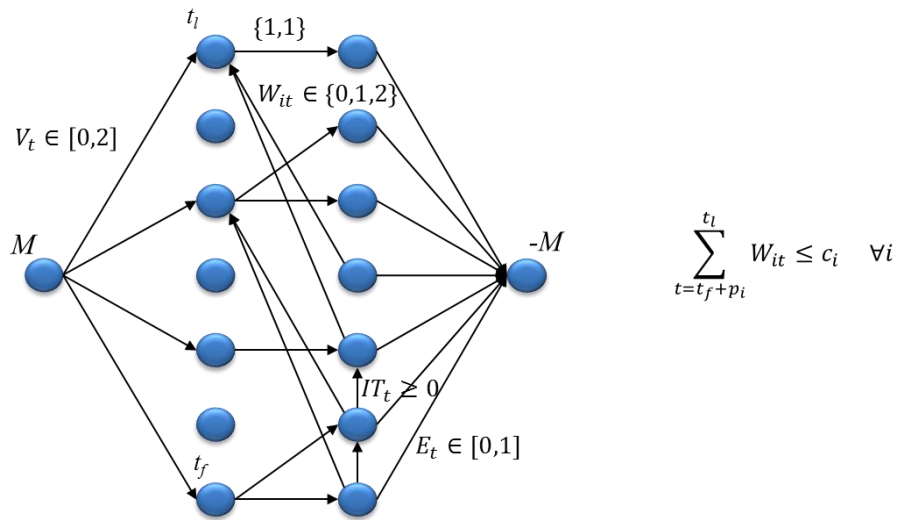
A hálózati folyam ábra mellett a szükséges mellékfeltételeket is feltüntettem.



8.11 ábra Az RNFAoAB modell kiterjesztése egy periódusban több lerakodás esetére

A lerakodási műveletet reprezentáló élek módosításával fogalmazhatók meg a robusztusságot növelő lerakodási szabályok is. Ezen szabályok lényege, hogy általuk szándékosan tétlen időt, sorbanállást építünk az ütemezési folyamatba (Mehta és Uzsoy 1998), így egy késve érkező jármű nem borítja fel feltétlenül az induló ütemezést. Egy lehetséges szabály szerint a páratlan periódusokban kettő, a páros periódusokban pedig nulla jármű-beérkezést tervezek (a periódusonként pontosan egy lerakodás itt újra érvényes). Ennek eredményeként a fuvarok felének lehetősége van arra, hogy egy periódusnyit késsenek, azonban ezzel $J/2$ egészrészének megfelelő

tétlen időt idézek elő. Következésképpen az átlagos fuvarhossz értéke is emelkedik, ami akár a járműigény növekedéséhez is vezethet. A módosított modell hálózati folyamat reprezentációját és a szükséges mellékfeltételt mutatja a 8.12 ábra.

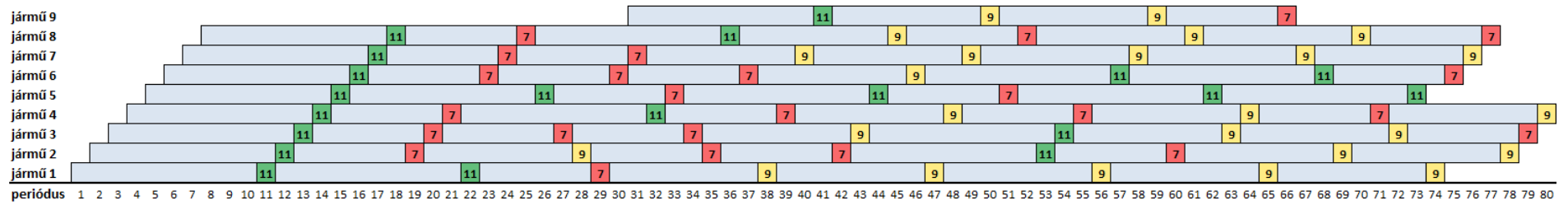


8.12 ábra Az RNFAoAB modell kiterjesztése egy robusztus ütemezési szabály mellett

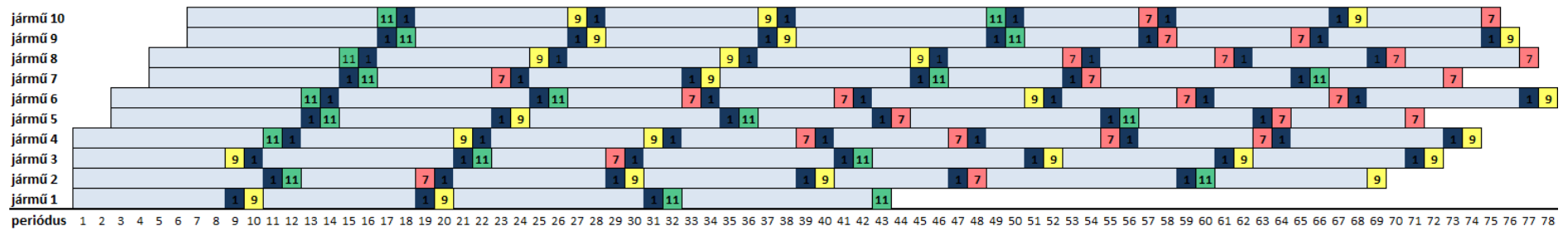
A 70 fuvarból álló példán lefuttatva ezt a modellt a következő eredményeket kapjuk: a beszállítás teljesítéséhez 10 járműre van szükség, a tétlen periódusok száma pedig 64-re nőtt (35 tervezett és 29 addicionális), azaz észrevehető módon romlott a folyamat hatékonysága. A 8.14 ábrán a különböző hosszúságú fuvarok lerakodási periódusait eltérő színnel jelöltem, míg az egy periódusnyi hosszú tétlen időket, akár a lerakodás előtti tervezett, akár a lerakodás utáni esetekről van szó, sötét négyzetek illusztrálják.

A BTS számos további irányban is kiterjeszthető, melyek növelik annak gyakorlati alkalmazhatóságát. Az RNFAoAB hálózati folyamat reprezentációt felhasználva, az eredeti feladat könnyedén kiegészíthető például az alábbi jellemzőkkel:

- a fuvarok hossza függ azok kezdési vagy lezáró periódusától (a napszaktól),
- az egyes depók, így a fuvarok tetszőleges rendelkezésre állási (release date) és határidővel (due date) jellemezhetőek,
- a modell több lerakodó esetére is általánosítható,
- a lerakodó nem érhető el minden periódusban,
- a járművek nem érhetőek el minden periódusban,
- a járművek több forrásból (garázs) indulhatnak és nyelőbe érkehetnek.



