

OTDK-dolgozat

2023

Budapesti Corvinus Egyetem



Életciklus károsanyag-kibocsátásának elemzése
játékelméleti módszerekkel

Modelling Emissions of Product Life Cycles with Game
Theoretical Methods

Írta: Horváth Adél Roxána

Konzulens: Radványi Anna Ráhel

Kézirat lezárása: 2022.04.19.

Tartalomjegyzék

Bevezetés	1
1. Gyümölcsös dobozok életciklusa	3
1.1. Az életciklus-elemzés alapjai	3
1.2. Esettanulmány	6
1.2.1. Az elemzés módszertani jellemzői	8
1.2.2. A gyártás folyamata	9
1.2.3. A szállítás folyamata	10
1.2.4. Hatásvizsgálat	11
2. Játékelméleti bevezető	13
2.1. Koalíciós játékok	13
2.2. Kifizetések és a mag	14
2.3. A Shapley-érték	15
2.4. Konvex és konkáv játékok	17
2.4.1. Konvex játékok magja és Shapley-értéke	18
2.4.2. Konkáv játékok egy alkalmazása: költségallokációs játékok	19
3. Ellátási lánc játékok	20
3.1. Ellátási lánc probléma	21
3.2. Az ellátási lánc játék bevezetése	22
3.3. Az ellátási lánc játékok karakterizációja	22
3.4. Shapley-érték axiomatizációja	23
4. A gyümölcsös dobozok életciklusának elemzése ellátási lánc játékokkal	25
4.1. A játék szereplői	25
4.2. A felelősségi körök meghatározása	26
4.3. A játék definíciója	27
4.4. A játék reprezentációja	28
4.5. A játék megoldása: a Shapley-érték	29

4.6. Az eredmények értékelése	30
Összefoglalás	32
Irodalomjegyzék	33

Ábrák jegyzéke

1.1. SETAC-háromszög	4
1.2. Életciklus-elemzés	6
1.3. Polimerek életútja	11

Táblázatok jegyzéke

1.1. Az egyes polimerekre vonatkozó CO ₂ kibocsátás folyamatonként	12
4.1. A játékosok	26
4.2. A folyamatok	26
4.3. A három polimerre vonatkozó CO ₂ kibocsátás folyamatonként	27
4.4. A játék reprezentációjában releváns koalíciók	28
4.5. Reprezentáció a duális egyetértési játékkal	29

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Radványi Anna Ráhelnek, aki a dolgozatom megírása során lelkiismeretesen segítette munkámat szakmai tudásával, jó ötleteivel, valamint hasznos tanácsaival.

Szeretném megköszönni Pintér Miklósnak is, hogy szakmai segítségével hozzájárult a dolgozatom elkészítéséhez.

Bevezetés

A dolgozatban arra a problémára keresem a megoldást, hogy egy termék életciklus-elemzése során megállapított teljes károsanyag-kibocsátását hogyan lehet szétosztani a termelési folyamatot reprezentáló ellátási lánc szereplői között. Céлом egy olyan játékelméleti modell bemutatása, ami alkalmas arra, hogy a vállalatokat károsanyag-kibocsátásuk csökkentésére ösztönözze.

A dolgozat alapját a gyümölcsös dobozok ellátási láncá adja. Ezen keresztül fogom bemutatni az említett játékelméleti modellt. A megfelelő környezetbarát hozzáállásra mind egyéni, mind vállalati szinten szükség van. Többek között azért esett a választásom egy nagyrészt műanyagból készült termék ellátási láncára, mert a műanyag hulladék helytelen felhasználása az összes élő szervezetre káros hatással van. A bemutatott esettanulmány mind a polietilén-tereftalát (PET), a polisztirol (PS), valamint a politejsav (PLA) anyagokból készült dobozokkal is foglalkozik.

Az 1. fejezetben a gyümölcsös dobozok életciklus-elemzésével foglalkozom bővebben. Bemutatom az életciklus-elemzés módszertanát, ami a környezetre kiható károsanyag-kibocsátások számszerűsítésével foglalkozik. Kifejtem a PET, a PS, valamint PLA anyagok sajátosságait, az előállításuk menetét, valamint bemutatom a termelésükhöz kapcsolódó termelési folyamatokat.

A 2. fejezetben a kooperatív játékelmélet alapvető fogalmait, definícióit, jelöléseit ismertetem. A kooperatív játékelmélet segítségével olyan gazdasági szituációkat lehet modellezni és elemezni, melyekben azon van a hangsúly, hogy a felek együttműködésükkel milyen eredményt tudnak elérni. A szereplők mindamellett, hogy saját érdekeiket érvényesítik, eldönthetik a többi szereplő döntésének ismeretében, hogy részt vesznek-e egy adott együttműködésben vagy sem. Ismertetem többek között a Shapley-érték definícióját, ami az elosztási probléma megoldásában lesz a segítségemre a későbbiekben.

A 3. fejezetben az ellátási lánc játékokat mutatom be. Ezen fejezetben ismertetem a modellt, melynek alkalmazásával egy adott termék életciklus-elemzése során fellépő teljes károsanyag-kibocsátást tudjuk szétosztani az ellátási lánc szereplői között. Bemutatom, hogy a Shapley-érték milyen tulajdonságokkal rendelkezik az adott játékosztály esetén.

A 4. és egyben utolsó fejezetben a gyümölcsös dobozok életciklus-elemzésére alkal-

mazom a 3. fejezetben ismertetett ellátási lánc játékot. A kapott eredményeket elemzem és kifejtem, hogy ez a játékelméleti modell miként lenne alkalmazható annak érdekében, hogy a vállalatok károsanyag-kibocsátásuk csökkentésére törekedjenek.

1. fejezet

Gyümölcsös dobozok életciklusa

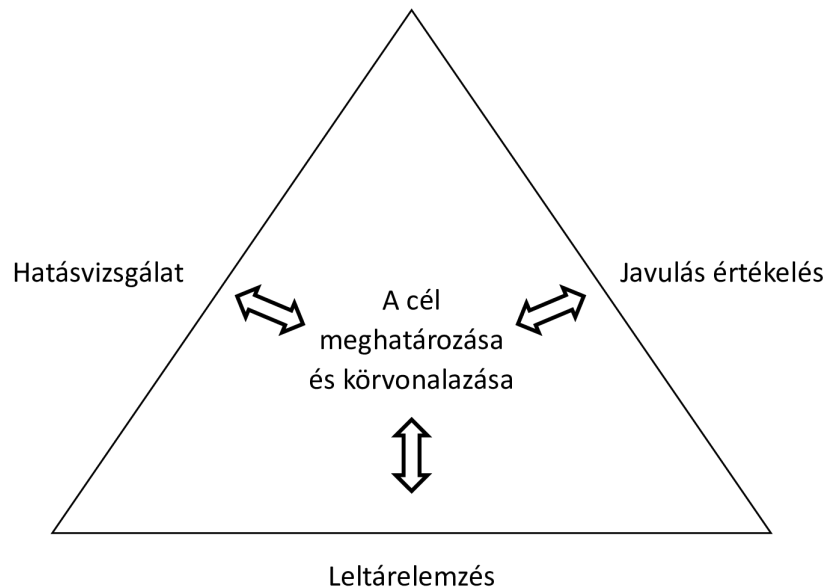
Az éghajlatváltozás a környezettudományok egyik legjelentősebb problémája. Az ellene folytatott küzdelem több évtizedes múltra tekint vissza. Már a múlt század hetvenes éveiben felmerült az a hipotézis, hogy a CO_2 koncentráció növekedése hatással lehet az éghajlatra, ezen hipotézis beigazolódott, a szén-dioxid kibocsátás a globális felmelegedés és a globális éghajlatváltozás okozója (Baldowska-Witos et al., 2020).

A műanyag hulladék helytelen felhasználásának problémája nemcsak a szárazföldet, hanem a tengereket is érinti. A folyókba és tengerekbe kerülő hulladék túlnyomó többsége a nem megfelelő hulladékkezelés miatt kerül oda. A vízi környezetben előforduló műanyagok veszélye nem csak a lebomlásuk hosszan tartó folyamatában rejlik, hanem mindenekelőtt valós veszélyt jelentenek minden élő szervezetre. A természeti környezet védelme érdekében szükség van a megfelelő környezetbarát hozzáállásra. A fenntartható fejlődés, és a környezetbarát fogyasztás egyre nagyobb népszerűségnek örvend napjainkban. Emiatt egyre több tanulmányt készítenek az ember által kifejlesztett termékek lehetséges hatásairól, mint például a műszaki tárgyak és különösképpen a konkrét gépek és eszközök lehetséges környezetre gyakorolt hatásáról. A környezeti kérdések iránti növekvő érdeklődés miatt szükséges felmérni a technológiai folyamatok hatását, például az általuk okozott környezeti terhek számszerűsítésével. A környezeti terhek számszerűsítésére szolgál az életciklus-elemzés (Baldowska-Witos et al., 2020).

1.1. Az életciklus-elemzés alapjai

Ezen alfejezet alapjául Klöpffer és Grahl (2014) könyve, valamint Klöpffer (1997) cikke szolgált. Az életciklus-elemzés (Life Cycle Assessment - LCA) azon a gondolaton alapszik, hogy az összes környezetre kibocsátott tehernek mértékét felmérjük, ami egy termékhez vagy egy szolgáltatáshoz kapcsolható. A lehetséges környezetre kiterjedő hatásokat az életciklus-elemzés végigvezeti egészen a nyersanyag beszerzésétől, a felhasználáson ke-

resztül a hulladékeltávolításig. Az 1990 és 1993 közötti években a SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) és a SETAC-Europe elősegítette az LCA fejlődését különböző értekezletek megszervezése és lebonyolítása által, melyeknek eredménye a "Gyakorlati kódex" volt, amit 1993-ban tettek közzé. Ezen értekezletek eredménye az úgynevezett "SETAC-háromszög" -el illusztrálható (ld. 1.1. ábra). Ez mutatja azt az alapstruktúrát, amely ma az ISO szabványosítási tevékenységeinek alapját képezi:



1.1. ábra. SETAC-háromszög

Ma az életciklus-elemzés az ISO 14040-es nemzetközi szabványsorozat által meghatározott módszer, ami a termékrendszerek környezeti szempontjainak és hatásainak elemzésére szolgál. Az ISO 14040:2006 nemzetközi szabvány bevezető része standardizálja az életciklus-elemzést és ez alapján az életciklus-elemzés az egyes termékek teljes életciklusa alatt tanulmányozza a környezeti szempontokat, valamint a lehetséges hatásokat a nyersanyagbeszerzéstől a gyártáson, forgalmazáson, felhasználáson és ártalmatlanításon keresztül. Ezt nevezik bölcsőtől a sírig elemzésnek. Ez lesz számomra releváns a későbbiekben, a 4. fejezetben. Létezik még több fajtája az életciklus-elemzésnek, mint például a bölcsőtől a bölcsőig tartó elemzés, ami figyelembe veszi a fentiekén túl a hulladéklerekóban, égetésben vagy újrahasznosításban történő ártalmatlanítást is. Ezekén felül pedig még létezik bölcsőtől a kapuig (nyersanyag kitermelése és a gyártási folyamat), valamint kaputól a kapuig (csak a gyártási folyamat) kiterjedő elemzés is. Az ISO által meghatározott struktúra a SETAC által meghatározott struktúrától csak az utolsó pontban tér el, amit az ISO 14040 szabványban "Értelmezésnek" hívnak. Az ISO szabvány szerint a "Javulás értékelés" egy a sok tevékenység közül, amit az életciklus-elemzés követhet, de a tényleges elemzésnek nem része.