8.13 ábra 70 fuvar optimális ütemezése a periódusonként egy beérkezés szabály szerint



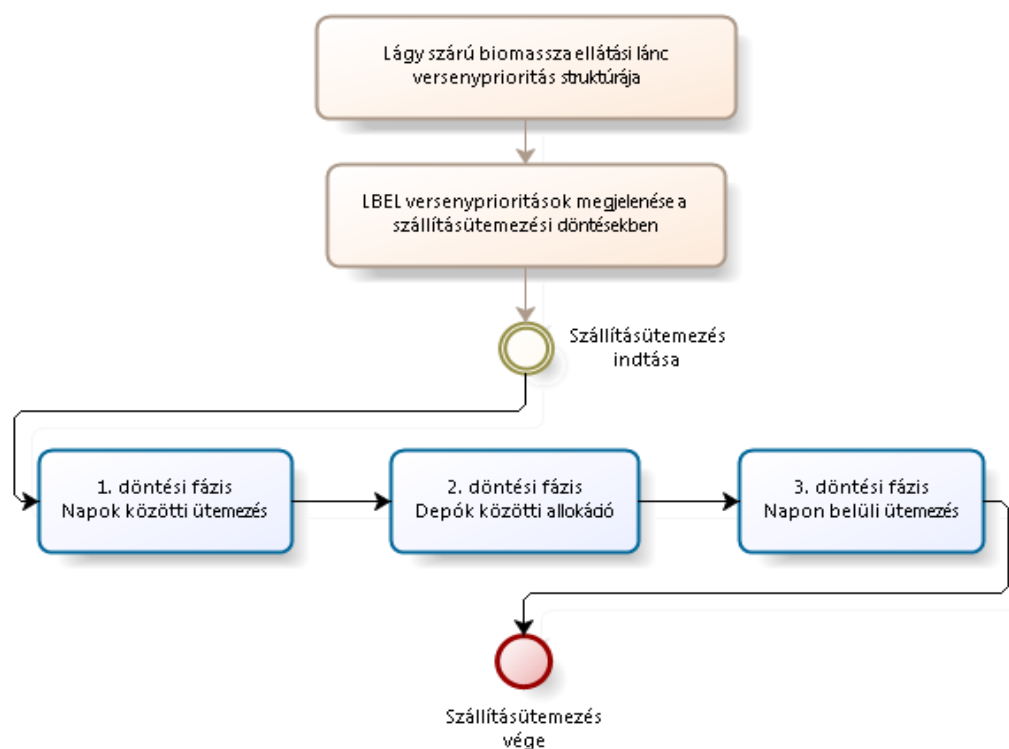
8.14 ábra 70 fuvar optimális ütemezése egy robusztus lerakodási szabály szerint

9 Összegzés

Jelen dolgozatban a lágyszárú biomassza ellátási lánc szállításütemezésének támogatására dolgoztam ki egy hierarchikus döntési folyamatot és matematikai modelleket. A modellek relevanciájának növelése érdekében feltártam a lágyszárú biomassza ellátási láncokat jellemző versenyprioritás struktúrát (elvárt stratégiai képességek), és ebből vezettem le a figyelembe veendő célokat, korlátokat. A szállításütemezési döntési situációt három döntési fázisra bontottam (9.1 ábra), ami lehetővé tette, hogy

- a többcélú, nagyméretű kombinatorikus optimalizálási feladat ellenére elegendően jó megoldásokat nyerjek,
- a döntési folyamat során részletesen elemezzem bizonyos célok kölcsönhatását, ezzel szofisztikált eszközt adva a döntéshozók kezébe.

A kidolgozott döntési modellek figyelembe veszik a beszállítási folyamatban rejlő bizonytalanságot is, amihez a scenáriógenerálás módszerét alkalmaztam.



9.1 ábra Lágyszárú biomassza ellátási lánc szállításütemezési döntési folyamata

9.1 A dolgozat tudományos eredményei, újdonságtartalma

A dolgozat tudományos eredményeit foglalja össze röviden az alábbi felsorolás:

- **1. tézis:** A lágyszárú biomassza ellátási lánc (LBEL) modelljének kidolgozása (az eredményeket [1, 4] publikációk tartalmazzák)
 - A LBEL versenyprioritás struktúrájának meghatározása az ellátási lánc teljesítményértékelési irodalom és a fisheri ellátási lánc illesztés elmélet mentén. A biomassza ellátási láncban a költséghatékonyság, a mennyiségi megbízhatóság és

a fenntarthatóság tekinthető az elsődleges versenyprioritásoknak. A beszállított alapanyag minősége befolyásolja a költséghatékonyság és a mennyiségi megbízhatóság képességeket, míg a megbízható ellátásban alapvető szerepet játszik a rugalmasság versenyprioritása is. Támogató versenyprioritásként az együttműködés, az információmegosztás és az innovativitás dimenziók is modellem részét képezik.

- A LBEL számára kidolgozott versenyprioritása struktúra operacionalizálása a szállítási ütemezési döntési szituáció esetén. A bizonytalanság modellezésére 'Aggregált Bizonytalansági Forogatókönyvek' bevezetése, valamint azon proaktív, preaktív és reaktív eszköztípusok azonosítása, melyek alkalmazhatók a megbízhatóság és rugalmasság képességek fejlesztésére.
- Hierarchikus döntési folyamat kidolgozása az LBEL szállítási ütemezési probléma kezelésére, melynek fázisai: 1. Napok közötti ütemezés, 2. Depók közötti allokáció, 3. Napon belüli ütemezés. Költséghatékonyságot és rugalmasságot fejlesztő eszközök definiálása és döntési fázisokhoz rendelése.
- **2. és 3. tézisek:** „1. Napok közötti ütemezés” és „2. Depók közötti allokáció” döntési fázisok modellje és megoldása (részeredményeket tartalmaznak [3, 5] publikációk)
 - Hálózati folyam alapú vegyes egészértékű programozási modellek kidolgozása a döntési fázisok kezelésére.
 - Mindkét fázis esetén többlépcsős elemzési folyamat megadása a többcélű függvényes feladatok megoldására, lexikografikus módszer alkalmazása vagy Pareto-optimalis megoldások keresése.
 - Az alapanyag-ellátás bizonytalanságát reprezentáló szimulációs eljárás (Aggregált Bizonytalansági Forogatókönyvek) alkalmazása – a szimulációs és optimalizáló modellek kombinációja.
- **4. tézis:** „3. Napon belüli ütemezés” döntési fázis modellje és megoldása (az eredményeket [2, 6] publikációk tartalmazzák)
 - A döntési fázis során az irodalomban korábban még nem tárgyalt Biomass Truck Scheduling (BTS) probléma definiálása, kapcsolata más ütemezési alapmodellekkel (párhuzamos gépes egyszerveres ütemezés és erőforrás-korlátos projekt ütemezés) és életszerű kiterjesztései. Két sejtés megfogalmazása a célfüggvények várható értékére vonatkozóan.
 - Alternatív vegyes egészértékű programozási modellek kidolgozása a BTS megoldására – hozzárendelési feladat és idő-tér hálózat alapú modellek alkalmazása. Az alternatív felírások számítási időszükségleteinek elemzése nagyszámú tesztet generálásával.

A dolgozat azon további elemei, melyek újdonságtartalommal bírnak:

- A lágyszárú biomassza ellátási lánc (LBEL) ellátási folyamatának – az alapanyag termelésétől az energetikai hasznosításig – részletes leírása a Supply Chain Operations Reference (SCOR) modell segítségével.
- A LBEL 16 elemből álló döntési hierarchiája – a termékszerkezet meghatározásától a karbantartás ütemezéséig –, és a biomassza ellátási láncok releváns irodalmának feldolgozása ezen hierarchia mentén.

Megjegyzem, hogy a dolgozat magját jelentő szállításütemezési modellek felhasználhatók más, hasonló jellemzőkkel bíró energetikai rendszerek kapcsán is, mint például biogázt vagy bioüzemanyagot előállító üzemek alapanyag-ellátásának tervezése és ütemezése. A kidolgozott matematikai modellek egy csoportja esetén lehetőség adódik alkalmazási területük további kiterjesztésére, így azok felhasználhatók nagy volumenű, lokális beszállítást (vagy disztribúciót) igénylő logisztikai rendszerek vagy éppen termelési feladatok ütemezése során is.

9.2 További kutatás lehetőségek

Számos további kutatási irányvonalat, lehetőséget azonosítottam a dolgozat megírása során, melyek az alábbiak:

- A biomassza ellátási lánc döntési hierarchia (3.2 ábra) kiegészítése a releváns kapcsolódó döntési szituációkkal, valamint az egyes döntési szituációkhoz jellemző indikátorok, teljesítménymutatók (KPI) rendelése.
- A lágyszárú biomassza ellátási lánc versenyprioritás struktúrájának (4.4 ábra, 4.6 táblázat) empirikus verifikálása.
- A lágyszárú biomassza ellátási lánc támogató versenyprioritásainak részletesebb elemzése (4.4 ábra, 4.6 táblázat), kapcsolatrendszerük cizelláltabb feltérképezése.
- A szállításütemezést jellemző bizonytalanság részletesebb modellezése a scenáriógenerálástól eltérő módszerekkel.
- Környezeti információk (például időjárás, forgalmi információk) felhasználása az szállításütemezési döntési modellekben, online ütemezés.
- Újratervezési megoldások kidolgozása a szállításütemezési probléma kapcsán.
- A 2. döntési fázis során alkalmazott „kerekítési” eljárások hatékonyságának vizsgálata és további megoldások kidolgozása.
- A 2. döntési fázisban, a kieső fuvarok különböző pótlási politikáinak elemzése, azokhoz hatékony megoldó algoritmusok kidolgozása.
- A 2. döntési fázisban, a felrakodó berendezések számát minimalizáló, nagy számításigényű problémához hatékony megoldó algoritmus kidolgozása (például oszlopgenerálás módszere).
- A 3. döntési fázisban megfogalmazott két nyitott kérdés (minimális járműszám becslése és a célfüggvények közötti trade-off) további vizsgálata.
- A 3. döntési fázis kapcsán különböző (robosztus) ütemezési politikák alkalmazása és hatásuk elemzése.
- A 3. döntési fázis alapmodelljének (BTS) életszerű kiterjesztései.
- Judd és mtsai (2012) BLP-M modelljéhez hasonlóan, a szállításütemezési modell kiegészítése a mobil felrakodó berendezések optimális útvonaltervezésével.
- Empirikus költségértékek figyelembe vétele a szállításütemezési modellekben.

A szerző tudományos közleményei az értekezés témájában

▪ Lektorált folyóiratcikk, idegen nyelven

- [1] Torjai L, Nagy J, Bai A, Decision hierarchy, competitive priorities and indicators in the large-scale 'herbaceous biomass to energy' supply chain, *Biomass and Bioenergy* 80 (2015) 321-329 (IF **3,394**)
- [2] Torjai L, Kruzsliz F, Mixed integer programming formulations for the Biomass Truck Scheduling problem, *Central European Journal of Operations Research* (2015) doi: 10.1007/s10100-015-0395-6 (IF **0,832**)
- [3] Szendrői E, Torjai L, Decision support application for design and management of energygrass supply chain, *Pollack Periodica* 3 (2008) 41-52

▪ Lektorált folyóiratcikk, magyar nyelven

- [4] Hau O, Pitz M, Torjai L, A lágyszárú biomassza ellátásilánc-menedzsment kérdései – az alapanyag-termelőktől az erőműig, *Vezetéstudomány* 41 (2010) 62-70
- [5] Torjai L, Szendrői E, Döntéstámogató alkalmazás az energiafű ellátási lánc tervezéséhez és irányításához, *GIKOF Journal* 6 (2008) 33-44

▪ Konferencia kiadványban megjelent publikáció

- [6] Torjai L, Pitz M, Energygrass Supply Scheduling to Minimize Investment and Operating Costs, In: Serifoglu F, Bilge Ü (eds.), *PMS 2008 Proceedings of the Eleventh International Workshop on Project Management and Scheduling*, Istanbul (2008) 265-268

▪ Konferencia előadás

- [7] Nagy J, Torjai L, Hierarchical transportation scheduling in herbaceous biomass supply chains, *ISIR 2014 – 18th International Symposium on Inventories*, Budapest, 2014
- [8] Torjai L, An effective algorithm to solve Energygrass Supply Scheduling problem, *EURO XXIV – 24th European Conference on Operational Research*, Lisbon, 2010
- [9] Torjai L, Pitz M, Energygrass Supply Scheduling to Minimize Investment and Operating Costs, *PMS 2008 – 11th International Workshop on Project Management and Scheduling*, Istanbul, 2008