Minden életciklus-elemzésben központi jelentőséggel bír az első pont, ami a "Cél meg-

határozása és körvonalazása". Nem csak egy adott vizsgálat elvégzésének okát, célját, mélységét, a rendszert vagy a rendszereket határozza meg, amelyeket elemzünk (azaz a szabványokat), hanem a következő, még inkább specifikus szempontokat:

1. Rendszerhatár (technikai, földrajzi és időbeli)
2. Funkcionális egység (referenciaegységként szolgál)
3. Szabályok és feltételezések (például adatok, a melléktermékek és a nyílt körfolyamatú újrafeldolgozás felosztási szabályai, aggregálás)
4. Hatásvizsgálat és értékelés típusa
5. Vizsgálat által érintett csoport(ok)
6. Szakértői értékelés

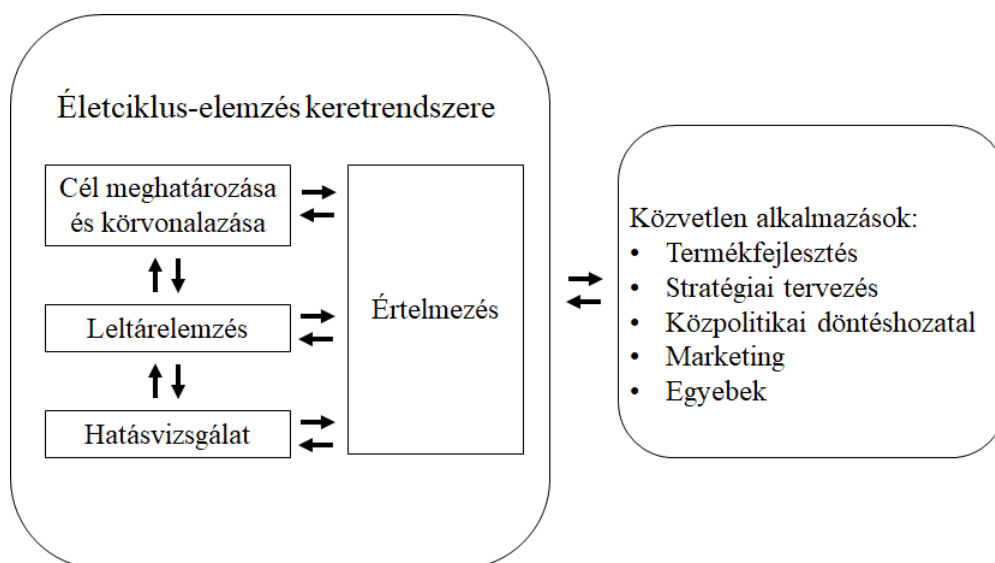
A leltárelemzés a központi, legjobban kidolgozott és a legnagyobb tudományos alappal rendelkező része az életciklus-elemzésnek. A leltározás lényege az, hogy minden olyan tevékenységet, amely kapcsolódik egy funkcionális egység előállításához, elemezni kell a következő összetevők tekintetében: nyersanyag kitermelés, köztes termékek, maga a termék vagy szolgáltatás, a felhasználás és végül a hulladék eltávolítása. Az energia, a szállítás és a segédtermékek akkor számítanak bele, ha felhasználásuk bemenetként történik. A kimenetek pedig a melléktermékek, a levegőbe, vízbe, talajba történő kibocsátás, a hulladékhő és a szilárd hulladék. Az ehhez szükséges felhasznált adatok két kategóriába sorolhatóak. Az egyik kategória a termelésre, elosztásra, hulladékelszállításra stb. vonatkozó specifikus adatok, a másik pedig az általános adatok (energiatermelés, szállítás, árucikkek).

A leltárelemzés (LCI) eredménye a leltártáblázat, amely az összes bemenet és kimenet listája funkcionális egységként. A hatásvizsgálat (LCIA) a következő részekből épül fel:

1. Osztályozás
2. Jellemzés
3. Normalizálás
4. Súlyozás (értékelés)

Az osztályozás folyamata során a leltártáblázatban szereplő bemeneti és kimeneti értékeket hozzárendeljük a környezetre kiterjedő hatáskategóriákhoz, úgymint például a széndioxidot, metánt, dinitrogén-oxidot a globális felmelegedéshez, vagy a savakat és savképző gázokat (pl. NH_3) a savasodáshoz. A jellemzési folyamat során az osztályozott adatok

számszerűsítésre kerülnek, amely a környezetre kiterjedő hatást adja meg. A normalizálás lépése megadja, hogy az egyes termékek közül a funkcionális egységhez viszonyítva (például egy főre eső, adott évre és régióra vonatkozóan) melyiknek nagyobb a környezeti kárhatása. A normalizáció a környezetre kiterjedő hatások relatív nagyságának jobb megértését segíti. Azonban az egyes hatások relevanciáját nem tükrözi. A súlyozási lépés a hatásvizsgálat szubjektív lépése és akkor válik szükségessé, ha a korábbi eredmények nem egyértelműek. Ha az összehasonlító LCA esetében például néhány hatáskategória az egyik rendszer esetében jobbnak bizonyul, a másik pedig a másik rendszer esetében, akkor azt szinte lehetetlen objektíven eldönteni, hogy melyik rendszer a jobb. A súlyozási lépésben például a normalizált adatokat szorozzák meg súlyozási tényezőkkel, amik tükrözik az egyes környezeti kárhatások jelentőségét. Az ISO szabványosításban a súlyozás nem szerepel kötelező lépésként, amiként a normalizálás sem. És végül az értelmezés, az LCA utolsó pontjának célja a teljes LCA kritikai értékelése. Itt nem csak a matematikai eszközökkel végzett hatásvizsgálat kerül figyelembe vételre. Ez a pont összekapcsolja az LCA-t olyan lehetséges alkalmazásokkal, ami nem része az elemzésnek (pl. termékfejlesztés, stratégiai tervezés, marketing).



1.2. ábra. Életciklus-elemzés

1.2. Esettanulmány

Jelenleg a PET a fő csomagolóanyag a világon, amelyet az élelmiszeriparban különböző típusú üvegek, tartályok, palackok és dobozok előállítására használnak. A legtöbb műanyag biológiailag nem bomlik le, és ezért az előállított polimerek többsége évtizedekig, évszázadokig, sőt valószínűleg évezredekig is megmarad (Bałdowska-Witos et al., 2020).

Ezért is fontos, hogy nagy hangsúlyt fektessünk mindennapjainkban egyéni szinten is a tudatos vásárlásra és válasszuk a lehető legkörnyezetbarátabb opciót környezetünk védelme érdekében. Ezen fejezet további részében Madival et al. (2009) tanulmánya alapján mutatom be egyes polimer anyagokból készült hőformázott gyümölcsös dobozok előállításának folyamatát és környezetre gyakorolt hatásukat. Ezek olyan dobozok, melyek az eper, valamint a különféle bogyós gyümölcsök csomagolására szolgálnak. A tanulmány ezen dobozok életciklus-elemzéséről számol be. A három polimer anyag, melyekből a dobozok készülnek a polietilén-tereftalát (PET), a polisztirol (PS), valamint a politejsav (PLA) .

A csomagolóiparban számos elemzés készült a különböző felhasználások során alkalmazott csomagolások összehasonlítására, az élelmiszerek csomagolására vonatkozó egyike ezeknek. Az élelmiszercsomagolás nagy jelentőséggel bír, hiszen a csomagolás szerepe, hogy az élelmiszereket megóvja az esetleges szennyeződésektől és külső hatásoktól valamint tartósítsa azokat. A csomagolás esztétikája is fontos, hogy a termék amint a polcra kerül, minél vonzóbb legyen a vevő számára. A csomagolási rendszer szereplői a nyersanyaggyártók, a feldolgozók és a csomagolóanyagok gyártói, valamint a felhasználók vagy fogyasztók. Ide tartozik továbbá az elosztóhálózat is, a nagykereskedőktől a kiskereskedőig és a kiskereskedőktől a fogyasztókig. A csomagolás szerves részét képezi az egyes termékeknek, környezetre kiható káros hatását, amelyeket a gyártástól a hulladékképződésig okoz, nem lehet figyelmen kívül hagyni. Ezen megfigyelésnek a tudatosítása hozta létre a fenntartható csomagolási rendszerek fogalmát. A csomagolás fenntarthatóságának három elemi összetevője van: társadalmi méltányosság, ökológiai lábnyom és gazdasági érték. Az utóbbi évtizedekben az LCA-vizsgálatok megpróbálták számszerűsíteni a fenntartható csomagolási rendszerek ökológiai lábnyomát. Az ilyen tanulmányok a különböző csomagolóanyagok környezeti hatásának felmérésére szolgálnak, mint például a papír, az üveg, a műanyag, a fa. Mivel a közvélemény egyre inkább tudatában van annak, hogy szükség van a tiszta környezetre, a tendencia az, hogy a bioalapú csomagolóanyagok váltsák fel a hagyományos, kőolajalapú csomagolóanyagokat. Különösen a biopolimerek teremtettek egy teljesen új piacot a élelmiszertermékek csomagolására. Ezek kívánatosabbak, mint a hagyományos polimerek, mert környezetkímélőnek tekinthetők. Kedvezőbb anyagok azok, amik biológiailag lebomlóak lehetnek és megújuló erőforrásokból származnak. A bioalapú termékek és a biopolimerek LCA-ja csökkentett hatásokat és kedvezőbb eredményeket mutat az olyan környezeti terhelések tekintetében, mint a üvegházhatású gázok kibocsátása és az energiafelhasználás, a szénhidrogén-alapú polimerekéhez képest. A politejsav (PLA) az egyik bioalapú polimer, amely kukoricaalapú keményítőből származik, ez az élelmiszer-csomagoló iparban egyre nagyobb figyelemnek örvend. A PLA fokozatosan teremtett magának piacot a frissen vágott termékek, például saláták csomagolásának

körében, ezzel helyettesítve a hagyományos kőolaj alapú polimereket, mint ami például a polietilén-tereftalát (PET) és a polisztirol (PS). Néhány tanulmány állítása szerint a PLA fizikai és mechanikai tulajdonságai a PET, valamint a PS anyagokhoz hasonló. Korábbi tanulmányok szerint, melyek összehasonlították a PLA, PET és PS gyantákat azt mutatták, hogy az első generációs PLA polimerek fosszilis energiaigénye hasonló mértékű volt, mint a kőolajból készült társaiké. Azonban frissebb LCA tanulmányok már azt mutatták, hogy a PLA gyanta fosszilis energiaigénye majdnem tízszer alacsonyabb, mint a kőolajalapú polimergyantáké. Az ilyen típusú elemzések készítése jellemző a polimergyantákat gyártó vállalatokra, amely elengedhetetlen a fenntartható és felelős vállalati működtetéshez.

1.2.1. Az elemzés módszertani jellemzői

A bioalapú polimer gyanták és termékek életciklus-elemzése a múltban kedvező eredményeket mutattak a környezeti hatások és az energiafelhasználás tekintetében a kőolajalapú termékekhez képest. Azonban ezen hatások kiszámítása mindig a rendszertől és a rendszerhatároktól függ, amelyeket a vizsgálat során figyelembe kell vennünk. Ezen elemzés figyelembe veszi az összes ráfordítást, például a műtrágyákat, növényvédő szereket, gyomirtó szereket és a vetőmagot, ami a kukorica termesztéséhez és betakarításához járul hozzá a PLA anyag előállításánál. A PET és PS anyag esetében pedig az elemzés figyelembe veszi a nyersolaj (feldolgozatlan kőolaj) kitermelésétől kezdve a nyersolaj hőbontási folyamata során képződő anyagokat (pl. sztirol, etilén-glikol, tereftálsav). A kiválasztott hatáskategóriák a globális felmelegedés, vízi savasodás, vízi ökototoxicitás, ózonréteg elvékonyodása, nem megújuló energia, vízi eutrofizáció, légúti szerves anyagok, földhasználat és légúti szerves anyagok. A tanulmány földrajzi kiterjedése Európa, Észak-Amerika és a Közel-Kelet területéről származó adatokat tükrözi. A környezetre gyakorolt fő káros hatások a gyantagyártás, valamint a gyanta és a dobozok szállítási szakasza miatt keletkeztek.