Irodalomjegyzék

- Abdekhodaee AH, Wirth A, Scheduling parallel machines with a single server: some solvable cases and heuristics, *Computers and Operations Research* 29 (2002) 295-315.
- Abdekhodaee AH, Wirth A, Gan HS, Equal processing and equal setup times cases of scheduling parallel machines with a single server, *Computers and Operations Research* 31 (2004) 1867-1889.
- Afgan NH, Carvalho MG, Hovanov NV, Energy system assessment with sustainability indicators, *Energy Policy* 28 (2000) 603-612.
- Ahuja R, Magnanti T, Orlin J, *Network Flows: Theory, Algorithms and Applications*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
- Akgul O, Shah N, Papageorgiou LG, Economic optimisation of a UK advanced biofuel supply chain, *Biomass and Bioenergy* 41 (2012) 57-72.
- An H, Wilhelm WE, Searcy SW, Biofuel and petroleum-based fuel supply chain research: A literature review, *Biomass and Bioenergy* 35 (2011) 3763-3774.
- Artigues C, Michelon P, Reusser S, Insertion techniques for static and dynamic resource-constrained project scheduling, *European Journal of Operational Research* 149 (2003) 249-267.
- Awudu I, Zhang J, Uncertainties and sustainability concepts in biofuel supply chain management: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 1359-1368.
- Aytug H, Lawley MA, McKay K, Mohan S, Uzsoy R, Executing production schedules in the face of uncertainties: A review and some future directions, *European Journal of Operational Research* 161 (2005) 86-110.
- Bai A, Lakner Z, Marosvölgyi B, Nábrádi A, *A biomassza felhasználása*, Szaktudás Kiadó Ház, Budapest, 2002.
- Bakken BH, Skjelbred HI, Wolfgang O, eTransport: Investment planning in energy supply systems with multiple energy carriers, *Energy* 32 (2007) 1676-1689.
- Bals BD, Dale BE, Developing a model for assessing biomass processing technologies within a local biomass processing depot, *Bioresource Technology* 106 (2012) 161-169.
- Banos R, Manzano-Agugliaro F, Montoya FG, Gil C, Alcayde A, Gomez J, Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 1753-1766.
- Barbosa-Póvoa AP, Progresses and challenges in process industry supply chains optimization, *Current Opinion in Chemical Engineering* 1 (2012) 446-452.
- Belling-Seib K, Mevert P, Müller C, Network flow problems with one side constraint: a comparison of three solution methods, *Computers and Operations Research*, 15 (1988) 381-394.
- Bhagwat R, Sharma MK, Performance measurement of supply chain management: A balanced scorecard approach, *Computers and Industrial Engineering* 53 (2007) 43-62.
- Bielli M, Bielli A, Rossi R, Trends in Models and Algorithms for Fleet Management, *Procedia Social and Behavioral Sciences* 20 (2011) 4-18.
- Brucker P, Dhaenens-Flipo C, Knust S, Kravchenko SA, Werner F, Complexity results for parallel machine problems with a single server. *Journal of Scheduling* 5 (2002) 429-457.
- Caputo AC, Palumbo M, Pelagagge PM, Scacchia F, Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: effects of logistic variables, *Biomass and Bioenergy* 28 (2005) 35-51.
- Carneiro P, Ferreira P, The economic, environmental and strategic value of biomass, *Renewable Energy* 44 (2012) 17-22.
- Carpov S, Carlier J, Nace D, Sirdey R, Two-stage hybrid flow shop with precedence constraints and parallel machines at second stage, *Computers & Operations Research* 39 (2012) 736-745.
- Chan FTS, Performance Measurement in a Supply Chain, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 21 (2003) 534-548.
- Chatzimouratidis AI, Pilavachi PA, Decision support systems for power plants impact on the living standard, *Energy Conversion and Management* 64 (2012) 182-198.

- Chenhall RH, Langfield-Smith K, Multiple Perspectives of Performance Measures, *European Management Journal* 25 (2007) 266–282.
- Chien-Wei C, Fan Y, Bioethanol Supply Chain System Planning under Supply and Demand Uncertainties, *Transportation Research Part E* 48 (2011) 150-164.
- Chikán A, *Vállalatgazdaságtan*, AULA Kiadó, Budapest, 1997.
- Christiansen M, Fagerholt K, Nygreen B, Ronen D, Ship routing and scheduling in the new millennium, *European Journal of Operational Research* 228 (2013) 467-483.
- Connolly D, Lund H, Mathiesen BV, Leahy M, A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems, *Applied Energy* 87 (2010) 1059–1082.
- Corbett C, Van Wassenhove L, Trade-offs/what trade-offs? Competence and competitiveness in manufacturing strategy, *California Management Review* 35 (1993) 107-122.
- Cucek L, Varbanov PS, Klemes JJ, Kravanja Z, Total footprints-based multi-criteria optimisation of regional biomass energy supply chains, *Energy* 44 (2012) 135-145.
- Cundiff JS, Dias N, Serali HD, A linear programming approach for designing a herbaceous biomass delivery system, *Bioresource Technology* 59 (1997) 47-55.
- Cundiff JS, Grisso RD, Containerized handling to minimize hauling cost of herbaceous biomass, *Biomass and Bioenergy* 32 (2008) 308–313.
- Csete S, Lágyszárú energianövények és felhasználhatóságuk szilárd tüzelésű energetikai rendszerekben I, *Bioenergia* 3/2 (2008a) 32-36.
- Csete S, Lágyszárú energianövények és felhasználhatóságuk szilárd tüzelésű energetikai rendszerekben II, *Bioenergia* 3/3 (2008b) 19-24.
- Csete S, Lágyszárú energianövények és felhasználhatóságuk szilárd tüzelésű energetikai rendszerekben III, *Bioenergia* 3/4 (2008c) 34-40.
- Csipkés M, *Egyes energia-növények gazdasági elemzése, valamint hatásuk a földhasználatra*, Doktori értekezés, Debrecen, 2011.
- De Lima EP, Da Costa SEG, De Faria AR, Taking operations strategy into practice: Developing a process for defining priorities and performance measures, *International Journal of Production Economics* 122 (2009) 403–418.
- Demeulemeester E, Minimizing resource availability costs in timelimited project networks, *Management Science* 41 (1995) 1590-1598.
- De Mol RM, Jogems MAH, Van Beek P, Gigler JK, Simulation and optimization of the logistics of biomass fuel collection, *Netherlands Journal of Agricultural Science* 45 (1997) 219-228.
- Díaz-Garrido E, Martín-Pena ML, Sánchez-López JM, Competitive priorities in operations: Development of an indicator of strategic position, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 4 (2011) 118–125.
- Dombi M, Kuti I, Balogh P, Adalékok a megújuló energiaforrásokra alapozott projektek fenntarthatósági értékeléséhez, *Gazdálkodás* 56 (2012) 410-425.
- Drexl A, Kimms A, Lot sizing and scheduling – survey and extensions. *European Journal of Operational Research* 99 (1997) 221–235.
- Dunnett A, Adjiman C, Shah N, Biomass to heat supply chains – Applications of Process Optimization, *Process Safety and Environmental Protection* 85 (2007) 419–429.
- Durbin M, Hoffman K, The Dance of the Thirty-Ton Trucks: Dispatching and Scheduling in a Dynamic Environment, *Operations Research* 56 (2008) 3-19.
- Dyken SV, Bakken BH, Skjelbred HI, Linear mixed-integer models for biomass supply chains with transport, storage and processing, *Energy* 35 (2010) 1338–1350.
- Ebadian M, Sowlati T, Sokhansanj S, Stumborg M, Townley-Smith L, A new simulation model for multi-agricultural biomass logistics system in bioenergy production, *Biosystems Engineering* 110 (2011) 280-290.
- EC, Commission of the European Communities, proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources, Brussels, 23 January 2008,

URL: http://ec.europa.eu/energy/climate_actions/doc/2008_res_directive_en.pdf, Letöltés dátuma: 2014.02.12.

- Eksioglu SD, Acharya A, Leightley LE, Arora S, Analyzing the design and management of biomass-to-biorefinery supply chain, *Computers and Industrial Engineering* 57 (2009) 1342–1352.
- Elkington J, *Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business*, Capstone, Oxford, 1997.
- Ferdows K, Miller JG, Nakane J, Vollmann T, Evolving Global Manufacturing Strategies: Projection into the 1990's, *International Journal of Operations and Production Management* 6 (1986) 6–16.
- Fisher LM, What is the right supply chain for your product?, *Harvard Business Review* 75 (1997) 105–116.
- Fliedner G, CPFR: An emerging supply chain tool, *Industrial Management + Data Systems* 103 (2003) 14–21.
- Fogarassy Cs, *Energianövények a szántóföldön*, Szent István Egyetem, Gödöllő, 2001.
- Forsberg G, Biomass energy transport Analysis of bioenergy transport chains using life cycle inventory method, *Biomass and Bioenergy* 19 (2000) 17-30.
- Gan HS, Wirth A, Abdekhodaee A, A branch-and-price algorithm for the general case of scheduling parallel machines with a single server, *Computers and Operations Research* 39 (2012) 2242-2247.
- Glover F, Klingman D, The simplex SON method for LP/embedded network problems, *Mathematical Programming Study* 15 (1981) 148–176.
- Gockler L (szerk.), *Mezőgazdasági gépi munkák költsége 2008-ban*. FVM Mezőgazdasági Gépesítési Intézet, Gödöllő, 2008.
- Gold S, Bio-energy supply chains and stakeholders, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 16 (2011) 439-462.
- Gold S, Seuring S, Supply chain and logistics issues of bio-energy production, *Journal of Cleaner Production* 19 (2011) 32-42.
- Gnoni MG, Elia V, Lettera G, A strategic quantitative approach for sustainable energy production from biomass, *International Journal of Sustainable Engineering* 4 (2011) 127-135.
- Grossmann IE, Guillén-Gosálbez G, Scope for the application of mathematical programming techniques in the synthesis and planning of sustainable processes, *Computers and Chemical Engineering* 34 (2010) 1365–1376.
- Grossmann IE, Advances in mathematical programming models for Enterprise-wide Optimization, *Computers and Chemical Engineering* 47 (2012) 2–18.
- Guirchoun S, Martineau P, Billaut JC, Total completion time minimization in a computer system with a server and two parallel processors, *Computers and Operations Research* 32 (2005) 599-611.
- Hajnal É, *Élelmiszerlogisztikai folyamatok optimalizálása*, Doktori értekezés, Budapest, 2007.
- Hall NG, Potts CN, Sriskandarajah C, Parallel machine scheduling with a common server, *Discrete Applied Mathematics* 102 (2000) 223-243.
- Hassini E, Surti C, Searcy C, A literature review and a case study of sustainable supply chains with a focus on metrics, *International Journal of Production Economics* 140 (2012) 69–82.
- Hax AC, Meal HC, Hierarchical Integration of Production Planning and Scheduling. In: *Studies in Management Sciences*, Vol. 1. Logistics, M. A. Geisler (ed.), North Holland-American Elsevier, New York, 1975.
- Hayes RH, Wheelwright SC, *Restoring Our Competitive Edge: Competing Through Manufacturing*, Wiley, New York, 1984.
- Hill T, *Manufacturing Strategy: The Strategic Management of the Manufacturing Function*, MacMillan, London, 1993.
- Hiremath RB, Shikha S, Ravindranath NH, Decentralized energy planning; modeling and application—a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11 (2007) 729–752.
- Huang Y, Chen CW, Fan Y, Multistage optimization of the supply chains of biofuels, *Transportation Research Part E* 46 (2010) 820–830
- Huang SH, Uppal M, Shi J, A product driven approach to manufacturing supply chain selection, *Supply Chain Management* 7 (2002) 189–200.