A PET, PLA, valamint a PS anyagból készült hőformázott, gyümölcsös dobozok környezeti hatásának összehasonlítása érdekében szükség van többek között a funkcionális egység meghatározására. A funkcionális egység 1000 doboz (egy-egy doboz kapacitása 0,4536 kg eper). A tanulmány az ISO és az ASTM International nemzetközi szabványait használja fel a vizsgálatok szisztematikus megközelítéséhez és lefolytatásához. Az ISO 14040-es (ISO 14040, ISO 14044, ISO 14049) szabványcsalád ajánlásai szerint határozták meg a tanulmány kereteit, a probléma célját és hatókörét, a leltárelemzést, az LCA-t és az értelmezést, a fejlesztő és megkülönböztető funkciókat összehasonlítható rendszerek esetén, az egység bemeneteit és kimeneteit, a folyamatokat és a rendszerhatárokat. Az ASTM 7075 szabványt az amerikai szabványoknak való megfelelés érdekében használták. A PRe[®]

tanácsadó cég SimaProTM szoftverét használták elsődleges forrásként az életciklus leltár készítéséhez. A szoftver több, mint 2500, a csomagolóiparban jellemző folyamatról tartalmaz életciklus leltárelemzéshez szükséges adatokat. Az adatok időben 1999 és 2006 közé tehetők.

1.2.2. A gyártás folyamata

A dobozok életciklusa a szénhidrogén alapú polimerek (PET és a PS) esetén a nyersolaj kitermelésével és a kitermelt olaj hőbontásával kezdődik. Ezek a lépések mindkét polimer esetén közösek. A PET esetében a nyersolaj kitermelését követően, a gyantagyártást is beleértve következik a kapcsolódó gázok átalakítása etilénné, a nafta pedig benzollá és etilén-oxiddá alakul, míg az etilén-oxid etilén-glikollá, végül pedig PET-té. A PS esetében a kőolaj hőbontási folyamata után a kőolaj etilénné alakul át, amely aztán benzollal reagáltatva etil-benzollá alakul, majd sztírol, végül pedig polisztirolgyantává polimerizálódik. A PLA esetében, az életciklus a kukorica termesztésével és betakarításával kezdődik. Az így nyert dextróz tejsavvá alakul át, amely a laktidtermelés révén PLA anyaggá polimerizálódik. A három polimer gyantája ezután egy tartály/dobozgyártóhoz kerül. A gyantát lemezekké extrudálják. Ezután ezeket a lemezeket hőformázás segítségével átalakítják dobozokká. A háromféle anyagból készült dobozokat a Driscoll Strawberry Associates (DSA)-ba szállítják, ami egy epertermelő és szállító cég, aki betakarítja a gyümölcsöt és megtölti a dobozokat eperrel. A megtöltött dobozokat a piacra szállítják, ahol a fogyasztók megvásárolják őket. Az eperfogyasztás után a dobozok elérkeznek az életciklusuk végéhez, ahol hulladéklerakóba vagy újrahasznosító központba kerülnek, illetve elégetik azokat.

A PET és PS gyanták gyártására vonatkozó LCI-hez (leltárelemzéshez) szükséges adatokat a kereskedelmi forgalomban kapható SimaProTM szoftverrel gyűjtötték össze. A PET és PS gyanta gyártására vonatkozó adatokat az Ecoinvent adatbázisából vették, amely a SimaProTM szoftverrel együtt elérhető. A gyanta gyártására vonatkozó adatok a bőlcsőtől a kapuig minden folyamatot figyelembe vettek, beleértve a nyersolaj kitermelését és előállítását is. Az Ecoinvent adatbázis az Association of Plastics (PlasticsEurope) öko-fájljaiban megtalálható adatokat használja és a gyártást több európai gyártóhelyen reprezentálja. A nyersolaj szállítási szakasza az európai gyárakba hasonló az amerikai gyárakéhoz. Az amerikai vállalatokra vonatkozó kibocsátási adatok nem voltak elérhetők. A PLA gyantagyártásra vonatkozó adatok nem voltak elérhetők a szoftver adatázisaiban, mivel kevés a kereskedelmi PLA-t gyártó vállalat. Az Egyesült Államokban a PLA-t a NatureWorks gyártja (nebraskai Blairben található). A PLA-ra vonatkozó készletadatok a szakirodalomból kerültek átvételre. Az adatok a kukoricatermesztésre, a műtrágyák termelésére, gyomirtók, rovarirtók, villamos energia valamint a felhasznált üzemanyag előállításának

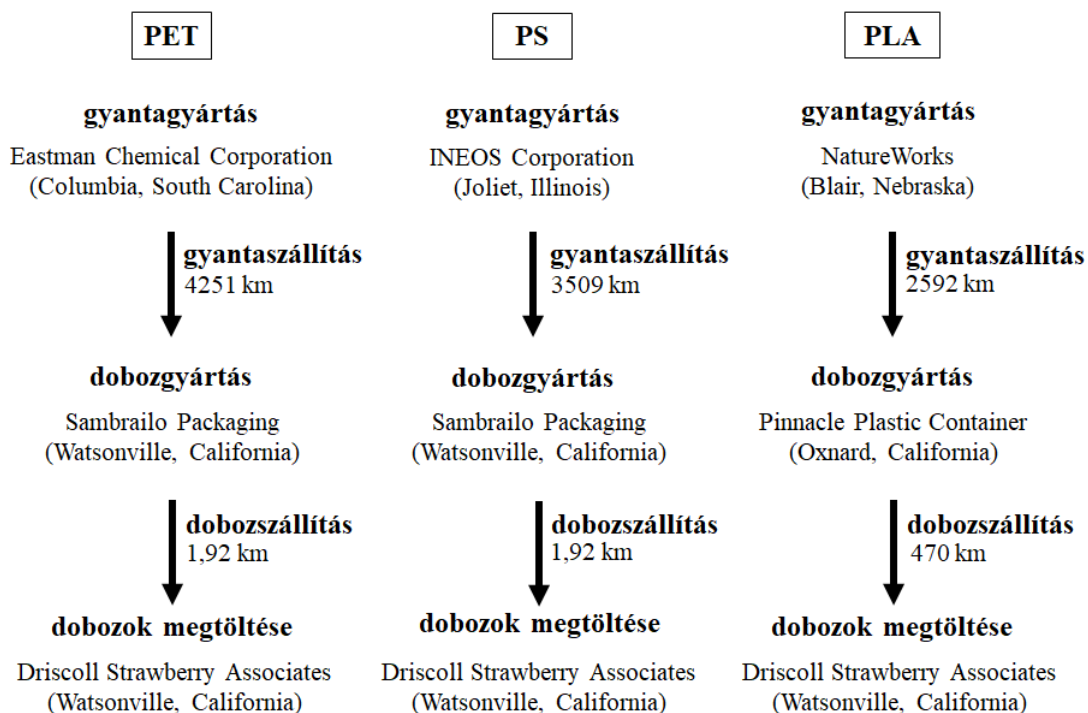
károsanyag kibocsátására vonatkoznak a betakarítás és a kukoricatermesztés során. Tartalmazza továbbá az adatokat a kukorica kukoricaörlő malomba történő szállításáról. A traktorok és a kukorica betakarítása során használt egyéb eszközök használata a kukorica betakarítása során a károsanyag kibocsátás tekintetében elhanyagolhatónak bizonyult. Ezen felül még tartalmazza az adatokat a vegyi anyagokról, enzimekről, villamos energiáról, valamint a hűtéshez és feldolgozáshoz használt víz előállításáról. A megújuló energiára vonatkozó tanúsítványokat (REC) megvásárolta a NatureWorks, hogy ellensúlyozza a külsőleg termelt villamosenergiát, valamint az üzemeltetési anyagok előállítását és szállítását.

A háromféle gyanta extrudálására és hőformázására vonatkozóan konkrét adatok nem állnak rendelkezésre, így a tanulmány ezen műveletekre vonatkozóan egy műanyag fólia extrudálásával és hőformázásával kapcsolatos kibocsátásokat tartalmaz. Ezen készletadatok az Ecoinvent adatbázisából származnak. Az adatok reprezentatívak a különböző európai vállalatokra, azonban a hőformázási folyamat során felhasznált energiafogyasztást külön-külön számították ki a fajhő, a hőmérséklet-különbség és az olvadáshő alapján. A töltési művelet, amely magában foglalja a dobozok megtöltését eperrel, valamint a megtöltött dobozok raktározását és elosztását a nagy- és kiskereskedőkön keresztül, a feltételezések szerint hasonló terheket eredményez, és mindhárom tárolóedény esetében kizárták őket a vizsgálatból. A tanulmány 19*16,5*7 cm-s dobozokkal számol a PS valamint a PLA esetén. Ezen dobozok súlya 24,2 és 29,6 g volt. Mivel nem volt ezekkel azonos méretű PET doboz, ami rendelkezésre állt, a PET doboz súlyát a fajsúlya alapján számították ki, $4,567210^{-4}$ m lemezzvastagságot feltételezve. A PS és PLA anyagokból készült lemezek vastagsága azonos volt. Feltételezték, hogy ugyanazt az öntőformát használták minden doboz esetében. Extrudálás előtt a PET- és PLA-gyantákat általában először 4 órán keresztül 140 C°-on, majd 4 órán keresztül 60 C°-on szárítják. Az erre a folyamatra vonatkozó megbízható adatok hiánya és a szárítási folyamathoz használt berendezések eltérő típusa miatt ezt a lépést nem vették figyelembe az LCI-ben.

1.2.3. A szállítás folyamata

A gyantaszállítótól teherautóval a gyantagyárig terjedő távolságok mértéke a PS és PET esetében nem álltak rendelkezésre a bizalmas vállalati információk miatt. A PET gyantát feltételezhetően az Eastman Chemical Corporation (Columbia, South Carolina) szállította, míg a PS gyantát az INEOS Corporation (Joliet, Illinois) biztosította a Sambrailo Packaging (Watsonville, Kalifornia) számára. Ezen távolságok 4251 km és 3509 km voltak teherautóval (ezen adatokat a MapQuest segítségével határozták meg). NatureWorks (Blair, Nebraska), mint azt korábban említettem az egyetlen PLA gyantaszállító az Egyesült Államokban. A távolság a NatureWorks és a PLA doboz szállítója, a Pinnacle Plastic Container (Oxnard, Kalifornia) közötti távolságot úgy találták, hogy 2592

km teherautóval. Az dobozkészítő cég és az epertermelő, valamint szállító cég közötti távolságokat a Driscoll Strawberry Associates epertermelő és helyi beszállítók alapján számították ki. A DSA a PET és PS dobozokat a szintén Watsonville-ben található Sambrailo Packaging cégtől szerzi be. A köztük lévő távolság 1,92 km teherautóval. A DSA és a Pinnacle Plastic Container közötti távolságra 470 km-t számoltak ki teherautóval. A szállítási eszközökre vonatkozó adatokat az Ecoinvent adatbázisából szerezték be. Az 1.3. ábrán szemléltetném az egyes polimerek életciklusának szakaszait és az egyes folyamatokhoz tartozó helyszíneit, valamint megtett útjukat km-ben.



1.3. ábra. Polimerek életútja

1.2.4. Hatásvizsgálat

Különböző LCA hatásvizsgálati módszerek állnak rendelkezésre a SimaProTM szoftverrel. Az Eco-Indicator módszer az a Ecoinvent adatbázisban elérhető, az egyik legfejlettebb hatásvizsgálati módszer. A tanulmányban az IMPACT 2002+ módszert választották, amely az IMPACT 2002, az Eco-Indicator 99, a CML és az IPCC kombinációja. A kiválasztott hatáskategóriák a globális felmelegedés, vízi savasodás, vízi ökotoxicitás, ózonréteg elvékonyodása, nem megújuló energia, vízi eutrofizáció, légúti szerves anyagok, földhasználat és légúti szerves anyagok. Jelen dolgozat keretein belül a CO₂ kibocsátásra vonatkozó adatokat elemzem, mert a környezetre gyakorolt káros hatások közül általában ez a legjelentősebb. A CO₂ az osztályozási lépésben a leltárelemzés során a globális felmelegedéshez kerül hozzárendelésre.

Az alábbi 1.1. táblázatban feltüntettem a CO₂ kibocsátásra vonatkozó hatásvizsgálati eredményeket Madival et al. (2009) tanulmánya alapján. Az eredmények 1000 db PET, PLA, valamint PS doboz IMPACT 2002+ V2.02 szerinti, bölcsőtől sárig tartó elemzésére vonatkoznak. A szállítási adatok egy 16 tonnás teherautóra értendők. A CO₂ kibocsátás adatai kg-ban vannak megadva.

folyamat elnevezése	<i>PET</i>	<i>PLA</i>	<i>PS</i>
gyantagyártás	65	60	70
gyantaszállítás	50,2	28,7	31,7
dobozgyártás	44	40	33
dobozszállítás	39,3	41,8	30,1
összesen:	198,5	170,5	164,8

1.1. táblázat. Az egyes polimerekre vonatkozó CO₂ kibocsátás folyamatokként

A gyantagyártás folyamata járult hozzá a PET, PS és PLA dobozok esetében a legnagyobb CO₂ kibocsátáshoz, míg a gyantaszállítás folyamata a legkevesebbel. A dobozgyártás során a CO₂ kibocsátási értékek a PS esetében a legalacsonyabbak, ezt követi a PLA és a PET. A szállítási távolság a PET gyanta beszállítója és a feldolgozója (4251 km) között a legnagyobb, ami felelős a magas CO₂ értékekért a PET gyanta szállítási szakaszában. Összességében a PLA és a PET esetében a gyantagyártási szakasz körülbelül 34%-kal járult hozzá a teljes CO₂ kibocsátáshoz, a PS esetében pedig a gyantagyártás szakasza körülbelül 42%-kal.

Ezen adatok segítségével fogom a későbbiekben bemutatni a megoldást a problémára, hogy hogyan lehet felosztani az ellátási lánc szereplői között egy termék életciklus-elemzése során megállapított teljes károsanyag-kibocsátást. A megoldás módszertana a kooperatív játékelmélet lesz. Az ehhez szükséges játékelméleti alapfogalmakat a következő fejezetben ismertetem.

2. fejezet

Játékelméleti bevezető

A következő fejezetben ismertetem a kooperatív játékelmélet fontosabb fogalmait, definícióit, jelöléseit. Az előbbieket meghatározásához Peleg és Sudhölter (2007) könyvét, valamint Solymosi (2007) jegyzetét vettem alapul.

A kooperatív játékelmélet eszköztárának segítségével olyan gazdasági szituációkat tudunk elemezni és modellezni, melyben a felek együttműködéséből létrejövő eredményeken van a hangsúly. Az alapvető kérdés ilyen helyzetekben, hogy milyen kooperációs csoportok, azaz koalíciók jönnek létre, valamint, hogy az együttműködés eredményeképpen létrejövő hasznot hogyan tudjuk elosztani a résztvevő felek között.

2.1. Koalíciós játékok

Ha egy játék koalíciós formában van megadva, azt kooperatívnak hívjuk, amennyiben a játékban kikényszeríthető szerződések vannak. Azaz a játékosoknak adott a lehetőségük arra, hogy a választott stratégiáról vagy a kifizetés elosztásáról megállapodásokat, valamint szerződéseket kössenek, még abban az esetben is, ha ezek a megállapodások, valamint szerződések az adott játék szabályaiban nincsenek előírva. Egy megállapodást általában megkötöttnek tekintünk, ha annak megsértése olyan (pl. pénzbeli) büntetéssel járna, hogy az visszatartja a játékost a megszegéstől.

A kooperatív játékoknak két fajtája van, az egyik az, amikor az egyéni hasznosságok nem átruházhatóak. Ezt NTU-játéknak (nontransferable utility game) nevezzük. Én viszont csak a másik fajtával fogok bővebben foglalkozni. Ezt átruházható hasznosságú játéknak nevezzük (transferable utility game) és TU-játéknak rövidítjük. Ez egy olyan kooperatív döntési helyzet modellje, amely esetén feltesszük, hogy a játékosok egyéni preferenciái összemérhetőek egy közvetítő eszköz (pl. pénz) segítségével. Így egy adott koalíció esetén a szereplők a koalíció által elért kifizetést szabadon oszthatják el maguk között.

A játékosok halmaza legyen N , ami egy nemüres, véges halmaz. Elemeit megszámoz-

zuk, azaz: $N = 1, \dots, n$. Egy S koalíció pedig legyen az N halmaz egy tetszőleges részhalmaza. Az N jelöli a nagykoalíciót, ami az összes játékost magába foglalja, az $\emptyset$ pedig az üres koalíciót. A játék definiálásához a szereplők minden lehetséges kooperációja esetén meg kell adni a kimenetek halmazát.

2.1. Definíció. Egy átruházható hasznosságú kooperatív játék egy (N, v) pár, ahol N a játékosok halmazát jelöli, v pedig egy olyan függvény, amely az N minden S részhalmazához hozzárendel egy $v(S)$ valós számot. Minden egyes esetben feltesszük, hogy $v(\emptyset) = 0$.

Az (N, v) kooperatív játékot röviden v -vel szoktuk jelölni. Amennyiben az S koalíció létrejön egy adott v játékban, akkor a koalíció tagja megkapják a $v(S)$ értéket. Ezt a számot nevezzük a koalíció értékének. A $v(S)$ értékét egy adott S koalíción belül tetszőlegesen szétoszthatja a tagjai között.

2.2. Definíció. Egy (N, v) játék akkor superadditív, amennyiben

$$v(S \cup T) \geq v(S) + v(T)$$

fennáll minden $S, T \subseteq N$ és $S \cap T = \emptyset$ esetén.

2.3. Definíció. Egy (N, v) játék akkor szubadditív, amennyiben

$$v(S \cup T) \leq v(S) + v(T)$$

fennáll minden $S, T \subseteq N$ és $S \cap T = \emptyset$ esetén.

2.2. Kifizetések és a mag

Nem csak azzal kell foglalkoznunk, hogy létre jön-e a koalíció, hanem fontos azt is figyelembe vennünk, hogy a társulás során a szereplők megegyezésre jussanak azzal kapcsolatban, hogy az így létrejövő összhasznót mindenki számára elfogadhatóan tudják szétosztani. Ez nem minden játéktípus esetén van így, de a superadditív játékokra mindig teljesül.

Tegyük fel, hogy a nagykoalíció létrejön, tehát minden szereplő számára a legelőnyösebb az lesz, ha egyetlen koalícióba szerveződnek. A kérdés az, hogy az elért összhasznót, hogyan lehet mindenki számára kielégítően szétosztani.

2.4. Definíció. Az (N, v) játékban a $v(N)$ érték elosztása során létrejövő $x_i \in \mathbb{R}$ értéket az $i \in N$ játékos kifizetésének hívjuk.

A v koalíciós függvény segítségével meghatározott kooperatív játék egy lehetséges kimenetelét a játékosok kifizetéseit tartalmazó $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^N$ kifizetésvektorral írjuk le.

2.5. Definíció. Egy (N, v) játékban az $x = (x_1, \dots, x_n)$ kifizetésvektor

- elérhető lesz az S koalíciónak, amennyiben $\sum_{i \in S} x_i \leq v(S)$,
- elfogadható lesz az S koalíciónak, amennyiben $\sum_{i \in S} x_i \geq v(S)$,
- előnyösebb lesz az S koalíció számára, az $y = (y_1, \dots, y_n)$ kifizetésvektorral szemben, amennyiben $\forall i \in S$ esetén $x_i > y_i$,

Egy TU-játékban egy koalíció értékén általában azt a legnagyobb pénzmennyiséget értjük, amit a koalíció tagjai együttműködve mindenképpen meg tudnak szerezni, függetlenül a többi játékos cselekedétől. Ezek a definíciók, az *elérhető*, *elfogadható* valamint az *előnyösebb* fogalmak azokat az alapvető elvárásokat jelentik, hogy egy koalíción belül a $v(S)$ érték elosztása során, csak azok a kifizetések megvalósíthatóak, amelyek nem haladják meg a koalíció által elért összhasznót. Mivel minden játékos célja, hogy egyéni hasznát maximalizálja, ezért az előnyösebb kifizetést fogja választani.

A mag a kooperatív játékelmélet egy kulcsfontosságú fogalma. Segítségével meg tudhatjuk, hogy egy játékban mely elosztások esetén fogadják el a koalíció tagjai, azt megoldásnak.

2.6. Definíció. Az (N, v) játékban az $x = (x_1, \dots, x_n)$ kifizetésvektor

- szétosztás, amennyiben $\sum_{i \in N} x_i = v(N)$, azaz az N koalíciónak elérhető és elfogadható,
- elosztás, amennyiben $\sum_{i \in N} x_i = v(N)$ és $x_i \geq v(\{i\}) \forall i \in N$ -re, vagyis olyan szétosztás, ami az összes egyszemélyes koalíció (azaz minden játékos) számára elfogadható,
- mag-elosztás, amennyiben $\sum_{i \in N} x_i = v(N)$ és $\sum_{i \in S} x_i \geq v(S) \forall S \in N$ esetén, azaz olyan szétosztás, ami az összes koalíciónak elfogadható.

A mag-elosztások halmazát $\text{Core}(v)$ -vel jelöljük. Ezt a halmazt szoktuk a kooperatív játék *magjának* nevezni. A mag azt fejezi ki tehát, hogy melyek az elosztások, melyet a koalíció tagjai "igazságosnak" éreznek ahhoz, hogy elfogadják.

2.3. A Shapley-érték

A következőekben a *Shapley-értékről* lesz szó. (Shapley (1953)) Shapley arra adott választ, hogy egy játékban szereplő számára, mi az értéke annak, ha részt vesz a játékban, vagyis egy valós számmal határozza meg azt (mérőszámmal), hogy egy játékosnak mekkora az értéke a játékon belül. Először rögzítünk néhány igen természetes axiómát, melyek már meghatározzák a Shapley-féle megoldást.

Legyen N a játékosok egy rögzített, nemüres, véges halmaza és jelöljük $\mathcal{G}^N$ -nel az N játékoshalmazzal rendelkező TU-játékok halmazát. *Megoldásnak* egy olyan $\psi : \mathcal{G}^N \rightarrow \mathbb{R}^N$ függvényt hívunk, amely egy tetszőleges $v \in \mathcal{G}^N$ játékhoz hozzárendeli a $\psi(v) = (\psi_i(v))_{i \in N} \in \mathbb{R}^N$ vektort. Azaz megadja az egyes játékosok értékét egy tetszőleges $v \in \mathcal{G}^N$ játékban.

Legyen $\pi : N \rightarrow \{1, \dots, n\}$ a játékosok egy lehetséges sorbarendezeése, Π_N pedig legyen a játékosok összes lehetséges sorbarendezeéseinek a halmaza.