- Hvolby H, Steger-Jensen K, Technical and industrial issues of Advanced Planning and Scheduling (APS) systems, *Computers in Industry* 61 (2010) 845–851.
- Iakovou E, Karagiannidis A, Vlachos D, Toka A, Malamakis A, Waste biomass-to-energy supply chain management: A critical synthesis, *Waste Management* 30 (2010) 1860-1870.
- Iannoni AP, Morabito R, A discrete simulation analysis of a logistics supply system, *Transportation Research Part E* 42 (2006) 191–210.
- International Energy Agency, *Key World Energy Statistics*, Paris, 2013, URL: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2013.pdf>, Letöltés dátuma: 2014.02.12.
- Jebaraj S, Iniyan S, A review of energy models, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 10 (2006) 281–311.
- Judd JD, Sarin SC, Cundiff JS, Design, modeling, and analysis of a feedstock logistics system, *Bioresource Technology* 103 (2012) 209–218.
- Jung L, Fabázisú centralizált áramtermelés logisztikája és annak hatása az Egererdő Erdészeti Zrt. fahasználati tevékenységére, *Doktori értekezés*, Sopron, 2008.
- Kathuria R, Competitive priorities and managerial performance: a taxonomy of small manufacturers, *Journal of Operations Management* 18 (2000) 627–641.
- Keirstead J, Samsatli N, Pantaleo AM, Shah N, Evaluating biomass energy strategies for a UK eco-town with an MILP optimization model, *Biomass and Bioenergy* 39 (2012) 306-316.
- Kim J, Realff MJ, Lee JH, Optimal design and global sensitivity analysis of biomass supply chain networks for biofuels under uncertainty, *Computers and Chemical Engineering* 35 (2011) 1738– 1751.
- Kim MY, Lee YH, MIP models and hybrid algorithm for minimizing the makespan of parallel machines scheduling problem with a single server, *Computers and Operations Research* 39 (2012) 2457-2468.
- Kinable J, Wauters T, Vanden Berghe G, The concrete delivery problem, *Computers and Operations Research* 48 (2014) 53–68.
- Kirkels AF, Discursive shifts in energy from biomass: A 30 year European overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 4105– 4115.
- Kohlheb N, Pataki Gy, Porteleki A, Szabo B, A megújuló-energiaforrások foglalkoztatási hatásának meghatározása Magyarországon, *ESSRG Kft.*, Budapest, 2009-2010.
- Kostin AM, Guillén-Gosálbez G, Mele FD, Bagajewicz MJ, Jiménez L, Design and planning of infrastructures for bioethanol and sugar production under demand uncertainty, *Chemical Engineering Research and Design* 90 (2012) 359–376.
- Kovács E, Miller GY, Téglá Zs, A versenyképesség javításának lehetőségei biomassza alapú energia-klaszterben, *Gazdálkodás* 52 (2008) 238-247.
- Koulamas CP, Scheduling two parallel semiautomatic machines to minimize machine interference, *Computers and Operations Research* 23 (1996) 945-956.
- Kravchenko SA, Werner F, Parallel machine scheduling problems with a single server, *Mathematical and Computer Modelling* 26 (1997) 1-11.
- Kravchenko SA, Werner F, Scheduling on parallel machines with a single and multiple servers, *Preprint 30/98*, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, 1-18, 1998.
- Kumar A, Sokhansanj S, Switchgrass (*Panicum virgatum*, L.) delivery to a biorefinery using integrated biomass supply analysis and logistics (IBSAL) model, *Bioresource Technology* 98 (2007) 1033–1044.
- Kurien GP, Qureshi MN, Study of performance measurement practices in supply chain management, *International Journal of Business, Management and Social Sciences* 2 (2011) 19-34.
- Laínez JM, Puigjaner L, Prospective and perspective review in integrated supply chain modelling for the chemical process industry, *Current Opinion in Chemical Engineering* 1 (2012) 430–445.
- Lam HL, Optimization with integration of renewable energy sources into energy supply chain, *Doktori értekezés*, Veszprém, 2011.
- Lee HL, Aligning supply chain strategies with product uncertainties. *California Management Review* 44 (2002) 105–120.

- Lee HL, The Triple-A Supply Chain, *Harvard Business Review* 82 (2004) 102-112.
- Li D, O'Brien C, A quantitative analysis of relationships between product types, supply chain strategies, *International Journal of Production Economics* 73 (2001) 29–39.
- Ligetvári F, Tóth J, A nap- és biomassza-energiafelhasználás növelésének egyes környezetvédelmi és gazdasági kérdései II, *Magyar Energetika* 19 (2012) 42-45.
- Mafakheri F, Nasiri F, Modeling of biomass-to-energy supply chain operations: Applications, challenges and research directions, *Energy Policy* 67 (2014) 116–126.
- Magda R, A megújuló energiaforrások szerepe és hatásai a hazai agrárgazdaságban, *Gazdálkodás* 55 (2011) 575-588.
- Marosvölgyi B, Hájos A, Horváth Zs, Kísérletek az amorfa (*Amorfa fruticosa* L.) energetikai hasznosítására Magyarországon, *E-tudomány*, 7/4 (2009).
- Mason-Jones R, Naylor B, Towill DR, Engineering the leagile supply chain, *International Journal of Agile Management Systems* 2 (2000) 54–61.
- Mathies S, Mevert P, A hybrid algorithm for solving network flow problems with side constraints, *Computers & Operations Research* 25 (1998) 745-756.
- McCormick K, Kaberger T, Key barriers for bioenergy in Europe: Economic conditions, know-how and institutional capacity, and supply chain coordination. *Biomass and Bioenergy* 31 (2007) 443-452.
- Mehta SV, Uzsoy RM, Predictable scheduling of a job shop subject to breakdowns, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 14 (1998) 365-378.
- Melnyk SA, Stewart DM, Swink M, Metrics and performance measurement in operations management: dealing with the metrics maze, *Journal of Operations Management* 22 (2004) 209–217.
- Meyer AD, Cattrysse D, Rasinmäki J, Orshoven JV, Methods to optimise the design and management of biomass-for-bioenergy supply chains: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31 (2014) 657–670.
- Meyr H, Wagner M, Rohde J, Structure of advanced planning systems. In: Stadtler H, Kilger C (Eds.), *Supply Chain Management and Advanced Planning – Concepts, Models Software and Case Studies*, Berlin, 2002, 99–104.
- Miao Z, Shastri Y, Grift TE, Hansen AC, Ting KC, Lignocellulosic biomass feedstock transportation alternatives, logistics, equipment configurations, and modeling, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 6 (2012) 351–362.
- Míguez JL, Morán JC, Granada E, Porteiro J, Review of technology in small-scale biomass combustion systems in the European market, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 3867– 3875.
- Milan EL, Fernandez SM, Aragonés LMP, Sugar cane transportation in Cuba, a case study, *European Journal of Operational Research* 174 (2006) 374–386.
- Mirakyan A, De Guio R, Integrated energy planning in cities and territories: a review of methods and tools *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22 (2013) 289–297.
- Möhring RH, Minimizing costs of resource requirements in project networks subject to a fixed completion time, *Operations Research* 32 (1984) 89-120.
- Morey RV, Kaliyan N, Tiffany DG, Schmidt DR, A corn stover supply logistics system, *Applied Engineering in Agriculture*, 26 (2010) 455-461.
- Munoz E, Capón-García E, Espuna A, Puigjaner L, Ontological framework for enterprise-wide integrated decision-making at operational level, *Computers and Chemical Engineering* 42 (2012) 217– 234.
- Nagy G, Szemmelweis T, Szócs I, Palotás AB, Lakossági célú biomassza tüzelés elterjesztésének időszzerűsége és korlátai, *E-tudomány*, 7/4 (2009).
- Nagy J, *Az ellátási lánc típusai és menedzsmentjének eszközei – empirikus elemzés*, Doktori értekezés, Budapest, 2010.
- Nakane J, *Manufacturing Futures Survey in Japan. A Comparative Survey 1983–1986*, Systems Science Institute – Waseda University, Tokyo, 1986.
- Naylor JB, Naim MM, Berry D, Leagility: Integrating the lean and agile manufacturing paradigms in the total supply chain, *International Journal of Production Economics* 62 (1999) 107–118.