2.7. Definíció. Azt mondhatjuk, hogy a $\psi : \mathcal{G}^N \rightarrow \mathbb{R}^N$ megoldásra igazak a következő tulajdonságok ha a megadott feltételek teljesülnek:

- hatékony (Pareto-optimális), amennyiben $\sum_{i \in N} \psi_i(v) = v(N)$,
- egyénileg elfogadható, amennyiben $\psi_i(v) \geq v(\{i\})$ minden $i \in N$ -re,
- szimmetrikus, amennyiben $\forall i, j \in N, \forall S \subseteq N \setminus \{i, j\}$ és $v(S \cup \{i\}) = v(S \cup \{j\})$ esetén $\psi_i(v) = \psi_j(v)$,
- sallangmentes, amennyiben $\psi_i(v) = v(\{i\})$, ha $i \in N$ sallang játékos v -ben, vagyis $v(S \cup i) - v(S) = v(\{i\})$ minden $S \subseteq N \setminus i$ -re,
- kovariáns, amennyiben $\psi(\alpha v + \beta) = \alpha \psi(v) + \beta$ minden $\alpha > 0$ és $\beta \in \mathbb{R}^N$ esetén (ahol β a b vektor által generált additív játék),
- additív, amennyiben $\psi(v + w) = \psi(v) + \psi(w)$ minden $v, w \in \mathcal{G}^N$ -re $((v + w)(S) := v(S) + w(S)$ értelmezéssel minden $S \subseteq N$ -re),
- homogén, amennyiben $\psi(\alpha v) = \alpha \psi(v)$ minden $\alpha \in \mathbb{R}$ -re $((\alpha v)(S) := \alpha v(S)$ értelmezéssel minden $S \subseteq N$ esetén),

ahol az előbbi feltételek minden $v, w \in \mathcal{G}^N$ -re fennállnak az összes tulajdonság esetén.

A hatékonyság előírja, hogy elosztást kapjunk. Az egyéni elfogadhatóság annak a reprezentációja, hogy az összes játékosnak akkora az értéke legalább, amekkora az adott játékosból álló egyszemélyes koalíció. A szimmetria azért felel, hogy egy játékos kifizetése ne a nevétől függjön, hanem a játékban betöltött szerepétől. Azaz, hogy azonos szerepet betöltött játékosok azonos kifizetésben részesüljenek. A sallangmentesség azt jelenti, hogy egy játékos, ha egy adott koalícióhoz csatlakozik semleges értékváltozást idéz elő (azaz se többet se kevesebbet), akkor pontosan annyi kifizetésben részesüljön, mint amennyi a konstans hozzájárulása. A kovariancia jelentése, hogy amennyiben skála-módosítás történik, azt az értékelés megfelelően követni tudja. Az utolsó két tulajdonság megkövetelhetősége nem ennyire egyértelmű, de az additivitás és a homogenitás együttes teljesülése jóval erősebb mint a kovariancia.

Shapley (1953) megoldásának definíciója a következő:

2.8. Definíció. Egy tetszőleges (N, v) játékban az $i \in N$ játékos Shapley-értéke a

$$\varphi_i(v) = \sum_{S \subseteq N \setminus i} \frac{|S|!(|N \setminus S| - 1)!}{|N|!} (v(S \cup i) - v(S))$$

szám, a játék Shapley-megoldása pedig:

$$\phi(v) = (\varphi_i(v))_{i \in N} \in \mathbb{R}^N.$$

2.9. Állítás. A Shapley-értékre azon tulajdonságok teljesülnek, hogy hatékony, szuperadditív játékban egyénileg elfogadható, az elosztás nem feltétlenül magbéli, sallangmentes, szimmetrikus, additív, homogén és a sallangmentesség következtében kovariáns is.

2.10. Tétel. (Shapley (1953)) Egy tetszőleges $v \in \mathcal{G}^N$ játékban a $\psi = \phi = (\varphi_i)_{i \in N}$, tehát a Shapley-megoldás lesz az egyetlen hatékony, sallangmentes, szimmetrikus és additív $\mathcal{G}^N \rightarrow \mathbb{R}^N$ függvény.

2.4. Konvex és konkáv játékok

Jelen részben tekintsük át a konvex játékokra vonatkozóan, hogy mit mondhatunk el azok magjáról, valamint Shapley-értékéről. Néhány új fogalom bevezetésének segítségével nézzük meg melyek a konvex játékokra vonatkozó legfontosabb tételeket.

2.11. Definíció. Egy adott (N, v) játék akkor konvex, amennyiben minden $S, T \subseteq N$ esetén igaz, hogy

$$v(S) + v(T) \leq v(S \cup T) + v(S \cap T).$$

2.12. Definíció. Egy adott (N, v) játék akkor konkáv, amennyiben minden $S, T \subseteq N$ esetén igaz, hogy

$$v(S) + v(T) \geq v(S \cup T) + v(S \cap T),$$

azaz, ha $-v$ konvex.

A $v \in \mathcal{G}^N$ játék duálisa a $\bar{v} \in \mathcal{G}^N$ játék, ahol minden $S \subseteq N$ esetén $\bar{v}(S) = v(N) - v(N \setminus S)$. Egy konvex játéknak a duálisa konkáv lesz és ez a fordított esetben is igaz.

Egy konvex játékra igaz, hogy szuperadditív. A következő ekvivalens karakterizáció ismert: egy (N, v) játék akkor és csak akkor konvex, amennyiben $\forall i \in N$ és $\forall S \subseteq T \subseteq N \setminus \{i\}$ esetén

$$v(S \cup \{i\}) - v(S) \leq v(T \cup \{i\}) - v(T).$$

Azaz egy v játék csak pontosan abban az esetben lesz konvex, amennyiben a játékosoknak egy S koalícióhoz való határhozzájárulásai, tehát a $v'_i(S) = v(S \cup \{i\}) - v(S)$

eredmények a koalíciók tartalmazására nézve monoton növekednek. Konvex játék például a konkáv költségjátékhoz kapcsolódó megtakarítási játék is, amiről még szó lesz a későbbiekben.

2.4.1. Konvex játékok magja és Shapley-értéke

2.13. Definíció. Egy (N, v) játékban a játékosok egy $\pi \in \Pi_N$ sorrendjéhez tartozó egyéni $x_i^\pi(v)$ határhozzájárulásokból álló kifizetésvektort határhozzájárulás-vektornak nevezzük és $x^\pi(v)$ -vel jelöljük.

2.14. Definíció. Egy (N, v) játéknak a Weber-halmazán a határhozzájárulás-vektorok konvex burkát értjük, azaz

$$W(v) = \text{conv}\{x^\pi(v) | \pi \in \Pi_N\}.$$

2.15. Megjegyzés. Tetszőleges (N, v) játékban a Weber-halmaz egy nemüres poliéder.

2.16. Tétel (Weber (1988)). Bármelyik (N, v) játékban $C(v) \subseteq W(v)$.

Tehát a mag minden esetben része a Weber-halmaznak. Konvex játékok esetében pedig ennél több is elmondható. Shapley (1971) megmutatta azt, hogy a fordított irányú tartalmazás is igaz lesz, Ichiishi (1981) pedig azt, hogy a fordított irány csak a konvex játékok esetéről mondható el. A pontos tétel a következő:

2.17. Tétel (Shapley (1971)-Ichiishi (1981)). A következő állítások ekvivalensek:

1. (N, v) konvex játék
2. $x^\pi \in C(v)$, $\forall \pi \in \Pi_N$
3. $C(v) = W(v)$
4. $\text{ext}C(v) = \{x^\pi(v) | \pi \in \Pi_N\}$

Vagyis konvex játékok esetén a Weber-halmaz egy és ugyanaz a maggal, valamint a határhozzájárulás-vektorok a mag extrémális pontjai lesznek.

2.18. Megjegyzés. Belátható általánosan, (ld. pl. Solymosi (2007)), hogy a Shapley-érték felírható a következőképpen:

$$\varphi_i(v) = \frac{1}{|N|!} \sum_{\pi \in \Pi_N} x_i^\pi(v),$$

ahol x^π a játékosok π sorrendjéhez tartozó határhozzájárulás-vektort jelöli. Így tehát azt kapjuk, hogy a Shapley-érték a határhozzájárulás-vektorok súlyozott átlagával egyezik meg, azaz minden esetben a Weber-halmaznak egy belső pontja lesz.

Az alternatív alakból és abból a tényből kifolyólag, hogy konvex játékok esetében a mag egy és ugyanaz a Weber-halmazzal, az következik, hogy egy tetszőleges konvex játékban a Shapley-érték minden esetben egy mag-elosztás. (Shapley, 1955; Gillies, 1959)

2.19. Következmény. *Mivel egy konkáv v játék esetén $-v$ játék konvex, ezért konkáv játékok esetén is igaz, hogy a Shapley-érték magbeli.*

2.4.2. Konkáv játékok egy alkalmazása: költségallokációs játékok

Jelöljük N -el a játékosok halmazát. A költségallokációs feladat egy olyan (N, v_c) játék, ahol N a játékosok halmaza, a v_c koalíciós függvény pedig a feladathoz tartozó költségfüggvény. Példaként tekintsük a következőt: N egy közműnek vagy egy középületnek a lehetséges fogyasztóinak halmaza. Az összes fogyasztót csak egy adott szinten vagy pedig egyáltalán nem szolgálunk ki. Legyen $S \subseteq N$. Ebben az esetben $v_c(S)$ reprezentálja azt a minimális költséget, ami S tagjainak a lehető leghatékonyabb módon történő kiszolgálásához szükséges. Ezt az (N, v_c) játékot *költségjátéknak* hívjuk.

Mivel a költségfüggvény nem egy hagyományos koalíciós függvény, ezért egy (N, v_c) költségjáték csak formálisan tekinthető játéknak, az alkalmazások szemszögéből azonban nem az. De kapcsolatba hozhatók az (N, v) koalíciós játékok közül az úgynevezett *megtakarítási játékokkal*, amelyek esetén $v_s(S) = \sum_{i \in S} v_c(\{i\}) - v_c(S)$ az összes $S \subseteq N$ esetén.

Legyen (N, v_c) egy költségjáték, (N, v_s) pedig legyen a hozzá tartozó megtakarítási játék. Ebben az esetben (N, v_c) *szubadditív*, azaz

$$v_c(S) + v_c(T) \geq v_c(S \cup T),$$

minden $S, T \subseteq N$ és $S \cap T = \emptyset$ esetén, pontosan abban az esetben, amikor (N, v_s) szuperadditív. (N, v_c) *konkáv*, azaz

$$v_c(S) + v_c(T) \geq v_c(S \cup T) + v_c(S \cap T),$$

minden $S, T \subseteq N$ esetén, pontosan abban az esetben, amennyiben (N, v_s) konvex. A költségjátékok az alkalmazásokban jellemzően szubadditívak (ld. Lucas (1981), Young (1985), Tijs és Driessen (1986) értekezéseit a költségjátékokról).

A dolgozat további részeiben tárgyalt modell is a konkáv játékok egy alkalmazásához vezet.

3. fejezet

Ellátási lánc játékok

A következő fejezetben az ellátási láncokról lesz szó, amely alapjául Gopalakrishnan et al. (2020) cikke szolgál. Ellátási láncnak tekintünk egy olyan hálózatot, amelyben különböző cégek (például beszállítók, gyártók, szerelők) együttműködnek egy közös végtermék létrehozásában. A közös termelést modellezzük az ellátási láncban, mint Caro et al. (2013) és Battaglini (2006). A cégek halmazát az ellátási láncban $N = \{1, \dots, n\}$ -nel jelöljük. Az egyes folyamatokat pedig $M = \{1, \dots, m\}$ -mel. Az ellátási láncban nyomon követjük az egyes folyamatok károsanyag-kibocsátását. Jelölje $f = [f_1, \dots, f_m]$ a teljes ellátási lánc karbonlábnyom vektorát, amely az ellátási lánc összes k folyamatához kapcsolódó kibocsátásokból áll. Jelöljük N^k -vel azokat a cégeket, melyek a k folyamatért felelősek. Az f_k károsanyag-kibocsátás mennyisége az egyes folyamatokban befolyásolható azáltal, hogy a cégek részcsoportjai milyen intézkedéseket, döntéseket hajtanak végre. Szemléltetésképpen bemutatom a következő példát: Az ellátási láncban a szállítási folyamat károsanyag kibocsátási mennyiségére közvetlenül hatással vannak a döntések, melyeket a forgalmazó hoz meg. Ugyanakkor ezen károsanyag-kibocsátás mennyiség akár csökkenhet is azáltal, hogy például egy dolgozó, aki a csomagokat állítja össze, képes a hatékonyabb csomagolásra, mely kevesebb károsanyag-kibocsátással jár. Egy i céget úgy tekintünk, hogy közvetve vagy közvetlenül felelős a k folyamat szennyezéséért, ha tevékenységei során hatással van a károsanyag-kibocsátásra (f_k). Ezért a cégek felelősségét a különböző folyamatokban keletkező károsanyag-kibocsátásra vonatkozóan egy $(0, 1)$ mátrixon keresztül reprezentáljuk. Legyen tehát $B = (b_{i,k})$ egy olyan felelősségi mátrix, ahol $\forall i \in N$ és $k \in M$ esetén, $b_{i,k}$ pontosan akkor egyenlő 1-el, ha $i \in N^k$, azaz az i felelős a k folyamatért. Azt feltételezzük, hogy az ellátási lánc egy szén-dioxid-adó rendszer alatt működik, ahol a szabályozó büntetést vet ki a szén-dioxid kibocsátás miatt, amennyiben ez a kibocsátás meghaladja a 0 tonnát az ellátási láncban. Továbbá azt feltételezzük, hogy az ellátási lánc vezetőjének az a célja, hogy a károsanyag-kibocsátást csökkentsék az ellátási láncukban. A vezető ezt az összes számára rendelkezésére álló információ segítségével próbálja elérni.

Végső célként azt tűzi ki, hogy egy olyan szennyezés-elosztási szabályt tudjon meghatározni, ami elosztja az ellátási lánc teljes károsanyag-kibocsátását ($\sum_{k \in M} f_k$) oly módon, hogy figyelembe veszi a közös szennyezési felelősségre vonatkozó információkat. Ezáltal ösztönözni szeretné a vállalatokat arra, hogy olyan intézkedéseket tegyenek, melyek az egyéni károsanyag-kibocsátások csökkentésén keresztül csökkentik a teljes ellátási láncra vonatkozó károsanyag-kibocsátást.

3.1. Ellátási lánc probléma

3.1. Definíció. Az ellátási lánc probléma egy (N, M, B, f) rendezett négyes, ahol N azon vállalatok halmaza, melyek hozzájárulnak az ellátási lánchoz. M az ellátási lánc folyamatainak halmaza, B egy $N \times M$ bináris mátrix, melyet felelősségi mátrixnak nevezünk, ahol $b_{i,k} = 1$ azt jelenti, hogy az i cég felelős a k folyamatért, $b_{i,k} = 0$ pedig azt jelenti, hogy az i cég nem felelős a k folyamatért. Legyen $f \in \mathbb{R}_+^M$ a karbonlábnyom vektora, f_k pedig a k -adik folyamat karbonlábnyoma. Jelölje SCP^N az N vállalattal rendelkező ellátási lánc problémák halmazát.

3.2. Definíció. A szennyezés-elosztási szabály, egy olyan ψ leképezés, ahol $\psi : SCP^N \rightarrow \mathbb{R}_+^N$, és ahol minden egyes $(N, M, B, f) \in SCP^N$ ellátási lánc probléma esetére érvényes, hogy $\sum_{i \in N} \psi(N, M, B, f)_i = \sum_{k \in M} f_k$.

A szennyezés-elosztási szabály meghatározza, hogy a teljes ellátási lánc karbonlábnyomából mekkora rész jut az egyes cégekre. Javasolt, hogy az egész karbonlábnyomot felosszuk. Egyik cégnek sem adódhat ebből a felosztásból nyeresége, tehát minden egyes cégre nemnegatív értékű rész jut. Mivel az ellátási láncban minden cégnek a karbonlábnyoma nemnegatív, ez azt jelenti, hogy a modellben nincsen károsanyag-kibocsátást csökkentő tevékenység. Tehát a kérdés valóban az, hogy az egyes cégeknek mekkora részt kell vállalniuk a teljes ellátási lánc karbonlábnyomából. Ezáltal adott esetben a felmerülő adókból, költségekből. A szennyezés-elosztási szabály választ ad erre a kérdésre.

Az ellátási lánc vezetőjét feltételezhetően környezetvédelmi szempontok motiválják. Caro et al. (2013) modelljében az ellátási lánc vezetője önkéntesen dönt az ellátási lánc kibocsátásának kompenzálásáról, majd kifizetésekkel ösztönözheti az ellátási lánc tagjait arra, hogy csökkentsék károsanyag-kibocsátásaikat. Ezzel szemben a bemutatott modellben az ellátási lánc vezetőjének a szerepe sokkal limitáltabb. Célja továbbra is az ellátási lánc alacsonyabb károsanyag-kibocsátása. Végső soron azáltal kívánja ezt elérni, hogy az ellátási lánc közös felelősségére vonatkozó információit felhasználja, miközben újraosztja a teljes ellátási láncra nehezedő szén-dioxid-adó terhelést.

3.2. Az ellátási lánc játék bevezetése

Ebben a részben foglalkozunk bővebben az ellátási lánc játékokkal. A korábbiakban definiáltuk már az ellátási lánc fogalmát. Ez egy olyan hálózatot takar, amiben különböző cégek együttműködnek egy közös végtermék létrehozásában. Tegyük fel, hogy meg van adva az M -el jelölt folyamatok halmaza és a B felelősségi mátrix, ami egy $N \times M$ bináris mátrix, és ahol $b_{i,k} = 1$ azt jelenti, hogy az i szereplő felelős a k folyamatért, $b_{i,k} = 0$ pedig azt jelenti, hogy i szereplő nem felelős a k folyamatért. Minden egyes $k \in M$ folyamat magába foglalja a karbonlábnyomát, vagy költségét a meghatározott folyamatnak és ezt f_k -val jelöljük, ami egy nemnegatív skalár. Ezzel egy TU-játékot tudunk definiálni:

3.3. Definíció. Tekintsük az (N, M, b, f) ellátási lánc problémát. Ekkor minden $S \subseteq N$ esetén legyen

$$v(S) = \sum_{i \in S} b_{i,k} \cdot f_k.$$

Vegyük észre, hogy $v \in \mathcal{G}^N$. Jelölje $\mathcal{G}_{SC}^N$ az N játékosalmazzal rendelkező ellátási lánc játékok osztályát.

Tehát egy koalíció értéke a koalícióban szereplő játékosok karbonlábnyomának összegéből tevődik össze. Feltételezzük, hogy minden folyamatért legalább egy játékos felelős.

Egy egyszerű példával szemléltetném az előbbieket: Tekintsük $N = 1, 2, 3$ -nek a cégek halmazát a háromszereplős ellátási láncban, $M = m_1, m_2, m_3$ pedig jelölje a különböző folyamatokat és $f = [f_1, f_2, f_3]$ pedig megfelel az ellátási lánc szénlábnyom vektorának, ami az ellátási lánc összes folyamatához kapcsolódó kibocsátásokból tevődik össze. Tegyük fel, hogy míg a 2., valamint a 3. vállalat egyenként felelős az m_2 , valamint az m_3 folyamatokban létrejövő szennyezésért, m_1 folyamat károsanyag kibocsátását mindhárom cég együttesen befolyásolhatja. Ezért a felelősségi mátrix a következőképpen adható meg: $B = (b_{i,k})$, ahol $b_{1,1} = b_{2,1} = b_{3,1} = 1$, $b_{2,2} = b_{3,2} = 1$, a többi helyen a B mátrixban pedig 0 szerepel. Ekkor $v(\{1\}) = f_1$, $v(\{2\}) = v(\{1, 2\}) = f_1 + f_2$, $v(\{3\}) = v(\{1, 3\}) = f_1 + f_3$ és $v(\{1, 2, 3\}) = v(\{2, 3\}) = f_1 + f_2 + f_3$.

3.4. Megjegyzés. (N, v) egy konkáv játék, ezért a v_{SC} játék magja nemüres és a Shapley-érték magbéli. (Shapley, 1955; Gillies, 1959)

3.3. Az ellátási lánc játékok karakterizációja

A következő fejezetben az ellátási lánc játékok osztályát fogjuk karakterizálni, az egyetértési játékok duálisai segítségével.

3.5. Definíció. Minden $T \in 2^N \setminus \emptyset$ és minden $S \subseteq N$ esetén:

$$\bar{u}_T(S) = \begin{cases} 1, & \text{if } T \cap S \neq \emptyset, \\ 0 & \text{különben.} \end{cases}$$

Az $\bar{u}_T$ játékot nevezzük a T koalícióhoz tartozó duális egyetértési játéknak.

3.6. Tétel. Minden $v \in \mathcal{G}_{SC}^N$ ellátási lánc játék esetén teljesül, hogy:

$$v = \sum_{\substack{k \in M \\ T = \{i \in N : b_{i,k} = 1\}}} f_k \bar{u}_T. \quad (3.1)$$

A formula szerint tehát minden koalíciónak pontosan azokat a költségeket kell fedeznie, amikért a részcsoporthoz tartozó tagjai felelősek (ld. Pintér és Radványi (2021)).

3.4. Shapley-érték axiomatizációja

Amikor egy ellátási lánc problémára keresünk egy megoldást, akkor egy olyan elosztási problémát szeretnénk megadni, amire bizonyos tulajdonságok teljesülnek. Ezek olyan alapvető tulajdonságok amelyeket a résztvevők szempontjából jogosan elvárnak gondolunk. Ezekkel fogunk most foglalkozni.

3.7. Definíció. Egy $A \subseteq \mathcal{G}^N$ játékoszályon értelmezett ψ megoldás

- *PO (Pareto optimális vagy hatékony)*, ha $\sum_{i \in N} \psi_i(v) = v(N)$, $v \in A$,
- *ETP (Egyenlően kezelő - Equal Treatment Property)*, ha minden $i, j \in N$ esetén, amire $i \sim^v j$, teljesül, hogy $\psi_i(v) = \psi_j(v)$,
- *CC (Magkompatibilis - Core Compatibility)*, ha minden $v \in A$ esetén teljesül, hogy $\psi(v) \in \text{Core}(v)$,
- *SM (Erősen monoton - Strong Monotonicity)*, ha minden i játékos, illetve minden $v, w \in V$ játék esetén teljesül, hogy $v'_i \leq w'_i \Rightarrow \psi_i(v) \leq \psi_i(w)$.

Ezekről a tulajdonságokról könnyen meggondolható, hogy jogosan elvártak. A PO azt követeli meg, hogy az ellátási lánc összes károsanyag-kibocsátását szétosszunk a vállalatok között. Az ETP tulajdonság a következőért felel: Tegyük fel, hogy két vállalat ugyanazon tulajdonságokat hordozza magában, tehát lényegében felcserélhetőek, vagyis nem releváns a játék szempontjából, hogy a két vállalat melyik játékos szerepében játszik. Például mindkettő csak az első folyamat károsanyag-kibocsátásáért felel és ugyanakkora

mértékben járulnak hozzá a teljes károsanyag-kibocsátáshoz. Ebben a helyzetben ne fordulhasson elő az, hogy a szennyezés-elosztási szabály segítségével ezen két vállalat esetén az egyik vállalatra magasabb költség jusson, mint a másikra, hiszen azonos tulajdonságokat hordoznak magukban, felcserélhetőek. Tehát a rendszer kezelje őket egyenlően. A CC követelménye azt fejezi ki, hogy minden egyes vállalatra maximum akkora részt osszunk a szennyezés-elosztási szabállyal, amekkora részben az adott vállalat önmagában ténylegesen felel a károsanyag kibocsátásért. Tehát a megoldás magbéli. És végül az SM tulajdonság pedig azért felel, hogy ha adott két azonos struktúrájú ellátási lánc játék, v és w , úgy, hogy egy adott i játékosnak a v játékban kisebb a károsanyag kibocsátása mint a w játékban, akkor a v játékban az i játékosra osztott költség nem lehet nagyobb, mint a w játékban. Ez azt jelenti, hogy a játék csalásbiztos, tehát nem fordulhat elő, hogy egy szereplő úgy tudja csökkenteni a saját károsanyag-kibocsátását (*ceteris-paribus*), hogy közben a teljes láncra vonatkozó összkibocsátás növekedne.