- Narayanan VG, Raman A, Aligning Incentives in Supply Chains, *Harvard Business Review* 82 (2004) 94-102.
- Németh K, Dendromassza-hasznosításon alapuló decentralizált hőenergia-termelés és felhasználás komplex elemzése, Doktori értekezés, Keszthely, 2011.
- Ngai EWT, Leung TKP, Wong YH, Lee MCM, Chai PYF, Choi YS, Design and development of a context-aware decision support system for real-time accident handling in logistics, *Decision Support Systems* 52 (2012) 816–827.
- Nilsson D, Analysis and Simulation of Straw Fuel Logistics, Doktori értekezés, Uppsala, 1998.
- Ou J, Qi X, Lee CY, Parallel machine scheduling with multiple unloading servers, *Journal of Scheduling* 13 (2010) 213-226.
- Palmgren M, Optimal Truck Scheduling – Mathematical Modeling and Solution by the Column Generation Principle, Doktori értekezés, Linköping, 2005.
- Pannon-Hő Kft., Tüzelőanyag-ellátás, URL: <http://www.pannonpower.hu/tagvallalatok/pannon-ho-kft/tuzeloanyag-ellatas>, Letöltés dátuma: 2013.03.10.
- Papageorgiou LG, Supply chain optimisation for the process industries: Advances and opportunities, *Computers and Chemical Engineering* 33 (2009) 1931–1938.
- Pappné Vancsó J, A biomassza, mint energiaforrás hasznosítási lehetőségei, különös tekintettel Magyarországra, Doktori értekezés, Budapest, 2010.
- Park J, Kim B, The school bus routing problem: A review, *European Journal of Operational Research* 202 (2010) 311-319.
- Peidro D, Mula J, Poler R, Verdegay J, Fuzzy optimization for supply chain planning under supply, demand and process uncertainties, *Fuzzy Sets and Systems* 160 (2009) 2640-2657.
- Perpiná N, Alfonso D, Pérez-Navarro A, Penalvo E, Vargas C, Cárdenas R, Methodology based on Geographic Information Systems for biomass logistics and transport optimization, *Renewable Energy* 34 (2009) 555–565.
- Perrin R, Sesmero J, Wamisho K, Bacha D, Biomass supply schedules for Great Plains delivery points, *Biomass and Bioenergy* 37 (2012) 213-220.
- Petrolia DR, The economics of harvesting and transporting corn stover for conversion to fuel ethanol: A case study for Minnesota, *Biomass and Bioenergy* 32 (2008) 603 – 612.
- Pfeiffer A, Novel Methods for Decision Support in Production Planning and Control, Doktori értekezés, Budapest, 2007.
- Pfenninger S, Hawkes A, Keirstead J, Energy systems modeling for twenty-first century energy challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 33 (2014) 74–86.
- Pillac V, Gendreau M, Guéret C, Medaglia AL, A review of dynamic vehicle routing problems, *European Journal of Operational Research* 225 (2013) 1–11.
- Pintér G, Németh K, Kis-Simon T, A szőlővenyige és a fanyesedék biomassza erőművi beszállításának elemzése, *Gazdálkodás* 53 (2009) 357-363.
- Pintér G, Egyes mezőgazdasági melléktermékek energetikai hasznosításának lehetőségei Magyarországon, Doktori értekezés, Keszthely, 2012.
- Piplani R, Pujawan N, Ray S, Sustainable supply chain management, *International Journal of Production Economics* 111 (2008) 193–194.
- Porter ME, *Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors*, Free Press, New York, 1980.
- Pritsker AAB, Watters LJ, Wolfe PM, Multi-project scheduling with limited resources: a zero-one programming approach, *Management Science* 16 (1969) 93-108.
- Ranjbar M, Kianfar F, Shadrokh S, Solving the resource availability cost problem in project scheduling by path relinking and genetic algorithm, *Applied Mathematics and Computation* 196 (2008) 879-888.
- Ravula PP, Grisso RD, Cundiff JS, Comparison between two policy strategies for scheduling trucks in a biomass logistic system, *Bioresource Technology* 99 (2008a) 5710–5721.
- Ravula PP, Grisso RD, Cundiff JS, Cotton logistics as a model for a biomass transportation system, *Biomass and Bioenergy* 32 (2008b) 314 – 325.