3.8. Megjegyzés. *CC tulajdonságból következik a PO teljesülése is.*

3.9. Tétel. *Egy $\mathcal{G}_{SC}^N$ játékoszályon értelmezett ψ érték pontosan akkor ETP, CC és CM, ha megegyezik a Shapley-értékkel (ld. Pintér és Radványi (2021)).*

4. fejezet

A gyümölcsös dobozok életciklusának elemzése ellátási lánc játékokkal

Ebben a fejezetben az ellátási lánc játékot, amit a 3. fejezetben fejtettem ki bővebben, alkalmazom az 1. fejezetben tárgyalt gyümölcsös dobozok életciklus elemzésére vonatkozóan. A gyümölcsös dobozok életciklus elemzése során megállapított teljes szén-dioxid kibocsátást osztjuk fel a gyümölcsös dobozok ellátási láncát reprezentáló vállalatok között. A játékot a PET-re vonatkozóan reprezentálom részletesen, azonban többek között a Shapley-értéket, ami az egyetlen hatékony elosztási struktúra a 3.9. tétel alapján, kiszámolom a PLA és PS esetén is, hogy a három anyag környezeti kárhatását némiképpen össze tudjam hasonlítani.

4.1. A játék szereplői

A játékban négy játékos vesz részt, az első ezek közül a gyantagyártó vállalat, aki a különböző polimer anyagokból előállított gyantákat állítja elő. A második játékos a gyantaszállító vállalat, aki az elkészített gyantákat a gyantagyártó cégtől átszállítja a dobozgyártó vállalat részére. A harmadik játékos a dobozgyártó vállalat. A dobozgyártó vállalatától a kész dobozokat átveszi a negyedik játékos, a dobozszállító vállalat.

A játékban négy folyamat van, a gyantagyártás, gyantaszállítás, dobozgyártás valamint a dobozszállítás. Ezeket rendre m_1 , m_2 , m_3 , valamint m_4 -el jelölöm. Az egyes gyártási folyamatokhoz a három különböző polimer esetén nem mindig azonos játékos társítható. Tehát a különböző anyagból készült gyantákat például nem egy vállalat gyártja, hanem három különböző (ld. az 1.3. ábrán).

Játékosok	
1	gyantagyártó vállalat
2	gyantaszállító vállalat
3	dobozgyártó vállalat
4	dobozszállító vállalat

4.1. táblázat. A játékosok

Folyamatok	
m_1	gyantagyártás
m_2	gyantaszállítás
m_3	dobozgyártás
m_4	dobozszállítás

4.2. táblázat. A folyamatok

4.2. A felelősségi körök meghatározása

A játékhoz tartozó felelősségi körök a következőképpen alakulnak: Az első játékos, azaz a gyantagyártó vállalat csak a gyantagyártás következtében létrejövő károsanyag-kibocsátásért felel. A második játékos, a gyantaszállító vállalat csak a gyantaszállítás során létrejövő károsanyag-kibocsátásáért felel. Azonban a harmadik játékos, a dobozgyártó vállalat már felel a dobozgyártási folyamat károsanyag-kibocsátásán kívül a gyantagyártás, valamint gyantaszállítás következtében létrejövő károsanyag kibocsátásáért is. Hiszen az első két folyamat annak érdekében történik, hogy a gyümölcsös dobozok el tudjanak készülni. Valamint a harmadik játékosnak van választása, hogy kitől szerzi be a kész gyantákat. És végezetül a negyedik játékos, a dobozszállító vállalat csak a dobozgyártási folyamatért felel. A B felelősségi mátrix, ahol a sorok az egyes játékosokat jelölik, az oszlopok pedig az egyes folyamatokat, a következőképpen néz ki:

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

Ezt úgy értelmezhető, hogy amennyiben egy játékos felelős az adott folyamatért, oda 1-et írunk, ha pedig nem felelős, abban az esetben 0-t. Vegyük például a 3. sor, 2. oszlopban szereplő 1-et. Ez az egyes azt jelenti, hogy a 3. játékos felelős az m_2 folyamatért, azaz a dobozgyártó vállalat a gyantagyártás folyamatában bekövetkező károsanyag kibocsátásért.

Míg például a 4. sor 1. oszlopában szereplő 0 azt jelenti, hogy a 4. játékos nem felelős az m_1 folyamatért, ugyanis a dobozszállító vállalat nem felelős a gyantagyártás folyamata során létrejövő károsanyag kibocsátásért.

4.3. A játék definíciója

Az f a 3. fejezetben tárgyaltak alapján az ellátási lánc szénlábnyom vektorát jelöli, ami az ellátási lánc összes folyamatához kapcsolódó kibocsátásokból tevődik össze. Ehhez nézzük meg újra az adatokat, melyek Madival et al. (2009) tanulmányából vannak. Tehát tekintsük meg a 4.3. táblázatot.

folyamat elnevezése	f_{PET}	f_{PLA}	f_{PS}
gyantagyártás	65	60	70
gyantaszállítás	50,2	28,7	31,7
dobozgyártás	44	40	33
dobozszállítás	39,3	41,8	30,1
összesen:	198,5	170,5	164,8

4.3. táblázat. A három polimerre vonatkozó CO₂ kibocsátás folyamatonként

Az ellátási lánc játék a 3.3. képlet alapján definiálható: $v(S) = \sum_{i \in S} b_{i,k} \cdot f_k$

Tehát egy koalíció értéke a koalícióban szereplő játékosok karbonlábnyomának összegéből tevődik össze. Feltételezzük, hogy minden folyamatért legalább egy játékos felelős. Az ellátási lánc játék a következőképpen adható meg a PET-ből készült dobozok esetén:

$$\begin{aligned}
v(\emptyset) &= 0 & v(\{2, 3\}) &= 159,2, \\
v(\{1\}) &= 65, & v(\{2, 4\}) &= 89,5, \\
v(\{2\}) &= 50,2, & v(\{3, 4\}) &= 198,5, \\
v(\{3\}) &= 159,2, & v(\{1, 2, 3\}) &= 159,2, \\
v(\{4\}) &= 39,3, & v(\{1, 2, 4\}) &= 154,5, \\
v(\{1, 2\}) &= 115,2, & v(\{1, 3, 4\}) &= 198,5, \\
v(\{1, 3\}) &= 159,2, & v(\{2, 3, 4\}) &= 198,5, \\
v(\{1, 4\}) &= 104,3, & v(N) &= 198,5.
\end{aligned}$$

Ezt úgy tudjuk értelmezni, hogy például az 1. és 2. játékosból létrejövő koalíciónak ($v(\{1, 2\})$) az értéke 115,2, azaz ennyi ezen két játékos karbonlábnyomának összege, mert ők ketten együtt m_1 és m_2 folyamatért felelősek. Míg például a 3. és 4. játékosból létrejövő koalíció ($v(\{3, 4\})$) értéke 198,5, hiszen a 3. játékos az első két folyamat karbonlábnyomáért is felel, tehát ennek a koalíciónak az értéke egyenlő a teljes ellátási láncra vonatkozó karbonlábnyom értékével.

4.4. A játék reprezentációja

Az alábbiakban reprezentálom a játékot a duális egyetértési játék segítségével. A (4.1). egyenlet azt mutatja meg, hogy minden koalíciónak pontosan azokat a költségeket kell fedeznie, amikért a részcsoportjai felelősek.

$$v = \sum_{\substack{k \in M \\ T = \{i \in N : b_{i,k} = 1\}}} f_k \bar{u}_T. \quad (4.1)$$

A B felelősségi mátrix segítségével láthatjuk, hogy mely koalíciók szükségesek a reprezentáláshoz. Például az m_1 folyamatért az 1. és a 3. játékos felelős. Tehát az $\{1, 3\}$ koalícióra vonatkozó duális egyetértési játékra szükségünk van a reprezentációhoz. És ez látható a többi folyamat esetén is, így a reprezentációhoz a 4.4. táblázatban látható 4 koalícióra lesz szükség. Az ellátási lánc játék reprezentációjában minden egyes ilyen duális játékot meg kell szorozni a megfelelő karbonlábnyommal.

k	$T = \{i \in N : b_{i,k} = 1\}$
1	$\{1, 3\}$
2	$\{2, 3\}$
3	$\{3\}$
4	$\{4\}$

4.4. táblázat. A játék reprezentációjában releváns koalíciók

A gyümölcsös dobozra szolgáló adatokból a következő képlet segítségével számoljuk ki az ellátási láncjátékot:

$$v = f_1 \cdot \bar{u}_{\{1,3\}} + f_2 \cdot \bar{u}_{\{2,3\}} + f_3 \cdot \bar{u}_{\{3\}} + f_4 \cdot \bar{u}_{\{4\}}$$

Tehát a PET anyagból gyártott dobozokra vonatkozó karbonlábnyom adatokra a következőképpen tudjuk kiszámolni az ellátási láncjátékot:

$$v_{PET} = 65 \cdot \bar{u}_{\{1,3\}} + 50,2 \cdot \bar{u}_{\{2,3\}} + 44 \cdot \bar{u}_{\{3\}} + 39,3 \cdot \bar{u}_{\{4\}}$$

Az alábbi 3 táblán részletesen is látható, hogy számértékileg hogyan épül fel a konkrét játék. A 3 táblázat egy-egy azonos sorszámú sora adja meg a megfelelő duális egyetértési játékot, például az első sora adja az $\{1, 3\}$ koalícióhoz tartozó duális egyetértési játékot. A sor előtt látható értékek pedig az egyes folyamathoz tartozó karbonlábnyom értékek lesznek, például az m_1 -es folyamat esetén ez 65, ezért a folyamatért felel az említett $\{1, 3\}$ koalíció. A játékokban az egyes koalíciók értékei pedig az adott koalíciókhoz tartozó oszlopvektorok és az f_{PET} oszlopvektor skaláris szorzataként állnak elő.

f_{PET}	S	$\emptyset$	$\{1\}$	$\{2\}$	$\{3\}$	$\{4\}$
65	$\bar{u}_{\{1,3\}}$	0	1	0	1	0
50.2	$\bar{u}_{\{2,3\}}$	0	0	1	1	0
44	$\bar{u}_{\{3\}}$	0	0	0	1	0
39.3	$\bar{u}_{\{4\}}$	0	0	0	0	1
	$v(S)$	0	65	50,2	159,2	39,3

f_{PET}	S	$\{1, 2\}$	$\{1, 3\}$	$\{1, 4\}$	$\{2, 3\}$	$\{2, 4\}$	$\{3, 4\}$
65	$\bar{u}_{\{1,3\}}$	1	1	1	1	0	1
50.2	$\bar{u}_{\{2,3\}}$	1	1	0	1	1	1
44	$\bar{u}_{\{3\}}$	0	1	0	1	0	1
39.3	$\bar{u}_{\{4\}}$	0	0	1	0	1	1
	$v(S)$	115,5	159,2	104,3	159,2	89,5	198,5

f_{PET}	S	$\{1, 2, 3\}$	$\{1, 2, 4\}$	$\{1, 3, 4\}$	$\{2, 3, 4\}$
65	$\bar{u}_{\{1,3\}}$	1	1	1	1
50.2	$\bar{u}_{\{2,3\}}$	1	1	1	1
44	$\bar{u}_{\{3\}}$	1	0	1	1
39.3	$\bar{u}_{\{4\}}$	0	1	1	1
	$v(S)$	159,2	154,5	198,5	198,5

4.5. táblázat. Reprezentáció a duális egyetértési játékkal

4.5. A játék megoldása: a Shapley-érték

Arra a problémára kerestük a megoldást, hogy hogyan osszuk szét a károsanyag-kibocsátást a vállalatok között. A következőkben tehát következik az a lépés, amikor a karbonlábnyomokat elosztjuk a játékosok között a Shapley-érték segítségével, ugyanis bizonyos természetesen adódó elvárt tulajdonságok mellett (ld. a 3.4. alfejezet) a Shapley-érték az egyetlen elfogadható, hatékony elosztási struktúra (ld. a 3.9. tétel). Az elosztást igen egyszerűen el tudjuk végezni. Oly módon csináljuk, hogy az egyes folyamatokhoz tartozó károsanyag-kibocsátás értékét elosztjuk annyival, ahány játékos felel érte. Tehát például a PET-re vonatkozó gyantagyártási folyamatért az első és a harmadik (a gyantakészítő és a dobozkészítő vállalat) játékos felel, ez két játékos összesen tehát, a gyantagyártási folyamatra vonatkozó 65 CO₂ kg-ot 2 részre kell osztani. Ez 32,5-el egyenlő. A gyantaszállításért szintén két játékos felel, a dobozgyártásért egy és a dobozszállításért is egy. Így a kapott értékek rendre 32,5, 25,1, 44, valamint 39,3.

Magát a Shapley-értéket úgy kapjuk meg, hogy egy adott játékos esetén összeadjuk azokhoz a folyamatokhoz tartozó elosztási értékeket amelyekért a játékos felel. Tehát ez az első játékos esetén 32,5, hiszen csak az első folyamatért felel, a második játékos esetén 25,1, hiszen ő csak a második folyamatért felel, a harmadik játékos esetén össze kell adni az első három folyamathoz tartozó elosztási értéket, hiszen ez a játékos az első három folyamatért felel, ez tehát $32,5+25,1+44$ ami 101,6-al egyenlő. Míg a negyedik játékos csak a negyedik folyamatért felel, ennek az elosztási értéke 39,3. Ezek lesznek a játékosonkénti Shapley-értékek.

A PET-re vonatkozó Shapley-vektor így tehát:

$$\phi_{PET} = (32, 5; 25, 5; 101, 6; 39, 3)$$

Ezt ugyanilyen módszerrel ki tudjuk számolni a másik két anyagra, a PLA-hoz és PS-hez tartozó Shapley-vektorok a következők:

$$\phi_{PLA} = (30; 14, 35; 84, 35; 41, 8)$$

$$\phi_{PS} = (35; 15, 85; 83, 55; 30, 1)$$

Ez a károsanyag-kibocsátás elosztási módszer azért lesz megfelelő és "igazságos", ahogyan azt a 3.4. alfejezetben részletesen kifejtettem, hiszen teljesülnek rá azon tulajdonságok, hogy egyenlően kezeli az azonos szerepű vállalatokat, a megoldás magbéli, illetve olyan megoldást ad, ami egyfajta csalásbiztosságot garantál. Az egyetlen megoldás, ami ezeket a tulajdonságokat teljesíti, a Shapley-érték.

4.6. Az eredmények értékelése

Ha az adott ellátási láncra bevezetnének egy szén-dioxid-adó rendszert, tehát minden kibocsátott CO₂ kg után fizetni kellene a vállalatoknak egy x összeget, akkor az nem lenne "igazságos", ha a vállalatokat azzal a pénzbírsággal arányosan súlytanák, amekkora károsanyagot a saját feladatuk ellátása során okoznak. Hiszen egy ellátási láncban a szereplők nem feltétlenül csak a saját tevékenységükért felelnek, ahogyan azt a gyümölcsös dobozok esete is mutatja. Az "igazságos" módszer arra, hogy a pénzbírság mértékét megszabják a Shapley-érték kiszámolása és ezen értékkel arányos büntetés megszabása. A szén-dioxid-adó rendszer bevezetése motiválná a vállalatokat arra, hogy intézkedéseket tegyenek annak érdekében, hogy károsanyag-kibocsátásukat csökkentsék. Ez nagyon fontos lépés lenne környezetünk védelme érdekében. Jelen esetben, a dobozok előállításáért felelős vállalatnak az is érdeke, hogy az első két folyamatban is csökkentsék a CO₂

kibocsátást, hiszen a szén-dioxid-adó bevezetése és annak Shapley-értékkel való meghatározása esetén pénzbírságát nem csak saját tevékenységén keresztül tudná csökkenteni, hanem az első két folyamat CO₂ csökkentése esetén is. Megtehetné azt is, hogy egy olyan gyantát választ, amiből később a dobozokat fogja előállítani, aminek előállítása kevesebb károsanyag-kibocsátással jár más anyagokhoz viszonyítva.

A CO₂ kibocsátás például a gyantagyártási folyamatban a PLA anyag esetén a legkisebb, ez valószínűleg az anyag környezetbarátabb mivoltának tudható be. Tehát az első számú játékosoknak jó döntés lehet környezetvédelmi szempontból, ha áttérnek a szénhidrogén alapú polimerekről a kukoricából készületekre. A szállításban történő CO₂ kibocsátás eltérése az egyes anyagok között nyilvánvalóan a szállítási távolságok különbségéből adódik. Ezek csökkentése érdekében csak annyit lehetne tenni, hogy az ellátási lánc szereplői egymáshoz közelebbi telephelyre költöznek. A dobozok előállítása során már nem a PLA-hoz tartozik a legkedvezőbb eredmény, ebből is látszik, hogy ennyi adatból nem lehet egyértelműen meghatározni, hogy összességében melyik anyag legkörnyezetkímélőbb. Vannak olyan adatok amik a tanulmány keretrendszerén kívül esnek, úgymint a hulladéklerakás, újrahasznosítás, hulladékfelhasználás. Ezek sem elhanyagolható környezetvédelmi szempontok. Egy bölcsőtől-bölcsőig tartó életciklus elemzés tisztább képet mutathatna számunkra, hogy vajon melyik anyagból készült gyümölcsös doboz a legkörnyezetkímélőbb a CO₂ kibocsátási adatot figyelembe véve, ami többek között a globális felmelegedésért felelős.

Azonban ezen példa jól szemlélteti azt, hogy a vállalatokat milyen eszközökkel lehet arra ösztönözni, hogy lehetőségükhöz mérten a legkörnyezetkímélőbb stratégiát alkalmazzák.

Összefoglalás

A dolgozatban arra a problémára kerestem megoldást, hogy egy termék életciklus-elemzése során megállapított teljes károsanyag-kibocsátását hogyan lehet szétosztani a termelési folyamatot reprezentáló ellátási lánc szereplői között. Ezen felül bemutattam, hogy ez miképpen hathat ösztönzően a vállalatokra, hogy azok károsanyag-kibocsátásukat csökkentsék.

Az esettanulmány segítségével ismertettem a gyümölcsös dobozok anyagának sajátosságait, előállításuknak módját, szállításukra vonatkozó jellemzőket. Az életciklus elemzés módszertanának felhasználásával számszerűsítettem a dobozok előállításának károsanyag-kibocsátását.

A kooperatív játékelmélet fogalmainak megismerése kulcsfontosságú volt az ellátási lánc játékok bevezetéséhez. Az ellátási lánc játék problémára ismertettem a megoldást, ami a dolgozatban felmerülő problémára a megoldást adta. A Shapley-érték axiomatizációja megmutatta, hogy miért a Shapley-érték lesz az egyetlen hatékony elosztási struktúra.

Az ellátási lánc játék gyümölcsös dobozok esetén bemutatva jól reprezentálta a felmerülő problémát és az arra szolgáló megoldást. Ebben az esetben a dobozgyártó cégnek érdekében állna, hogy egy esetlegesen környezetbarátabb gyantára áttérjen, hiszen a széndioxid-adó bevezetése esetén, ezzel csökkenteni tudná a pénzbüntetését.

A dolgozat egy lehetséges továbblépési iránya, ha a matematikai modellt terjesztjük ki. Érdekes lehet meggondolni, hogy miként változik a matematikai struktúra és a kapott eredmények abban az esetben, ha megengedünk negatív károsanyag-kibocsátásokat is. Ezáltal figyelembe tudnánk venni azt az esetet is, amikor egy vállalat például egy újrahasznosítási folyamat révén csökkenteni tudná valamely termelési folyamat károsanyag-kibocsátását.

Egyre fontosabb a dolgozatban bemutatott modell jellegéhez hasonló modellek alkalmazása, hiszen a globális felmelegedés tényét és veszélyét nem hagyhatjuk figyelmen kívül. A modell alkalmazása egy jó módszer lenne arra, hogy a vállalatokat arra ösztönözzük, hogy felelősebb döntéseket hozzanak vállalatirányításuk során.

Irodalomjegyzék

- Bałdowska-Witos P, Kruszelnicka W, Tomporowski A (2020) Life cycle assessment of beverage bottles. *Journal of Physics: Conference Series*, article id:012038 1426(1)
- Battaglini M (2006) Joint production in teams. *J. Econom. Theory* 130(1):138–167
- Caro F, Corbett C, Tan T, Zuidwijk R (2013) Double counting in supply chain carbon footprinting. *Manufacturing Service Oper. Management* 15(4):545–558
- Gillies DB (1959) Solutions to general non-zero-sum games. In: Tucker AW, Luce RD (eds.) *Contributions to the Theory of Games IV*, Princeton University Press pp. 47–85
- Gopalakrishnan S, Granot D, Granot F, Sosic G, Cui H (2020) Incentives and Emission Responsibility Allocation in Supply Chains. *Management Science* 67(7):4172–4190
- Ichiishi T (1981) Super-modularity: Applications to Convex Games and to the Greedy Algorithm for LP. *Journal of Economic Theory* 25:283–286
- Klöpffer W (1997) Life Cycle Assessment: From the Beginning to the Current State. *ESPR - Environ. Sci. & Pollut. Res* 4(4):223–228
- Klöpffer W, Grahl B (2014) *Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice* Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaH
- Lucas WF (1981) Applications of cooperative games to equitable allocation. In: Lucas WF (ed.) *Game theory and its applications*, RI. American Mathematical Society, Providence pp. 19–36
- Madival S, Auras R, Singh SP, Narayan R (2009) Assessment of the environmental profile of PLA, PET and PS clamshell containers using LCA methodology. *Journal of Cleaner Production* 17(13):1183–1194
- Peleg B, Sudhölter P (2007) *Introduction to the Theory of Cooperative Games*, second edition ed. Springer-Verlag

- Pintér M, Radványi AR (2021) Decentralized Stable and Incentive Compatible Mechanisms for Networks. Working Paper, elérhető a szerzőknél: anna.radvanyi@uni-corvinus.hu
- Shapley LS (1953) A value for n -person games. In: Kuhn HW, Tucker AW (eds.) Contributions to the theory of games II, Annals of Mathematics Studies 28. Princeton University Press, Princeton pp. 307–317
- Shapley LS (1955) Markets as Cooperative Games. Technical Report, Rand Corporation
- Shapley LS (1971) Cores of Convex Games. International Journal of Game Theory 1:11–26
- Solymosi T (2007) Kooperatív játékok. (Elektronikus jegyzet, letöltve: 2022.01.25.)
<https://docplayer.hu/5894637-Kooperativ-jatekok-solymosi-tamas-2007-majus-31-elektronikus-jegyzet.html>
- Tijs SH, Driessen TSH (1986) Game Theory and Cost Allocation Problems. Management Science 32(8):1015–1028
- Weber RJ (1988) Probabilistic values for games. In: Roth AE (ed.) The Shapley value, Cambridge University Press, Cambridge pp. 101–119
- Young HP (1985) Cost allocation. In: Young HP (ed.) Fair Allocation, Proceedings Symposia in Applied Mathematics 33. RI. American Mathematical Society, Providence pp. 69–94