- Réczey G, A biomassza energetikai hasznosításának lehetősége és a vidékfejlesztésre gyakorolt hatása az Európai Unió támogatási rendszerének tükrében, Doktori értekezés, Mosonmagyaróvár, 2007.
- REN21, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Renewables 2010 Global Status Report, Paris, 2010, URL: http://documents.rec.org/topic-areas/REN21_GSR_2010.pdf, Letöltés dátuma: 2012.10.10.
- Rentizelas AA, Tolis AJ, Tatsiopoulos IP, Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 887–894
- Richardson JJ, Spies KA, Rigdon S, York S, Lieu V, Nackley L, Garcia BB, Cawston R, Schwartz DT, Uncertainty in biomass supply estimates: Lessons from a Yakama Nation case study, *Biomass and Bioenergy* 35 (2011) 3698-3707.
- Rieck J, Zimmermann J, Gather T, Mixed-integer linear programming for resource leveling problems, *European Journal of Operational Research* 221 (2012) 27-37.
- Rodrigues SB, Yamashita DS, An exact algorithm for minimizing resource availability costs in project scheduling, *European Journal of Operational Research* 206 (2010) 562-568.
- Ruiz JA, Juarez MC, Morales MP, Munoz P, Mendivil MA, Biomass logistics: Financial & environmental costs. Case study: 2 MW electrical power plants, *Biomass and Bioenergy*, 56 (2013) 260-267.
- Saarijärvi H, Kuusela H, Spence MT, Using the pairwise comparison method to assess competitive priorities within a supply chain, *Industrial Marketing Management* 41 (2012) 631–638.
- Sastresa E, Usón A, Bribián I, Scarpellini S, Local impact of renewables on employment: assessment methodology and case study, *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 679–690.
- SCC, The Supply Chain Council, Inc., SCOR: Supply Chain Operations Reference – Version 10.0, August 2010, URL: www.supply-chain.org, Letöltés dátuma: 2011.10.26.
- SCC, The Supply Chain Council, Inc., SCOR Overview: Supply Chain Operations Reference Model – Version 9.0, 2008, URL: www.supply-chain.org, Letöltés dátuma: 2011.10.13.
- Schütz P, Tomasgard A, The impact of flexibility on operational supply chain planning, *International Journal of Production Economics* 134 (2011) 300–311.
- Scott JA, Ho W, Dey PK, A review of multi-criteria decision-making methods for bioenergy systems, *Energy* 42 (2012) 1-11.
- Searcy E, Flynn P, Ghafoori E, Kumar A, The Relative Cost of Biomass Energy Transport, *Applied Biochemistry & Biotechnology* 137 (2007) 639-652.
- Sharma B, Ingalls RG, Jones CL, Khanchi A, Biomass supply chain design and analysis: Basis, overview, modeling, challenges, and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24 (2013) 608–627.
- Sims REH, Bioenergy to mitigate for climate change and meet the needs of society, the economy and the environment, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 8 (2003) 349–370.
- Singh J, Panesar BS, Sharma SK, A mathematical model for transporting the biomass to biomass based power plant, *Biomass and Bioenergy* 34 (2010) 483–488.
- Skinner CW, Manufacturing — missing link in corporate strategy, *Harvard Business Review* 47 (1969) 136–145.
- Skinner CW, The focused factory, *Harvard Business Review* 52 (1974) 113–121.
- Sodhi MS, Tang CS, Modeling supply-chain planning under demand uncertainty using stochastic programming: A survey motivated by asset–liability management, *International Journal of Production Economics* 121 (2009) 728–738.
- Sokhansanj S, Kumar A, Turhollow AF, Development and implementation of integrated biomass supply analysis and logistics model (IBSAL), *Biomass and Bioenergy* 30 (2006) 838–847.
- Sokhansanj S, Hess JR, Biomass Supply Logistics and Infrastructure, *Biofuels Methods and Protocols*, Jonathan Mielenz (ed) Humana Press, New York, 2009, 1-25.
- Sokhansanj S, Mani S, Turhollow A, Kumar A, Bransby D, Lynd L, Laser M, Large-scale production, harvest and logistics of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) – current technology and envisioning a mature technology, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 3 (2009) 124–141.

- Stadler H, Supply chain management and advanced planning – basics, overview and challenge, *European Journal of Operational Research* 163 (2005) 575–588.
- Sultana A, Kumar A, Optimal siting and size of bioenergy facilities using geographic information system, *Applied Energy* 94 (2012) 192–201.
- Szendrői E, Torjai L, Decision support application for design and management of energygrass supply chain, *Pollack Periodica* 3 (2008) 41-52.
- Szász L, Demeter K, Fontosság-teljesítmény illeszkedés a termelési stratégiában és hatása az üzleti teljesítményre – dinamikus megközelítés, TM 85. sz. műhelytanulmány, BCE Vállalatgazdaságtan Intézet Versenyképesség Kutató Központ, Budapest, 2012.
- Tang O, Musa SN, Identifying risk issues and research advancements in supply chain risk management, *International Journal of Production Economics* 133 (2011) 25-34.
- Tatsiopoulos IP, Tolis AJ, Economic aspects of the cotton-stalk biomass logistics and comparison of supply chain methods, *Biomass and Bioenergy* 24 (2003) 199–214.
- Thompson JL, Tyner WE, Corn stover for bioenergy production: Cost estimates and farmer supply response, *Biomass and Bioenergy* 62 (2014) 166-173.
- Thörnblad K, On the optimization of schedules of a multitask production cell, Preprint 19/2011, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2011.
- Väätäinen K, Asikainen A, Eronen J, Improving the Logistics of Biofuel Reception at the Power Plant of Kuopio City, *International Journal of Forest Engineering* 16 (2005) 51-64.
- Van Landeghem H, Vanmaele H, Robust planning: a new paradigm for demand chain planning, *Journal of Operations Management* 20 (2002) 769–783.
- Varga ZB, A megújuló energiaforrások hasznosításának gazdasági vizsgálata Magyarországon; Különös tekintettel a biomassza és a napsugárzás energiájának kiaknázására, Doktori értekezés, Kaposvár, 2007.
- Városiné Demeter K, A termelési stratégia hozzájárulása a vállalati szintű versenyképességhez Magyarországon és nemzetközi viszonylatban, Doktori értekezés, Budapest, 2000.
- Vidékfejlesztési Minisztérium, A magyar élelmiszer-gazdaság 2011. évi helyzete – 8. Bioenergia-termelés, *Gazdálkodás* 56/4 (2012) 352-358.
- Vieira GE, Herrmann JW, Lin E, Rescheduling manufacturing systems: A framework of strategies, policies, and methods, *Journal of Scheduling* 6 (2003) 39-62.
- Voytenko Y, Peck P, Organisational frameworks for straw-based energy systems in Sweden and Denmark, *Biomass and Bioenergy* 38 (2012) 34-48.
- Vörös J, Termelés- és szolgáltatásmenedzsment, Akadémiai Kiadó Zrt., Budapest, 2010.
- Ward PT, Leong GK, Snyder DL, Manufacturing strategy: an overview of current process and content models. In: Ettl JE, Burstein MC, Fiegenbaum A (Eds.), *Manufacturing Strategy: The Research Agenda for the Next Decade*, Ann Arbor, Michigan, 1990, 189–199.
- Wheelwright SC, Reflecting corporate strategy in manufacturing decisions, *Business Horizons* 21 (1978) 57–66.
- Wong CY, Arljborn JS, Hvolby H, Johansen J, Assessing responsiveness of a volatile and seasonal supply chain: A case study, *International Journal of Production Economics* 104 (2006) 709–721.
- Yamashita DS, Armentano VA, Laguna M, Robust optimization models for project scheduling with resource availability cost, *Journal of Scheduling* 10 (2007) 67-76.
- Yan S, Lai W, Chen M, Production scheduling and truck dispatching of ready mixed concrete, *Transportation Research Part E* 44 (2008) 164–179.
- Zhang F, Johnson DM, Johnson MA, Development of a simulation model of biomass supply chain for biofuel production, *Renewable Energy* 44 (2012) 380-391.
- Zhou P, Ang BW, Poh KL, Decision analysis in energy and environmental modeling: An update, *Energy* 31 (2006) 2604–2622.
- Zhou H, Benton WC, Schilling DA, Milligan GW, Supply Chain Integration and the SCOR Model, *Journal of Business Logistics* 32 (2011) 332–344.

Zhu X, Yao Q, Logistics system design for biomass-to-bioenergy industry with multiple types of feedstocks, *Bioresource Technology* 102 (2011) 10936–10945.